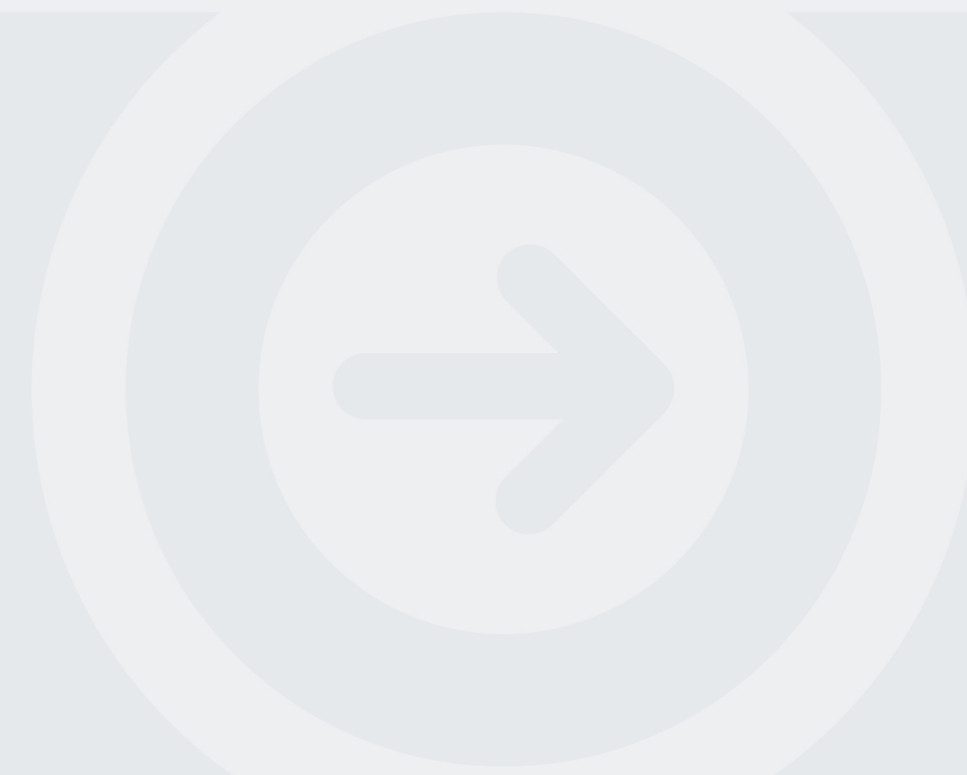


# PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM SOB AÇÃO DO VENTO COM UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)

RAFAEL DE ARAÚJO CABRAL  
Dezembro de 2019



**PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DA TORRE DE  
TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM SOB AÇÃO DO VENTO COM  
UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)**

RAFAEL DE ARAÚJO CABRAL

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS**

Orientador: Professor Doutor Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Co-Orientador: Professor Mestre Ricardo Manuel Pereira Santos

Co-Orientador: Professor Mestre João Carlos Gabriel (UPM)

**DEZEMBRO DE 2019**



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice de Texto .....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas .....	xix
Abreviaturas .....	xxi
CAPÍTULO 1    Introdução.....	1
CAPÍTULO 2    Revisão Bibliográfica.....	5
CAPÍTULO 3    Metodologia de Investigação e Caso de Estudo .....	27
CAPÍTULO 4    Instrumentação .....	35
CAPÍTULO 5    Desenvolvimento das Ferramentas.....	53
CAPÍTULO 6    Apresentação e Análise dos Resultados .....	65
CAPÍTULO 7    Considerações Finais .....	89
Referências Bibliográficas .....	93
Anexo I – Processamento de Imagem.....	99
Anexo II – Processamento de Sinal.....	103



## RESUMO

Com o tempo, as estruturas de construções civis ficam sujeitas a muitos fatores, sejam eles externos ou até mesmo inerentes às próprias estruturas, que influenciam significativamente em suas condições. Para que se possa mantê-las por muito anos, faz-se necessário investigar de forma detalhada seu estado de conservação e para isso, usualmente recorre-se a inspeções estruturais que permitem avaliar seu estado de conservação e com isso adotar procedimentos corretivos necessários. Entretanto, alguns tipos de estruturas tais como torres de telecomunicações, pontes, plataformas de petróleo *offshore*, torres de transmissão de energia, torres produtoras de energia eólica e outras, apresentam dificuldade no acesso para que o inspetor possa realizar suas tarefas. Através deste trabalho, avalia-se a contribuição da utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) ou *drones* em atividades de inspeção dinâmica. São apresentadas diferentes técnicas de inspeção para obter deslocamentos estruturais utilizando como exemplo de pesquisa prática a inspeção da Torre do Monte da Virgem, em Portugal, recorrendo à utilização de *drones* e processamento dos dados através do *software* MATLAB. O trabalho apresentou resultados muito promissores, sendo a utilização de *drones* de grande valia, mas apresentou também algumas limitações que são discutidas.

**Palavras-chave:** Inspeção Estrutural; Veículo Aéreo Não Tripulado; *Drone*; Torre Do Monte Da Virgem; Processamento de Imagem; Processamento de Sinal.



## **ABSTRACT**

Over time, civil construction structures are subject to many factors, whether external or even inherent to the structures themselves, that significantly influence their conditions. In order to be able to maintain them for many years, it is necessary to investigate in detail their state of conservation and, for this, it is usually resorted to structural inspections that allow the assessment of their state of conservation and thus adopt necessary corrective procedures. However, some types of structures such as telecommunication towers, bridges, offshore oil rigs, power transmission towers, wind power towers, and others, present difficult access for the inspector to perform his tasks. Through this work, the contribution of the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) or drones in dynamic inspection activities is evaluated. Through it, different inspection techniques are presented to obtain structural displacements, the practical inspection survey of the Monte da Virgem Tower in Portugal, with drone and data processing through MATLAB software, is presented as an example. The results of the project presented were promising though some limitations, which are also discussed, were detected.

**Keywords:** Structural Inspection; Unmanned Aerial Vehicle; *Drone*; Tower of the Mount Of The Virgin; Image Processing; Signal Processing



## **AGRADECIMENTOS**

Diversas pessoas fazem parte da construção desta pesquisa. Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma, para poder realizar cada etapa da mesma até chegar ao seu ápice que é o dia da sua apresentação. Apesar de agradecer a todos de forma demasiada, temos aquelas pessoas que exigem um carinho especial, pois fazem parte do nosso cotidiano, nos apoiam e fazem chegarmos até o nosso objetivo principal.

À Deus, fonte de toda sabedoria, pela força e pela coragem que nos concedeu, permanecendo ao nosso lado em todo o percurso desta caminhada.

Aos meus pais, Joselito e Francisca, e meus irmãos, Miguel e Gabriel, em especial, que sempre estão comigo, e são aqueles que aqui na terra realizam todas as minhas vontades e sei que em momentos difíceis estarão comigo.

À Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), que me abriu demasiadas oportunidades, entre elas, a oportunidade de realizar a dupla titulação, cursando o Mestrado em Estruturas no ISEP.

Aos Eng.º Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro e Eng.º Ricardo Manuel Pereira dos Santos, orientadores persistentes do ISEP, minha eterna gratidão, pelas orientações sempre presentes, mesmo que à longa distância, com diretrizes seguras, muita paciência, constante acompanhamento e incentivo.

Ao Eng.º João Carlos Gabriel, coordenador, professor e amigo, minha eterna gratidão, por ter sido coorientador persistente da UPM, que participou da minha trajetória, me ajudou significativamente com muita paciência, constante acompanhamento e incentivo na graduação.

À empresa ALTICE pela disponibilidade de acesso à Torre do Monte da Virgem utilizada como objeto de estudo do presente trabalho.

Durante meu período de intercâmbio na graduação de Engenharia Civil em Porto, Portugal (três semestres), conheci muitas pessoas, tanto brasileiros como estrangeiros, criei laços que estão marcados eternamente, devo meu amadurecimento pessoal e profissional a vocês, em especial ao Eng.º Gabriel Araújo Saramago e ao Eng.º Anderson Kyn Rodrigues Shibasaki, que participaram ativamente com estudos na Torre do Monte da Virgem, e aos desbravadores, amigos, que viveram, exploraram e compartilharam comigo as primeiras experiências além do Atlântico, Eric Bortoleto e Pedro Barroso.



## ÍNDICE DE TEXTO

1.1	Objetivos .....	3
1.1.1	Objetivo geral .....	3
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.2	Estrutura da dissertação .....	4
2.1	Monitoramento de deslocamento estrutural com sensores de contato.....	5
2.2	Monitoramento de deslocamento estrutural com sensores sem contato .....	6
2.3	Rastreamento por processamento de imagem.....	9
2.4	Aquisição de deslocamentos a partir de registro de acelerômetros.....	11
2.5	Monitoramento com veículos aéreos não tripulados (VANTs) .....	21
2.6	Medição de deslocamentos com VANTs.....	25
3.1	Metodologia .....	27
3.2	A Torre de telecomunicações do Monte da Virgem .....	31
4.1	<i>Drone</i> DJI Phantom 4 RTK.....	35
4.1.1	Manuseamento.....	37
4.1.2	Legislação Brasileira para uso de <i>drones</i> .....	39
4.1.3	Legislação Portuguesa para uso de <i>drones</i> .....	43
4.2	Câmera de vídeo Panasonic HC-V380.....	45
4.3	IMU .....	46
4.3.1	Acelerômetro.....	48
4.3.2	Giroscópio .....	49
4.4	Alvo .....	51
5.1	Processamento de imagem .....	55

## ÍNDICE DE TEXTO

5.2	Processamento de sinal .....	58
6.1	Ensaio 1: Câmera estacionária e alvo em movimento.....	65
6.2	Ensaio 2: Câmera em movimento e alvo estacionário.....	76
6.3	Ensaio 3: Câmera em movimento e alvo em movimento .....	86
7.1	Conclusões.....	89
7.2	Desenvolvimentos futuros .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Medição de deslocamentos de uma ponte usando LVDT (Adaptado de Moreu <i>et al.</i> , 2016) .	5
Figura 2.2 - GPS para medição de deslocamento em pontes (Vazquez B. <i>et al.</i> , 2017). .....	6
Figura 2.3 - Estação total robótica (RTS) para medição de deslocamentos (Adaptado de Psimoulis e Stiros, 2007).....	7
Figura 2.4 - Mapa com áreas sujeitas a deslizamentos de terras (Liu <i>et al.</i> , 2011). .....	8
Figura 2.5 - Estudo comparativo de deslocamento LDV vs LDVT (Nassif, Gindy e Davis, 2005). .....	9
Figura 2.6 – Alvo e LVDT colocado no convés de uma ponte ferroviária (Ribeiro <i>et al.</i> , 2014) .....	10
Figura 2.7 – Rastreamento de objeto baseado em cor (Fernandes, 2015). .....	10
Figura 2.8 – Integrações: a) aceleração; b) velocidade; c) deslocamento; d); e); e f) respectivos espectros (Yang, Zhao e Kang, 2016). .....	12
Figura 2.9 - Análise de Fourier (Adaptado de nti-audio, 2019) .....	12
Figura 2.10 – Ideias respostas para os 4 tipos de filtros analógicos (adaptado de Rocha <i>et al.</i> , 2016).....	13
Figura 2.11 - Fluxograma de integração proposto e adaptado de Rocha <i>et al.</i> (2016) .....	14
Figura 2.12 - Configuração do ensaio de vibração de uma viga em consola (Rocha <i>et al.</i> , 2016).....	14
Figura 2.13 - Registro da aceleração e seus respectivos espectros (Adaptado de Rocha <i>et al.</i> , 2016). .....	15
Figura 2.14 – Comparação entre a tensão calculada e a mensurada (Adaptado de Rocha <i>et al.</i> , 2016). ..	15
Figura 2.15 - Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) dos deslocamento para terremoto de Tohoku, Japão (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018). .....	17
Figura 2.16 - Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) dos deslocamento no ensaio da ponte veicular (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018). .....	17
Figura 2.17 - Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) deslocamento no ensaio da , peões em pontes (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).....	18

Figura 2.18 -- Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) deslocamento no ensaio da mesa oscilante (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018). .....	18
Figura 2.19 - Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) deslocamento no ensaio e vibrações quase harmônicas (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018). .....	19
Figura 2.20 – Valores da RMSE e da CCC de cada metodologia para cada ensaio (Adaptado de Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).....	20
Figura 2.21- Base de clientes empresariais da <i>DroneDeploy</i> desde 2016 (Adaptado de DroneDeploy, 2018). .....	21
Figura 2.22- Crescimento no ano de 2017 nos setores da indústria (Adaptado de DroneDeploy, 2018). .	22
Figura 2.23 – Vídeo câmera e comunicação de dados (Larrauri, Sorrosal e Gonzalez, 2013).....	23
Figura 2.24 – UAV para monitoramento de tubos (Adaptado de Idachaba, 2016).....	23
Figura 2.25 Inspeção convencional de grandes estruturas (Hallermann e Morgenthal, 2013). .....	24
Figura 2.26 - Experiência em laboratório usando um canal hidráulico (Yoon, Shin e Spencer, 2018). .....	25
Figura 2.27 - Resultados experimentais do método proposto (Yoon, Shin e Spencer, 2018).....	26
Figura 3.1 – DJI Phantom 4 RTK (Mulakala, 2019).....	27
Figura 3.2 – HC-V380 Câmera de Vídeo (Panasonic, 2019).....	28
Figura 3.3 - Alvo dimensionado para o rastreo (Autoria própria). .....	29
Figura 3.4 – Fluxograma de pesquisa.....	30
Figura 3.5 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem: (a) vista geral; (b) torre metálica; (c) Pisos técnicos; (d) vista superior do interior do fuste, com vigas metálicas e detalhe de sua conexão no fuste (Ribeiro <i>et al.</i> , 2019).....	32
Figura 3.6 – Evento crítico: (a) Gravação da aceleração; (b) Detalhe da gravação de 10s; (c) Direção e velocidade do vento; (d) auto espectros médios e normalizados de acelerações (Ribeiro <i>et al.</i> , 2019). .....	33
Figura 4.1 - DJI Phantom 4 RTK (acervo do autor).....	35
Figura 4.2 - Orientação dos VANTs no espaço 3D (DroneDeploy, 2018). .....	36
Figura 4.3 - Fluxo de trabalho do RTK com o <i>drone</i> (Mulakala, 2019).....	36
Figura 4.4 - Sensor RTK embutido no <i>drone</i> (Mulakala, 2019).....	37
Figura 4.5 - Controlador DJI Phantom 4 (acervo do autor). .....	38

Figura 4.6 - Interface do <i>app</i> simulador (acervo do autor).....	38
Figura 4.7 – Primeiro manuseio do <i>drone</i> (acervo do autor).....	39
Figura 4.8 – Fluxograma para emissão de certificados. (Agência Nacional De Aviação Civil, 2017) .....	41
Figura 4.9 – Divisão do espaço aéreo brasileiro e seus órgãos regionais. (Ministério da Defesa, 2018) ...	42
Figura 4.10 - Áreas associadas a CTR do Porto (Autoridade Nacional da Aviação Civil, 2016). .....	44
Figura 4.11 - Localização da Torre do Monte da Virgem na CTR do Porto (GOOGLE LLC, 2019). .....	45
Figura 4.12- Suporte fixado ao <i>drone</i> (acervo do autor).....	46
Figura 4.13- Montagem de sistema inercial com três acelerômetros e três giroscópios (Mori, 2013).....	47
Figura 4.14 - DJI Assistant 2 for Phantom. ....	47
Figura 4.15 - <i>Software DatCon</i> (Autoria própria).....	48
Figura 4.16 - Planilha de registro dos sensores (Autoria própria). ....	48
Figura 4.17 – Funcionamento de um acelerômetro (National Instrument, 2019). ....	49
Figura 4.18 - Funcionamento de um giroscópio (Adaptado de Encyclopaedia Britannica, 2019).....	50
Figura 5.1 - Configuração do ensaio 1 (acervo do autor).....	54
Figura 5.2 – Nivelamento do LVDT (acervo do autor).....	54
Figura 5.3 - Coordenadas do objeto de rastreio (acervo do autor).....	55
Figura 5.4 – Imagem da aquisição do alvo durante os ensaios efectuados (acervo do autor). ....	56
Figura 5.5 – Resultado da limiarização do frame (acervo do autor).....	57
Figura 5.6 – Aceleração analítica e seu espectro de frequência. ....	59
Figura 5.7 – Deslocamento analítico e seu espectro de frequência. ....	59
Figura 5.8 – Deslocamento comparado e seu espectro de frequência.....	60
Figura 5.9 – Registro de aceleração com ruídos acrescentados e seu espectro de frequências. ....	61
Figura 5.10 – Filtro Passa Baixo com frequência de corte de 6 Hz. ....	62
Figura 5.11 – Filtro Passa Alto com frequência de corte de 4 Hz. ....	62
Figura 5.12 - Deslocamento com eliminação dos ruídos .....	63
Figura 6.1 – Vídeo utilizado para fazer o rastreio do alvo (acervo do autor).....	65
Figura 6.2 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para $f=0.54\text{Hz}$ . ....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6.3 – Deslocamentos medidos para $f=0.54\text{Hz}$ . .....	67
Figura 6.4 – Resultados MATLAB $f= 0.54\text{ Hz}$ .....	67
Figura 6.5 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para $f=0.76\text{Hz}$ . .....	68
Figura 6.6 – Deslocamentos medidos para $f=0.76\text{Hz}$ .....	68
Figura 6.7 – Resultados MATLAB $f= 0.76\text{ Hz}$ .....	69
Figura 6.8 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para $f=1.09\text{ Hz}$ . .....	70
Figura 6.9 – Deslocamentos medidos para $f=1.09\text{ Hz}$ . .....	70
Figura 6.10 – Resultados MATLAB $f= 1.09\text{ Hz}$ .....	71
Figura 6.11 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para $f=2.18\text{ Hz}$ . .....	72
Figura 6.12 – Deslocamentos medidos para $f=2.18\text{ Hz}$ .....	72
Figura 6.13 – Resultados MATLAB $f= 2.18\text{ Hz}$ .....	73
Figura 6.14 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para frequência alternada. ....	74
Figura 6.15 – Deslocamentos medidos para frequência alternada. ....	75
Figura 6.16 – Deslocamentos medidos para frequência alternada sem o acelerômetro de 5g. ....	75
Figura 6.17 – Resultados MATLAB frequência alternada.....	75
Figura 6.18 – Fotografia da campanha de ensaios e identificação do sistema de eixos associado ao sistema (acervo do autor). .....	77
Figura 6.19 - Rotação torno do eixo z ( <i>yaw</i> ) (autoria própria).....	78
Figura 6.20 - Rotação torno do eixo x ( <i>roll</i> ) (autoria própria). .....	78
Figura 6.21 - A distância focal e o campo de visão (adaptado de Kocic, Makarov e Vujic, 2011). ....	79
Figura 6.22 - Pré – sincronização na decolagem (acervo do autor).....	81
Figura 6.23 – Configuração do ensaio 2 no ISEP (acervo do autor).....	81
Figura 6.24 - Base da torre de telecomunicação do monte da virgem (acervo do autor). ....	82
Figura 6.25 – Configuração do ensaio 2 na base da torre (acervo do autor). .....	83
Figura 6.26 - Realização do ensaio 2 na base da torre (acervo do autor).....	83
Figura 6.27 - Registro da filmagem do alvo.....	84
Figura 6.28 - Registro dos sensores internos de interesse.....	84

Figura 6.29 - Análise visual entre os deslocamentos. ....	85
Figura 6.30 – Análise da ordem de grandeza dos registros. ....	85
Figura 6.31 - Configuração do ensaio (acervo do autor).....	86



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.1 – Quadro resumo do ensaio 1. ....	76
--	----



## ABREVIATURAS

AAN	Autoridade Aeronáutica Nacional
AEV	Autorização Especial De Voo
ANAC	Agência Nacional De Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional De Telecomunicações
BVLOS	<i>Beyond Visual Line Of Sight</i>
CAER	Certificado de Aeronavegabilidade Especial para RPA
CAVE	Certificado de Autorização de Voo Experimental
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo
CNPJ	Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica
CPF	Cadastro de Pessoa Física
CTR	Zonas de Controle
DAM	Desvio Absoluto Médio.
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DOF	<i>Degree Of Freedom</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
Força-g	Força Gravitacional
FPS	<i>Frames Per Second</i>
FPV	<i>First Person View</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>

## ABREVIATURAS

GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LDV	<i>Laser Doppler Vibrometer</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
RTS	<i>Robotic Total Stations</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
SISANT	Sistema de Aeronaves Não Tripuladas
SRPV-SP	Serviço Regional de Proteção Ao Voo de São Paulo
UAS	<i>Unmanned Aerial System</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UPM	Universidade Presbiteriana Mackenzie
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
VLOS	Visual Line Of Sight

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Nações industrializadas e emergentes têm forte investimento no setor das infraestruturas de engenharia civil. O mau funcionamento desse setor reflete em perda econômica e desemprego. Portanto, as infraestruturas de engenharia civil são fundamentais para manter a economia funcionando, enquanto a infraestrutura em si, é um importante ativo a ser gerenciado.

Para gerenciar adequadamente as infraestruturas de engenharia civil, o seu comportamento estrutural, chamado de condições de serviço, deve ser avaliado. Muitas variáveis podem ser monitoradas e usadas para esta avaliação. Espera-se que, com a realização de medições experimentais e o processamento adequado dos seus dados, seja possível uma avaliação mais precisa das suas condições atuais de operacionalidade para que se possa então realizar uma manutenção mais eficiente e otimizada.

As condições físicas atuais de um sistema estrutural, sobretudo a existência de patologias e anomalias, e a sua evolução no tempo, podem condicionar as operações de manutenção. Mensurar parâmetros estruturais, como é o caso dos deslocamentos, as rotações, as deformações, as acelerações, entre outros, oferece o potencial de estimar melhor as suas condições atuais, no entanto, como as estruturas são geralmente constituídas por muitos elementos, a avaliação estrutural pode se tornar cara e não viável (Nagayama, Spencer e Fujino, 2008). A avaliação da condição estrutural, é geralmente definida na literatura como Monitorização da Condição e Integridade Estrutural (SHM- *Structural Health Monitoring*). Uma abordagem no SHM que tem vindo a ser muito utilizada, é a baseada na medição das frequências naturais e modos de vibração. Com base nesta metodologia, os engenheiros ou outros profissionais competentes, podem tomar melhores decisões baseadas nas grandezas medidas e em indicadores de desempenho da condição real dos componentes da estrutura. O conhecimento de deslocamentos em engenharia civil é importante porque são úteis para identificar propriedades dinâmicas estruturais e monitoramento de danos estruturais, entre outras aplicações. A identificação de propriedades estruturais dinâmicas também é usada para calibrar e melhorar os modelos numéricos dessas mesmas estruturas.

Entre as grandezas medidas, a medição da aceleração é promissora na caracterização de movimentos em altas frequências enquanto revela imprecisões na caracterização de movimentos de baixa frequência, caracterizado como inerciais. O deslocamento da estrutura, por outro lado, pode fornecer uma medida

mais exata em frequências mais baixas, no entanto, em muitas situações, a instalação dos transdutores de deslocamentos pode apresentar dificuldades e limita a sua aplicação.

O transformador diferencial variável linear (LVDT- *Linear Variable Differential Transformer*) é um transdutor de deslocamento linear muito usado em aplicações industriais, mas requer um ponto de referência fixo de contato para mensurar o deslocamento de uma estrutura. O vibrômetro *laser doppler* (LDV- *Laser Doppler Vibrometer*) é um instrumento científico que é usado para fazer medições de vibração sem contato de uma superfície, mas seu custo é muito elevado, tornando na generalidade dos casos, inviável a sua aplicação. O sistema americano de posicionamento global (GPS – *Global Positioning System*) é um sistema de navegação por satélite que fornece a um aparelho receptor móvel a posição do mesmo. Já foram estudados sistemas baseados nesta tecnologia para finalidades de monitorização da condição da integridade estrutural, no entanto, o GPS regular não fornece exatidão suficiente para esse fim, enquanto o DGPS (*Differential Global Positioning System*) é uma evolução do GPS, que prevê uma melhoria significativa na precisão da localização, da precisão nominal de 5 à 15 metros obtida com o GPS para cerca de 10 cm nas melhores implementações do DGPS, mas apresenta um custo elevado. Com recurso a acelerômetros também é possível obter o deslocamento, através de uma operação de dupla integração, no entanto esta operação tem um erro significativo na faixa de frequências mais baixas (Rocha *et al.*, 2016).

Mais recentemente, pesquisadores realizaram estudos sobre monitorização da condição e integridade estrutural baseado em filmagens, no entanto, estes métodos exigem câmeras estacionárias ou que estão sujeitas apenas a simples movimento do corpo rígido. Têm o problema de poder ser difícil de implantar em campo com linha de visão adequada, especialmente quando se trata do monitoramento de infraestruturas civis críticas como pontes e torres. Um sistema aéreo não tripulado (UAS - *unmanned aerial system*), popularmente designado por *drone*, pode potencialmente superar a limitação de localização de implantação da câmera (Yoon, Shin e Spencer, 2018).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

É proposto através desse trabalho, analisar a contribuição do uso de *drones* no desenvolvimento de uma ferramenta que possibilite inspecionar deslocamentos dinâmicos estruturais baseado em filmagem de uma câmera acoplada ao *drone* sem um referencial estático de modo a permitir a monitorização da condição e integridade estrutural em locais com limitação à implantação da câmera estacionária.

São estudadas as propriedades, manuseio, legislações e aplicações de *drone* e a aprendizagem do *software* MATLAB para desenvolvimento das ferramentas.

Os deslocamentos relativos à câmera serão mensurados a partir do processamento dos sensores internos do *drone*. A aplicabilidade será feita na torre de telecomunicações Monte da Virgem, na cidade de Gaia, Portugal.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho desenvolvem o objetivo geral definido e enquadrados nos seguintes aspectos:

- a) Analisar as metodologias usadas para a realização de inspeções dinâmicas de estruturas;
- b) Desenvolver uma ferramenta de rastreio de imagem;
- c) Desenvolver uma ferramenta para obter deslocamento a partir do registro de acelerômetro;
- d) Inspeccionar o deslocamento da Torre do Monte da Virgem, contribuindo para a caracterização do seu estado de conservação e validar a metodologia de inspeção inovadora.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 7 (sete) capítulos.

Neste Capítulo 1. é feita uma introdução ao trabalho onde estão expostas as motivações que levaram ao seu desenvolvimento, assim como o objetivo a ser alcançado.

No Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos para o entendimento da monitorização da integridade estrutural, que é caracterizado nesse trabalho pela medição dos deslocamentos estruturais com uso de sensores de contato e sem contato. Apresenta-se também uma abordagem sobre processamento de imagens e de sinais, e de demanda por *drones*.

No Capítulo 3 é realizada uma apresentação da metodologia de investigação, relacionada com o desenvolvimento do projeto para o entendimento da modelagem desenvolvida e um estudo recente referente a torre de telecomunicações Monte da Virgem, que será a estrutura para aplicabilidade da metodologia.

No Capítulo 4 é constituído pela descrição da instrumentação que será utilizada explicando sua operacionalidade e afim, para que o trabalho se concretize.

O Capítulo 5 apresenta as ferramentas desenvolvidas através de algoritmos genéricos, no sistema de aquisição para o processamento de imagem e de sinal.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados referentes ao sistema de aquisição e os ensaios realizados para validação.

Por fim, o Capítulo 7 expõe as conclusões e a discussão de propostas de trabalhos futuros a esta pesquisa.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As técnicas aplicadas para a medição de deslocamentos de pontes ou viadutos são as mesmas a aplicar para se conhecerem os deslocamentos de torres de telecomunicações de elevada altura. Existe uma vasta literatura sobre esta temática que seguidamente se detalha.

#### 2.1 MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTO ESTRUTURAL COM SENSORES DE CONTATO

Estes sensores abrangem desde sensores de contato tradicionais como LVDT, a sensores inteligentes modernos que usam comunicação sem fio e aquisição de dados baseada em microcontroladores.

A aquisição de dados no campo é complexa porque a medição de deslocamentos requer, geralmente, um ponto fixo. Essa abordagem de fisicamente montar o sensor leva tempo, e em muitas situações, é muito desafiador para pontes ou viadutos com grandes vãos, ou localizadas sobre um curso de água ou um desfiladeiro profundo. A Figura 2.1 mostra uma tentativa de medir o deslocamento de uma ponte usando um LVDT (Moreu *et al.*, 2016).

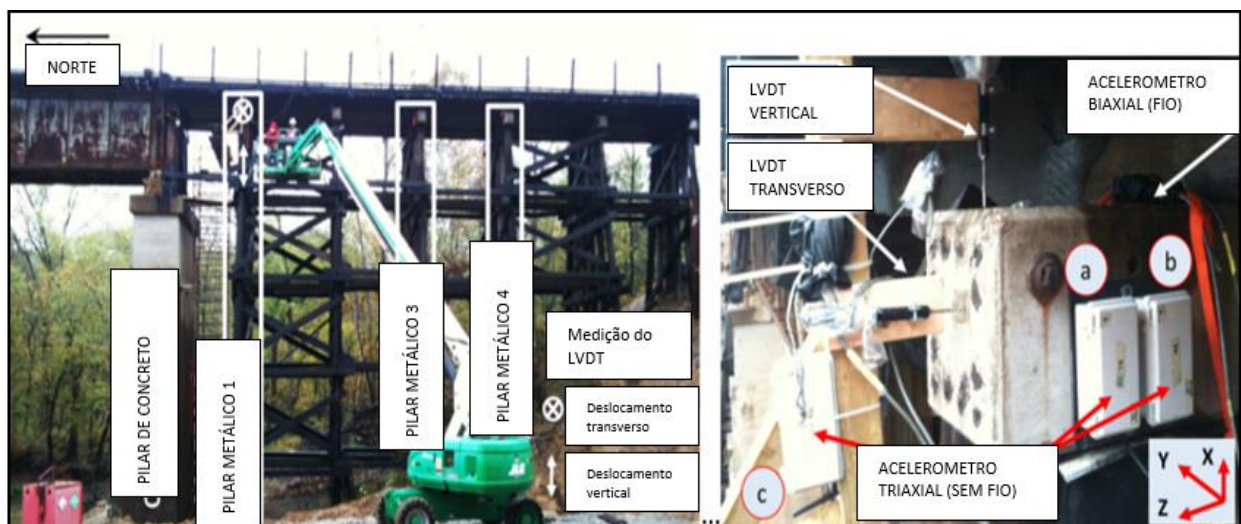


Figura 2.1 – Medição de deslocamentos de uma ponte usando LVDT (Adaptado de Moreu *et al.*, 2016)

Alternativamente ao LVDT, os pesquisadores têm utilizado acelerômetros como sensores de contato para coletar os deslocamentos de pontes (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018). Embora instalar um acelerômetro seja mais fácil comparado a um LVDT, ele ainda requer instalação física do sensor, que nem sempre é possível e envolve preocupações com a segurança dos operários. Além disso, com o uso de acelerômetros é necessário integrar duplamente as leituras de aceleração de modo a obter o deslocamento, e existe portanto um erro porventura significativo associado a este procedimento (Rocha *et al.*, 2016).

Um procedimento eficiente, preciso e confiável para avaliação de deslocamentos verticais em pontes foi realizado na ponte Juarez no México (Vazquez B. *et al.*, 2017). A Figura 2.2 mostra o monitoramento dos deslocamentos da ponte rodoviária usando um sistema GPS. No entanto, esta configuração ainda precisa de instalação no campo que nem sempre é viável.



Figura 2.2 - GPS para medição de deslocamento em pontes (Vazquez B. *et al.*, 2017).

## 2.2 MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTO ESTRUTURAL COM SENSORES SEM CONTATO

Para superar as desvantagens dos sensores de contato, foi estudada a viabilidade de sensores sem contato para medir deslocamentos em pontes. Psimoulis e Stiros (2007) propuseram o uso de uma estação robotizada total (RTS- *robotic total stations*) baseada em tecnologia laser para medição dos deslocamentos em pontes ferroviárias sob ação do tráfego. O RTS monitora o deslocamento identificando e rastreando de forma autônoma o alvo fixo à estrutura (Figura 6.23).



Figura 2.3 - Estação total robótica (RTS) para medição de deslocamentos (Adaptado de Psimoulis e Stiros, 2007).

A principal conclusão deste estudo foi que o RTS não é útil apenas para medições estáticas, mas também para medições dinâmicas. A qualidade dos resultados é alta para baixas frequências de oscilações, sendo que a precisão e a possibilidade de coleta de dados das oscilações dependem da velocidade máxima do movimento do alvo. No entanto, esse sistema requer boas condições atmosféricas e visibilidade entre RTS e o alvo para fornecer uma medição precisa. Além disso, requer que seja configurado perto do alvo, o que nem sempre é possível.

LIDAR (*light detection and ranging*) também conhecido por TLS (*terrestrial laser scanning*), é uma tecnologia óptica de detecção remota que permite medir o deslocamento 3D de qualquer ponto específico de uma estrutura. A distância a um objeto é determinada medindo a diferença de tempo entre a emissão de um impulso laser e a detecção do sinal refletido, de forma semelhante à tecnologia de um radar, que utiliza ondas de rádio. O sistema LIDAR baseado em UAS foi pesquisado como um sensor de baixo custo para gerenciamento de infraestrutura (Park *et al.*, 2007).

Os sistemas LIDAR aerotransportados têm sido usados na detecção de algumas atividades como mapeamento de deslizamentos de terras (Figura 2.4) e avaliação de danos (Liu *et al.*, 2011), mas esses deslocamentos não são instantâneos, geralmente levam anos ou décadas para ocorrer, assim, vários voos espaçados no tempo podem ajudar na detecção de alterações.

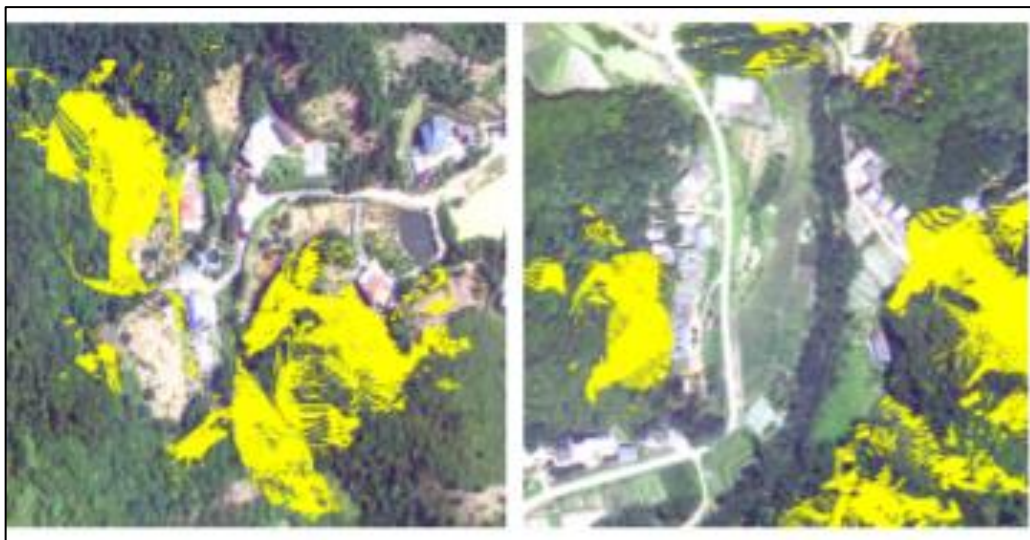


Figura 2.4 - Mapa com áreas sujeitas a deslizamentos de terras (Liu *et al.*, 2011).

O LDV mede a vibração de um alvo usando mudanças na frequência de um sinal emitido devido ao efeito Doppler, fenômeno pelo qual, um observador percebe frequências diferentes das emitidas por uma fonte e acontece devido à velocidade relativa entre o a onda sonora e o movimento relativo entre o observador e/ou a fonte. Os pesquisadores também têm usado o LDV como um sensor sem contato para medir deslocamentos de pontes (Nassif, Gindy e Davis, 2005). Neste estudo, o deslocamento medido foi validado com a medição realizada por intermédio de um LDVT fixado à estrutura (Figura 2.5). O dispositivo LDV precisa de ser colocado em uma superfície rígida perto do alvo, no entanto, a distância de operação é geralmente longa. Os dados obtidos pelo LDV não dependem da visibilidade e das condições atmosféricas, e a saída de um LDV é em tempo real, exigindo um pós-processamento mínimo. Apesar destas vantagens que tornam o uso de um LDV bastante eficiente no caso da medição de deslocamentos de uma ponte, ele ainda requer uma superfície próxima, além de ter um custo elevado.

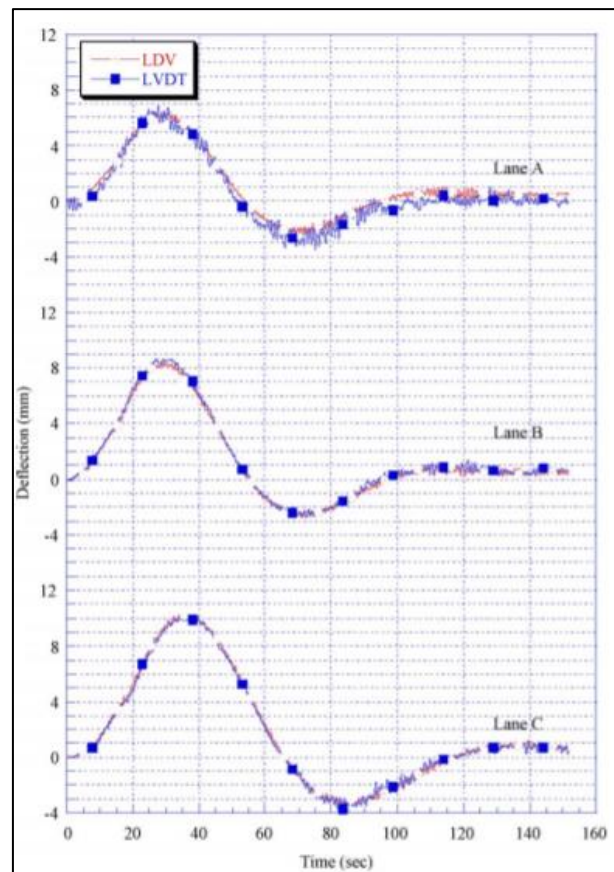


Figura 2.5 - Estudo comparativo de deslocamento LDV vs LDVT (Nassif, Gindy e Davis, 2005).

### 2.3 RASTREAMENTO POR PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Ribeiro *et al.* (2014) estudou uma metodologia de medição de deslocamento dinâmico sem contato para pontes ferroviárias baseadas na tecnologia de vídeo.

O sistema é composto por uma câmera de vídeo de alta velocidade, lente óptica, lâmpadas de iluminação e um alvo de precisão, podendo realizar medições com taxas de aquisição de até 500 fps. Articulado com outros sistemas de medição, promove sua integração nos sistemas de monitoramento da integridade estrutural (SHM).

Ensaio preliminares do sistema mostraram que a precisão das medições pode ser afetada por:

- (i) movimentos do suporte da câmera. Assim, devem ser utilizados suportes rígidos e a câmera deve estar protegida dos fluxos de ar;
- (ii) A distorção do campo de visão, causado pelo fluxo de ondas de calor geradas pela iluminação incandescente por infravermelho. Portanto, o tempo de operação das lâmpadas deve ser limitado.

O sistema foi usado para medir o deslocamento do tabuleiro de uma ponte ferroviária, induzida pela passagem de trens a velocidades entre 120 km/h e 180 km/h, produzindo uma concordância muito boa

entre os resultados da medição de deslocamento obtido com o sistema de vídeo e com um LVDT (Figura 2.6). A precisão alcançada foi abaixo de 0.1 mm para distâncias da câmera até o alvo até 15 m e na ordem de 0.25 mm por uma distância de 25 m. A aplicação da técnica do processamento de imagem foi no nível de subpixels.



Figura 2.6 – Alvo e LVDT colocado no convés de uma ponte ferroviária (Ribeiro *et al.*, 2014)

Fernandes (2015) apresentou um algoritmo em tempo real para rastreamento de objetos em visão computacional, usando o Filtro de Kalman como mecanismo de previsão para situações de oclusão e ou contaminação da cena por ruído. O principal objetivo do seu trabalho foi de apresentar o desenvolvimento de um algoritmo de rastreamento de objetos baseado em cor (Figura 2.7). É apresentada, a implementação da etapa de segmentação da imagem, a estratégia para tratar situações com dois objetos da mesma cor e o uso do Filtro de Kalman.

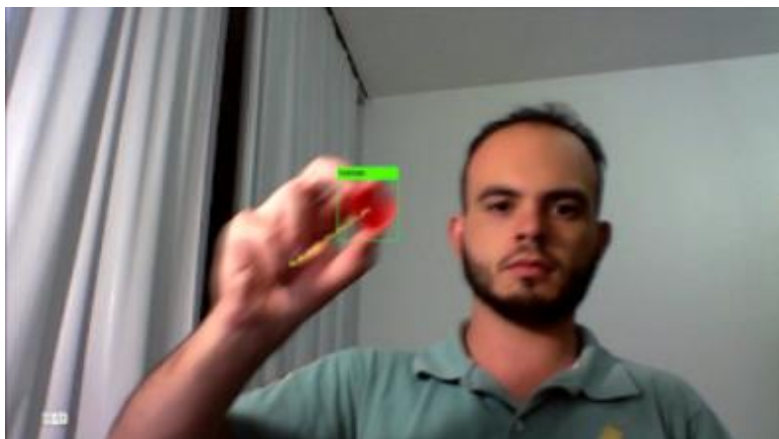


Figura 2.7 – Rastreamento de objeto baseado em cor (Fernandes, 2015).

## 2.4 AQUISIÇÃO DE DESLOCAMENTOS A PARTIR DE REGISTRO DE ACELERÔMETROS

O acelerômetro é o transdutor mais utilizado para medir vibrações, porque tem capacidade de registrar dados de alta frequência e alta sensibilidade. Em ocasiões especiais, é aconselhável integrar a aceleração para obter deslocamento, ao invés de utilizar transdutores de deslocamento devido sua instalação, reduzindo custos e causando a mínima interferência dinâmica do sistema original. Como é sabido, é possível obter deslocamento de sinais de aceleração usando dupla integração no tempo. No entanto, a integração direta nos dados de aceleração causará variações irreais nos sinais de velocidade e deslocamento (Rocha *et al.*, 2016).

Para que seja possível reconstituir o sinal original é necessário que a frequência de amostragem, isso é, a aquisição de dados por segundo, seja no mínimo, igual ao dobro da frequência máxima contida no sinal analógico, é o que diz o teorema da amostragem. A frequência de amostragem mínima chama-se frequência de *Nyquist*.

Os dados de aceleração devem ser processados (filtros e correção de tendências) para obter o deslocamento. Sem o processamento, os dados obtidos pela dupla integração são irreais, isso ocorre porque os dados de aceleração possuem ruídos e erros que causam distorções que podem ser amplificadas durante a integração.

Para uma aceleração conhecida  $a(t)$ , a velocidade  $v(t)$  e o deslocamento  $s(t)$  podem ser escritos como:

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t) dt \quad (2.1)$$

$$s(t) = s_0 + v_0 t + \int_0^t \int_0^t a(t) dt dt \quad (2.2)$$

Onde:

$v_0$  — é a velocidade inicial;

$s_0$  — é o deslocamento inicial;

Como apresentado nas Equações (2.1) e (2.2), a velocidade e o deslocamento inicial devem ser conhecidos para estimar o deslocamento a partir da dupla integração dos dados do acelerômetro. Se as condições iniciais fossem conhecidas seria possível fazer a integração direta, como não são, ocorrerá um erro de integração. Além disso, o ruído é outra razão para causar erros. A presença de ruído durante as medições é considerada uma das principais fontes de erros durante os procedimentos de integração (Yang, Zhao e Kang, 2016). Após a integração, os componentes de baixa frequência são fortemente amplificados e as altas frequências são reduzidas (Figura 2.8).

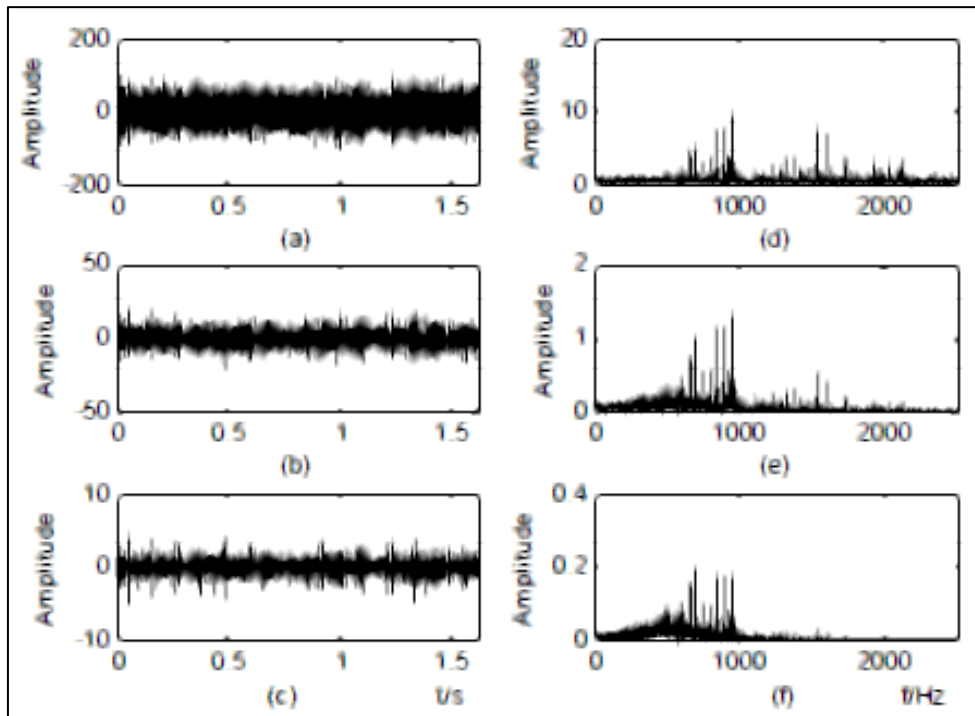


Figura 2.8 – Integrações: a) aceleração; b) velocidade; c) deslocamento; d); e); e f) respectivos espectros (Yang, Zhao e Kang, 2016).

Para ter uma análise das frequências que compõem o sinal, calcula-se o espectro de frequências, ou Transformada de Fourier (FFT), um algoritmo eficiente que converte um sinal do seu domínio original para uma representação no domínio da frequência e vice-versa (Figura 2.9).

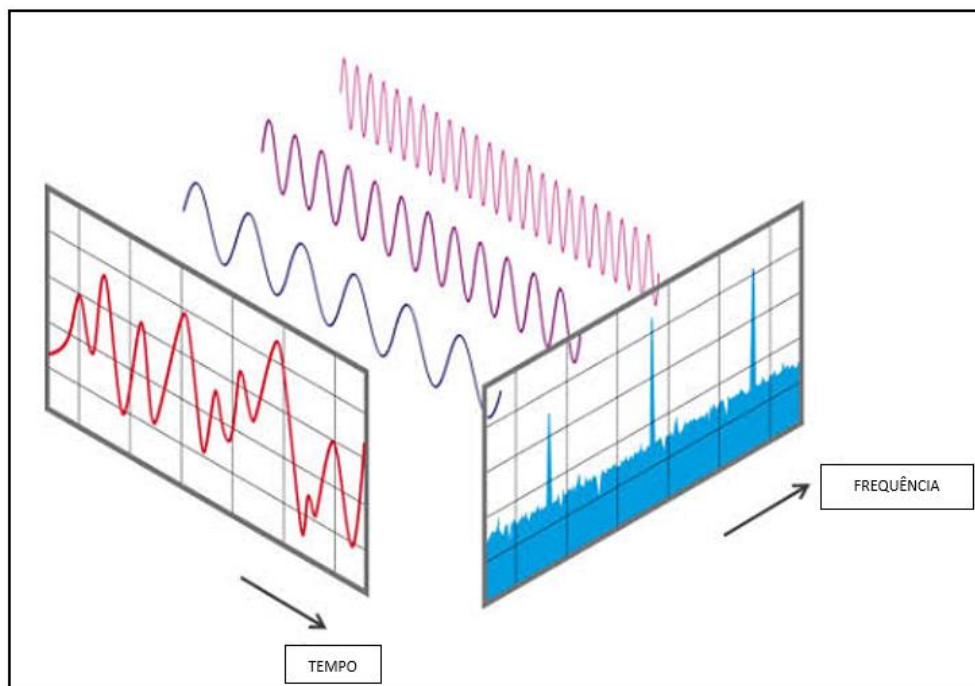


Figura 2.9 - Análise de Fourier (Adaptado de nti-audio, 2019)

Para remover as componentes de baixa ou alta frequência são utilizados filtros. Os filtros são sistemas lineares invariantes no tempo, capazes de modificar as características dos dados de entrada, de modo que apenas uma parte específica do componente de frequência do sinal chegue à saída do filtro. Esses filtros podem ser analógicos ou digitais (Rocha *et al.*, 2016).

Filtros analógicos são classificados de acordo com sua atuação no domínio da frequência: *Low-Pass* (Passa-Baixo), *High-Pass* (Passa-Alto), *Band-Pass* (Passa-Banda) e *Band-Stop* (Para-Banda). Para que sejam utilizados é preciso definir a frequência de corte, indicado como  $\omega_c$  ou intervalo de frequências ( $\omega_1$  e  $\omega_2$ ) na Figura 2.10.

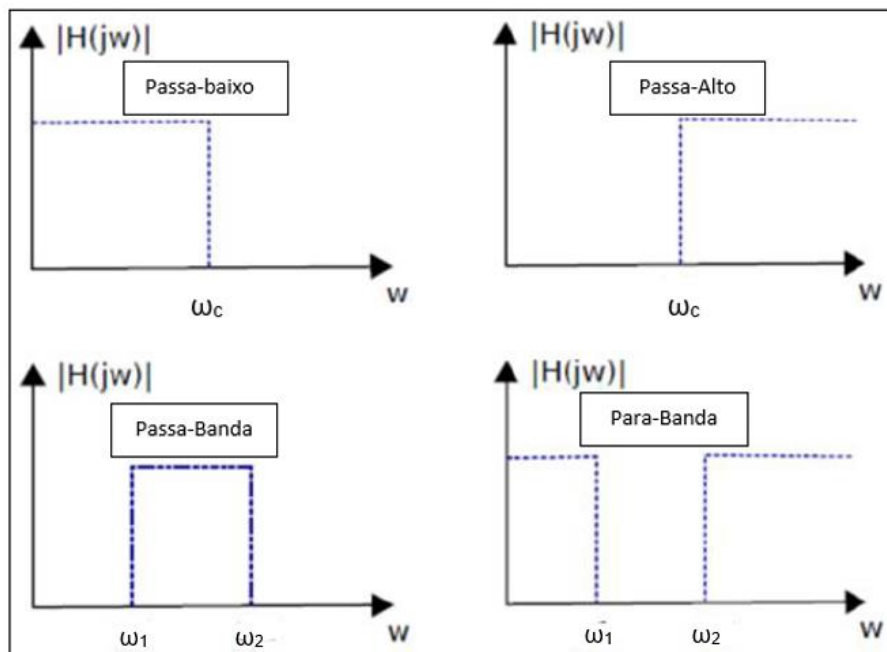


Figura 2.10 – Ideias respostas para os 4 tipos de filtros analógicos (adaptado de Rocha *et al.*, 2016).

O filtro digital é a implementação de um algoritmo matemático em *hardware* ou *software* que opera no sinal aplicado à sua entrada para gerar uma versão filtrada de saída, atua utilizando um conversor analógico-digital (ADC). Digitaliza-se o sinal a filtrar, em seguida este é processado por algum tipo de processador, onde está programado o filtro digital. Para se obter de novo um sinal analógico já filtrado, coloca-se um conversor digital-analógico (DAC).

A metodologia proposta por Rocha *et al.* (2016), faz uso de truncamento nas extremidades do registro de sinal antes e depois das integrações para diminuir distorções, junto com o filtro Passa-Alto para remover as baixas frequências que possuem seu sinal amplificado em cada integração. O filtro Passa-Baixo é aplicado inicialmente para remover os ruídos de alta frequência (Figura 2.11).

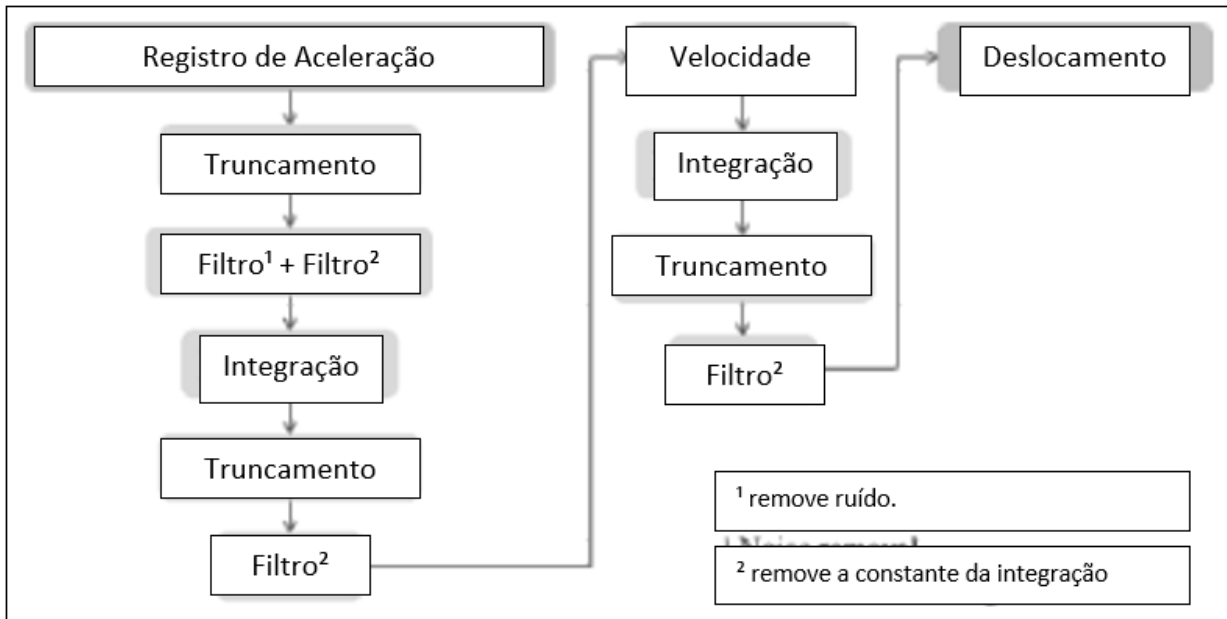


Figura 2.11 - Fluxograma de integração proposto e adaptado de Rocha *et al.* (2016)

Para validação da metodologia, Rocha *et al.* (2016) realizaram o ensaio de uma viga em consola (Figura 2.12), com acelerômetros em suas extremidades (A1 e A2) e um extensômetro próximo a base (5G).

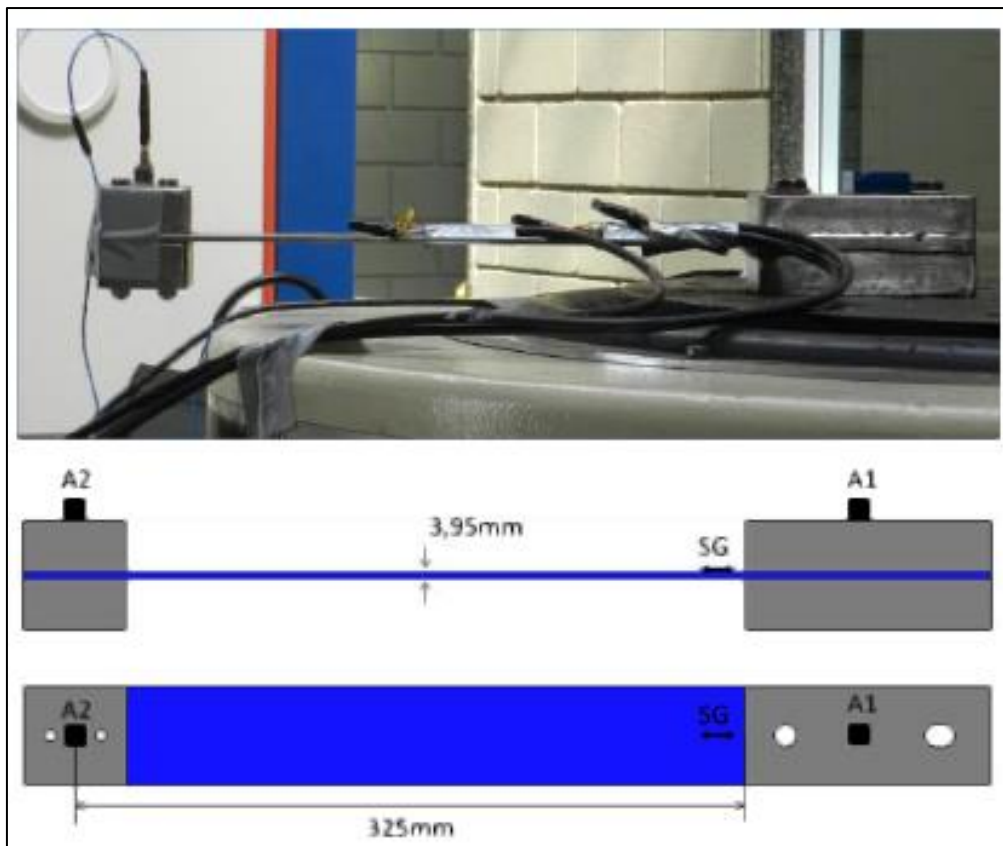


Figura 2.12 - Configuração do ensaio de vibração de uma viga em consola (Rocha *et al.*, 2016).

Dos dados registrados pelos acelerômetros, é feita uma análise no domínio da frequência usando FFT e foi constatado que a frequência natural da viga é 10.8 Hz (Figura 2.13), com os filtros foi feito o isolamento dessa frequência de interesse com a metodologia desenvolvida.

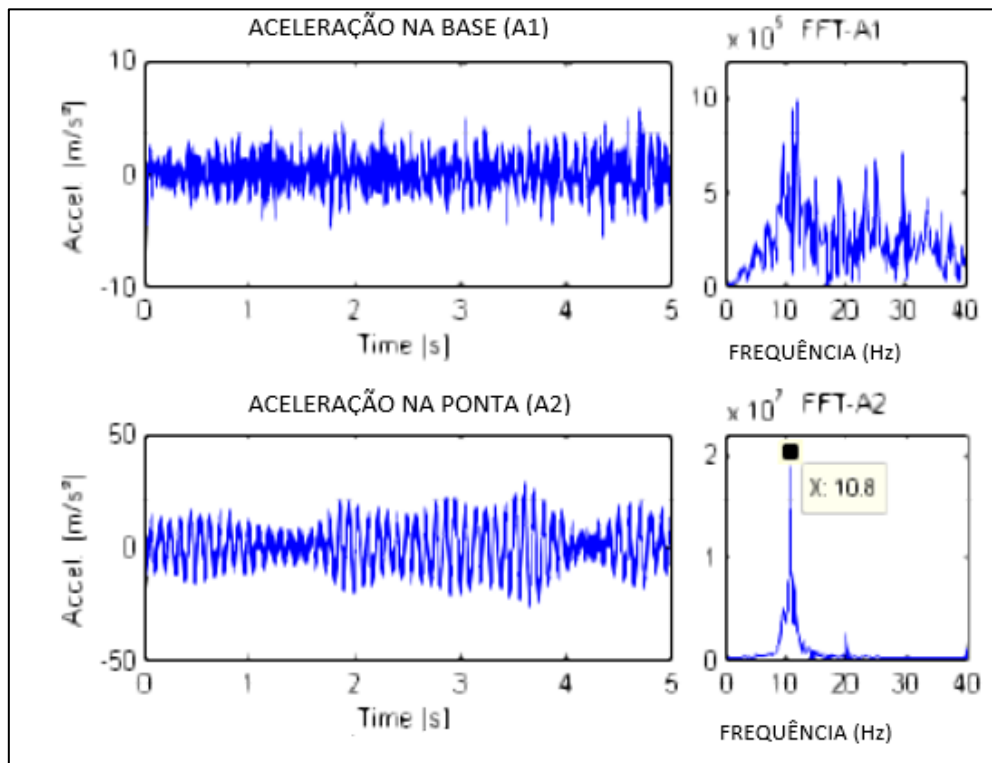


Figura 2.13 - Registro da aceleração e seus respectivos espectros (Adaptado de Rocha *et al.*, 2016).

Para validação Rocha *et al.* (2016), converteram o deslocamento resultado da integração para tensão e compararam com o registro das tensões obtidas do extensômetro (Figura 2.14). Desconsiderando os trechos das extremidades o erro percentual absoluto médio entre os picos foi de aproximadamente 5.3%.

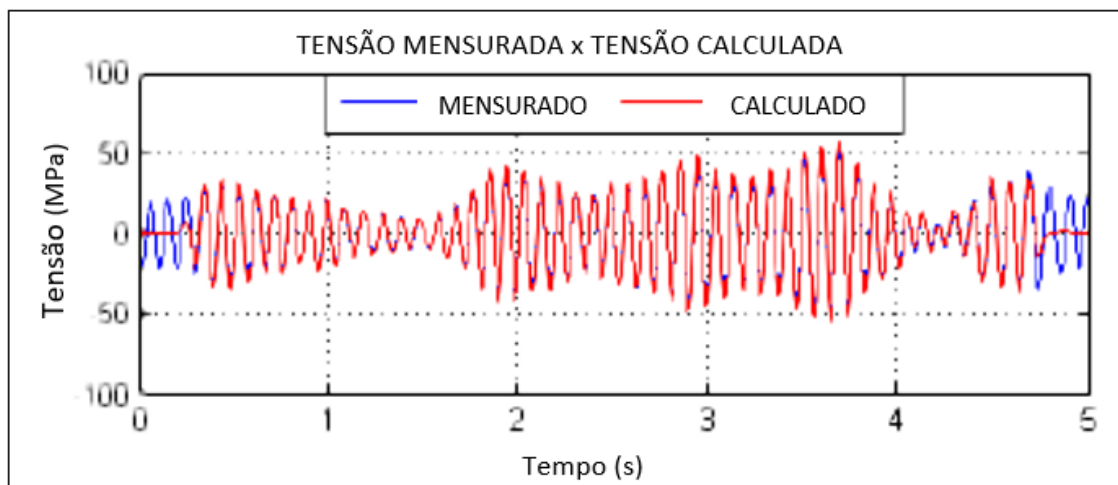


Figura 2.14 – Comparação entre a tensão calculada e a mensurada (Adaptado de Rocha *et al.*, 2016).

O procedimento indicou ótimos resultados, embora os parâmetros utilizados para definir os filtros devam ser cuidadosamente aferidos de forma a eliminar os ruídos e as tendências sem remover as faixas de frequência relevantes para o sinal avaliado. A distorção nas extremidades é inevitável, o truncamento do sinal pode reduzir o comprimento da parte afetada, embora não elimine completamente o erro. Portanto, para resolver esse problema completamente, é recomendável que o sinal medido possua uma parte inicial e final que possa ser removida após o cálculo do deslocamento (Rocha *et al.*, 2016).

Arias-Lara e De-la-Colina (2018), procuraram avaliar metodologias para estimar o deslocamento a partir de dados de aceleração. O principal objetivo do trabalho foi identificar os métodos que levam às melhores estimativas de deslocamentos para diferentes tipos de excitação de diferentes fontes. Em todos os casos, no entanto, apenas excitações com frequências típicas de estruturas de engenharia foram estudadas.

As metodologias de integração de sinais propostas pelos seguintes autores foram estudadas por Arias-Lara e De-la-Colina (2018): Lee e Trifunac (1990); Brady e Converse (1992); Chiu (1997); Boore, Stephens e Joyner (2002); Darragh, Silva e Gregor, (2004); Park *et al.* (2005) e Wang *et al.* (2011).

Para o cálculo dos deslocamentos, os dados de aceleração foram obtidos a partir de quatro tipos de ensaios dinâmicos (veículos em pontes, peões em pontes, vibrações quase harmônicas e mesa oscilante) e de um sismo, o registro do terremoto de Tohoku, Japão, em 2011. Os deslocamentos obtidos em estações GPS forneceram as informações dos deslocamentos correspondentes para este terremoto.

As figuras Figura 2.15 à Figura 2.19 apresentam os resultados dos ensaios comparando o deslocamento calculado com o mensurado em centímetros, com o tempo em segundos do: deslocamento sísmico, veículos em pontes, peões em pontes, mesa oscilante e vibrações quase harmônicas, respectivamente.

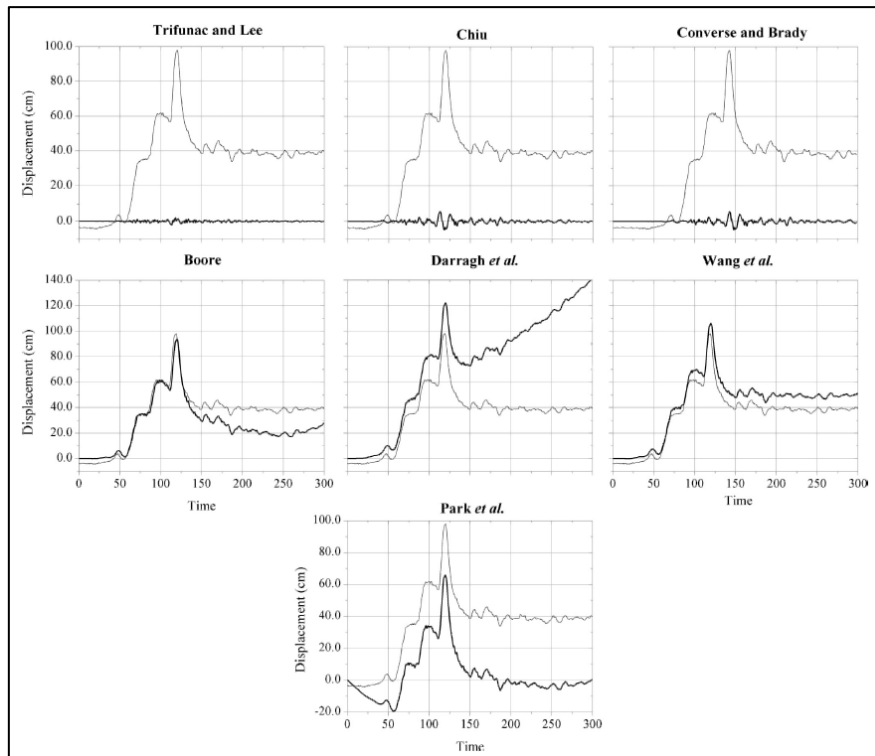


Figura 2.15 - Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) dos deslocamento para terremoto de Tohoku, Japão (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).

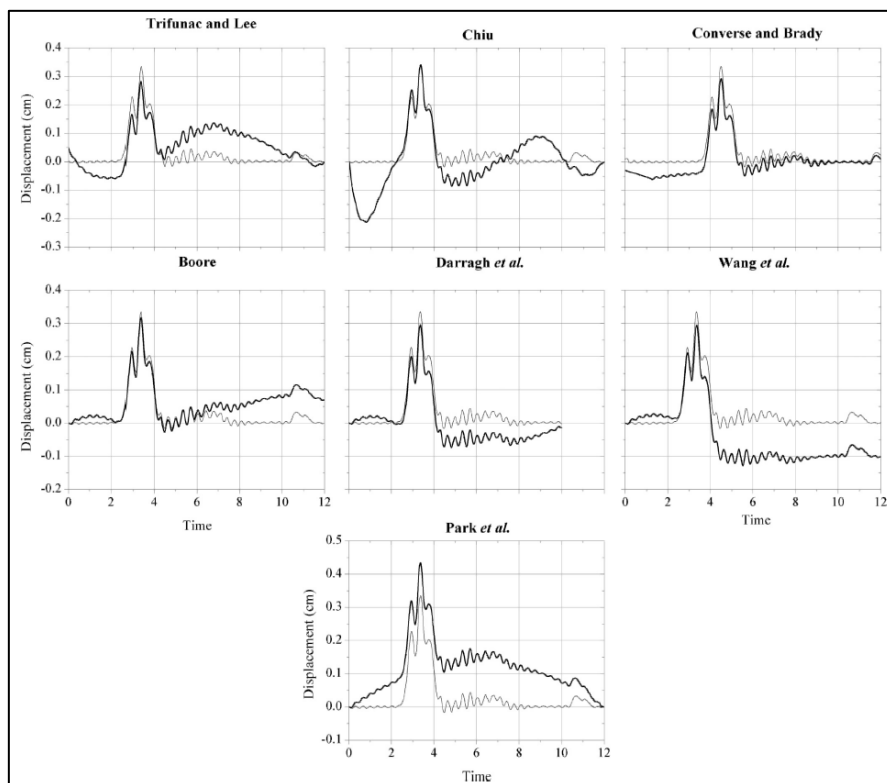


Figura 2.16 - Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) dos deslocamento no ensaio da ponte veicular (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).

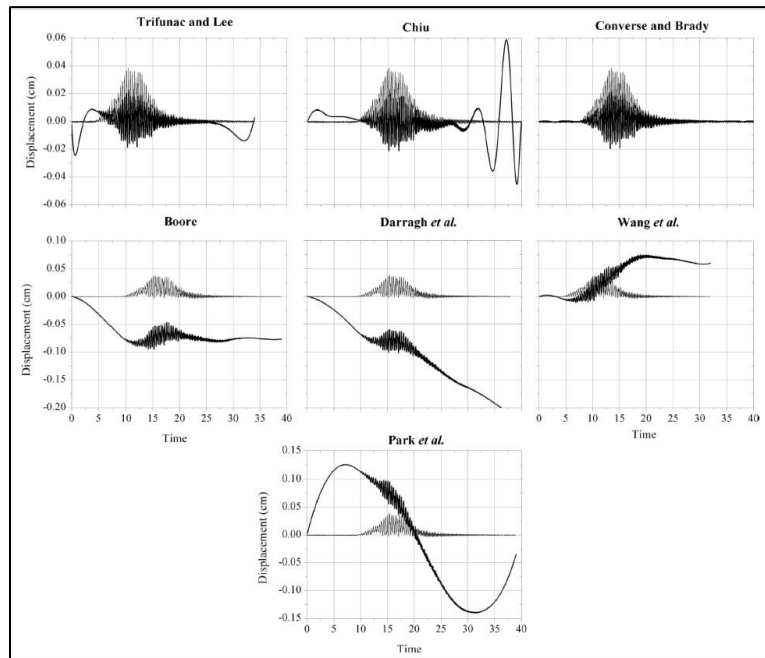


Figura 2.17 - Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) deslocamento no ensaio da ,  
peões em pontes (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).

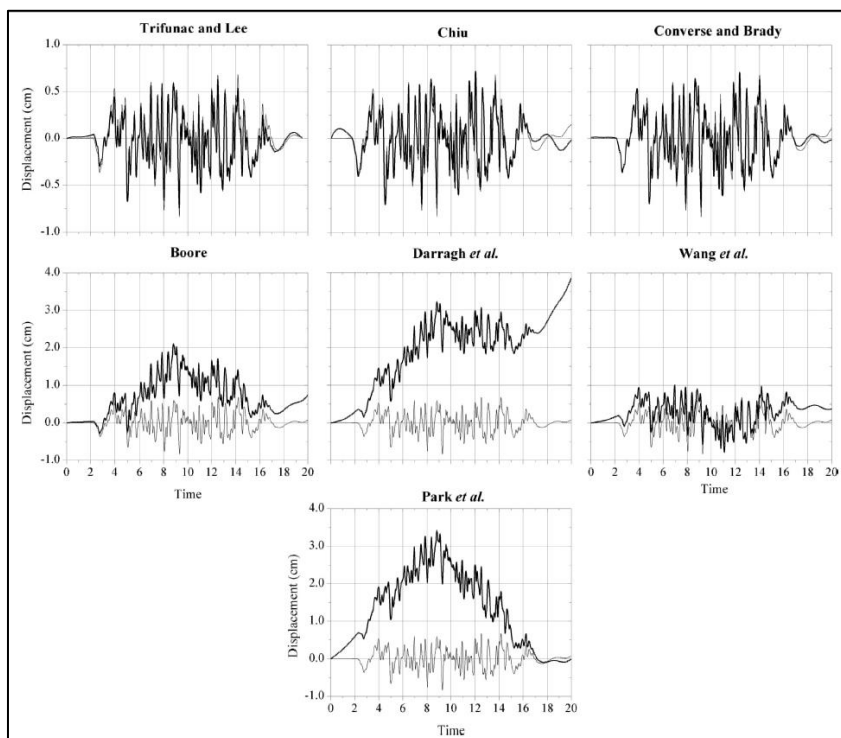


Figura 2.18 -- Comparação do mensurado (cinza) com o calculado (preto) deslocamento no ensaio da  
mesa oscilante (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).

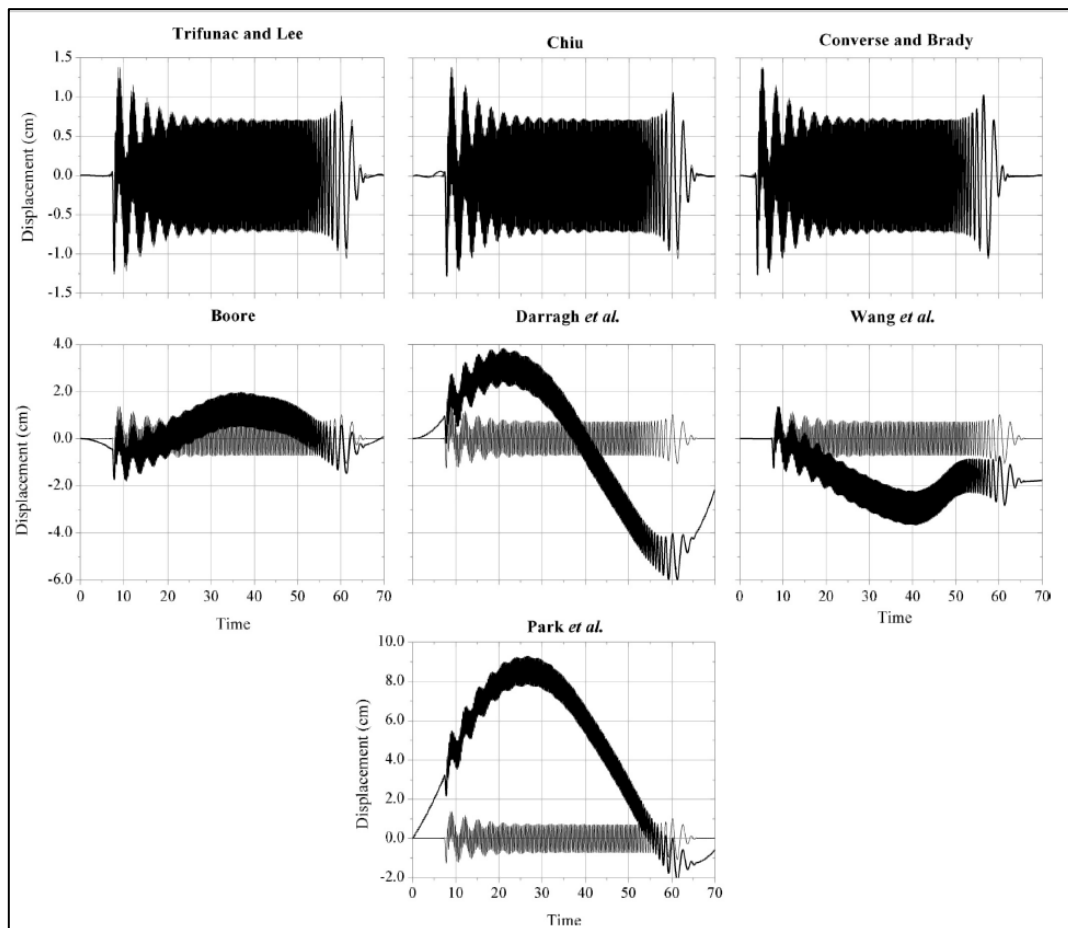


Figura 2.19 - Comparação do medido (cinza) com o calculado (preto) deslocamento no ensaio e vibrações quase harmônicas (Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).

*Root Mean Square Error* (RMSE) é a medida de erro mais comumente usada para aferir a qualidade do ajuste de um modelo, e é a raiz do erro médio quadrático da diferença entre o medido e o valor calculado, quanto mais próximo de zero, menor o erro. O coeficiente de correlação de concordância (CCC) mede a concordância entre duas variáveis, para avaliar a confiabilidade entre os valores medidos e calculados. A concordância será tanto melhor quanto o coeficiente CCC se aproximar da unidade (Figura 2.20).

Método	Parâmetro	Vibrações quase harmônicas	Mesa Sísmica	Ponde Pedestre	Ponde Veicular	terremoto de Tohoku
Trifunac and Lee	RSME	0.047	0.056	0.009	0.061	40.293
	CCC	<b>1.00</b>	<b>0.98</b>	<b>0.48</b>	0.64	0.09
Chiu	RSME	0.045	0.070	0.018	0.077	40.393
	CCC	<b>1.00</b>	<b>0.96</b>	-0.16	0.74	-0.11
Converse and Brady	RSME	0.037	0.041	0.004	0.030	38.861
	CCC	<b>1.00</b>	<b>0.96</b>	<b>0.54</b>	<b>0.96</b>	0.06
Boore et al.	RSME	0.695	0.814	0.073	0.045	11.835
	CCC	0.81	0.46	-0.07	0.85	<b>0.92</b>
Darragh et al.	RSME	2.933	2.151	0.122	0.045	49.854
	CCC	0.18	0.25	0.17	<b>0.92</b>	0.76
Wang et al.	RSME	1.843	0.339	0.048	0.090	8.872
	CCC	0.47	0.75	-0.24	0.82	<b>0.99</b>
Park et al.	RSME	5.233	1.611	0.096	0.096	33.290
	CCC	0.14	0.24	<b>0.31</b>	<b>0.88</b>	<b>0.82</b>

Figura 2.20 – Valores da RMSE e da CCC de cada metodologia para cada ensaio (Adaptado de Arias-Lara e De-la-Colina, 2018).

Sete metodologias para calcular deslocamentos a partir de registros de aceleração foram estudados por Arias-Lara e De-la-Colina (2018). Cada método foi avaliado com cinco tipos de ensaios. As conclusões do estudo demonstraram que métodos que usam filtros *High-Pass* para ajuste das tendências levam a deslocamentos finais quase nulos, os métodos de Lee e Trifunac (1990), Brady e Converse (1992), e de Chiu (1997) usam esse tipo de ajuste. Portanto, são úteis nos casos em que os deslocamentos finais estão perto de zero e com um registro de ampla frequência. Para registros em que são esperados deslocamentos permanentes diferentes de zero (como no caso de estruturas com comportamento não linear), outro tipo de ajuste de tendências é desejável. Os métodos de Boore, Stephens e Joyner (2002) e Wang *et al.* (2011) são recomendados para este tipo de registros. Sabendo que o método de Wang *et al.* (2011) requer um procedimento iterativo, o método de Boore, Stephens e Joyner (2002) parece ser uma melhor opção. Além disso, o método de Boore *et al.* (2002) leva às melhores estimativas de deslocamentos de pico para os ensaios estudados. No caso de deslocamentos muito pequenos (0.5 mm), os métodos não levam a estimativas aceitáveis de deslocamentos. Neste ensaio, as melhores aproximações (em termos de CCC, RSME) foram obtidos com os métodos de Brady e Converse (1992) e Lee e Trifunac (1990).

É conveniente realizar um procedimento anterior, de análise estrutural dinâmica simples, para determinar a magnitude dos deslocamentos esperados e selecionar o método mais apropriado para os estimar.

## 2.5 MONITORAMENTO COM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS)

A aplicação de VANTS, veículos aéreos não tripulados (ou UAV- *unmanned aerial vehicle*, na literatura inglesa), comumente conhecidos como *drones*. Segundo a empresa de *software DroneDeploy* (2018), que desenvolve ferramentas direcionadas para automatização de voos e processamento de dados, houve um aumento de cinco vezes no crescimento de clientes corporativos desde 2016 (Figura 2.21). A adoção de *drones* em grandes empresas cresce a um ritmo de 20% a cada mês. O crescimento das equipes de *drones* se traduziu em implantações maiores de *drones* nas empresas, à medida que os UAVs se tornam a ferramenta essencial para a coleta de dados aéreos. Espera-se que mais de 600.000 *drones* sejam registrados até 2022.

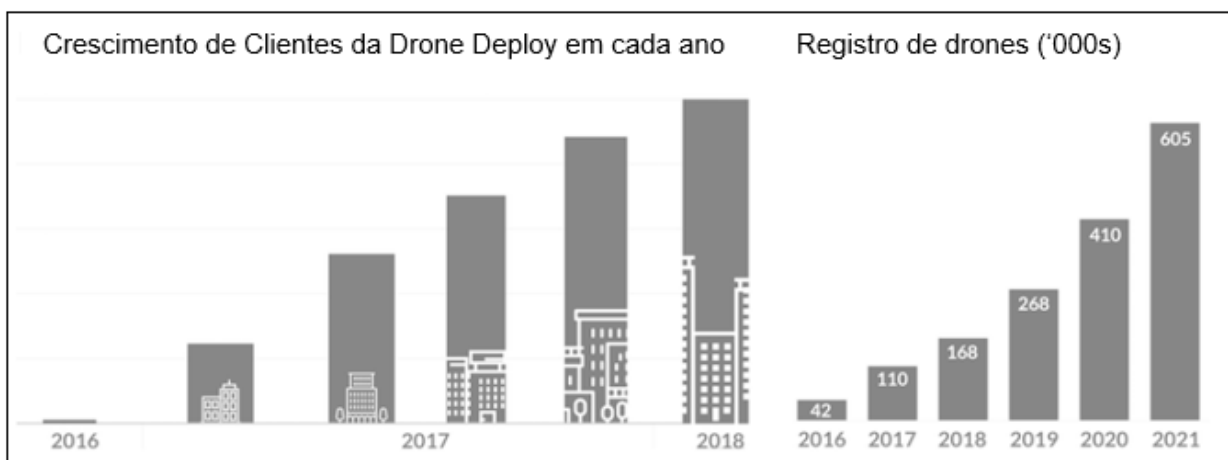


Figura 2.21- Base de clientes empresariais da *DroneDeploy* desde 2016 (Adaptado de *DroneDeploy*, 2018).

Dentre os setores onde há a implantação de *drones* (Figura 2.22), o setor da construção é o setor que mais cresce, subindo 239% no ano de 2017 e agora é o principal setor usando o software da *DroneDeploy*, segundo a empresa (*DroneDeploy*, 2018). As construtoras implantam *drones* em locais de trabalho em todo o mundo para aumentar a segurança, documentar e entender o progresso do local e identificar possíveis problemas antes que se tornem prejuízos ao negócio.

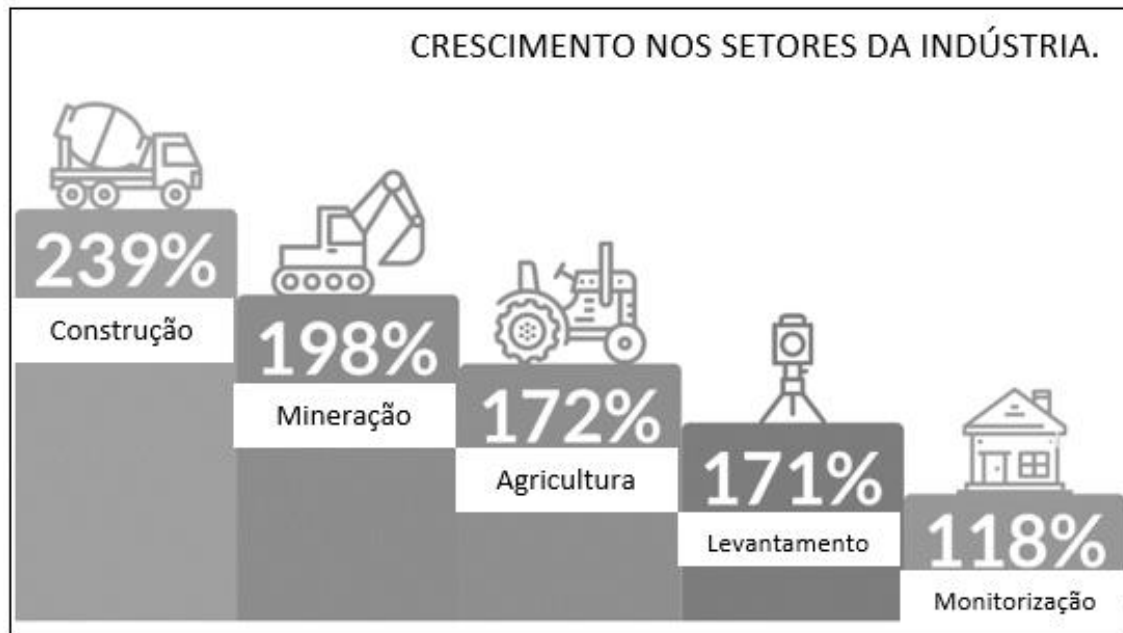


Figura 2.22- Crescimento no ano de 2017 nos setores da indústria (Adaptado de DroneDeploy, 2018).

Os rápidos avanços nas tecnologias de sensoriamento, bateria e aeronáutica, juntamente com os métodos de navegação autônomos e câmeras digitais de baixo custo ajudaram a tornar os UAVs mais acessíveis, confiáveis e fáceis de operar (Liu *et al.*, 2014).

Grande número de empresas de arquitetura, engenharia, construção e *facility management* usam essas plataformas para monitorar visualmente a construção e operação de edifícios, pontes e outros tipos de infraestruturas civis, capturando imagens e vídeos, juntamente com métodos que processam os dados visuais em modelos 3D. Essas plataformas monitorizam o trabalho em andamento, criam documentos para a segurança e inspecionam estruturas existentes, particularmente as localizadas em áreas de difícil alcance (Mascareñas *et al.*, 2008; Ellenberg *et al.*, 2015; Ham *et al.*, 2016).

O valor líquido de mercado da implantação de UAV em apoio às aplicações de inspeção e construção de infraestruturas representa 45% do mercado total de UAV. Existe um interesse crescente em UAV no monitoramento de grandes projetos de construção e linhas de energia, gasodutos e na inspeção da infraestrutura de torres GSM (Shakhatreh *et al.*, 2019).

Em aplicações na inspeção de construções de infraestrutura, os UAVs podem ser usados para monitoramento em tempo real de projetos. Portanto, os gestores de projeto podem monitorar um conjunto de obras usando UAVs assegurando uma melhor visibilidade sobre o progresso do projeto sem qualquer necessidade de acessar no terreno (Liu *et al.*, 2014). Além disso, os UAV também podem ser utilizados para a inspeção de linhas de transmissão de alta tensão de energia. Segundo Luque-Vega *et al.* (2014) foram usados UAVs para realizar uma navegação autônoma para a inspeção de linhas de energia. O *drone* foi implantado para detectar, inspecionar e diagnosticar os defeitos da infraestrutura na linha de

energia. Segundo Larrauri, Sorrosal e Gonzalez (2013), foi projetado e implementado um sistema automatizado baseado em UAV para inspeção na linha de alimentação em tempo real (Figura 2.23), especificamente, várias imagens e dados dos UAV foram processados, bem como o cálculo da distância entre árvores, edifícios e linhas de energia. Os UAV também podem ser usados para monitorar as instalações de infraestruturas de dutos de gás, petróleo, além de canalizações de água. Idachaba et al. (2016) propuseram a implantação de pequenos UAV equipados com um controlador capaz de detectar o conteúdo de ar e gás no interior de um duto. O sistema possibilitou a detecção remota de vazamentos de fluidos em oleodutos e gasodutos (Figura 2.24).



Figura 2.23 – Vídeo câmera e comunicação de dados (Larrauri, Sorrosal e Gonzalez, 2013).

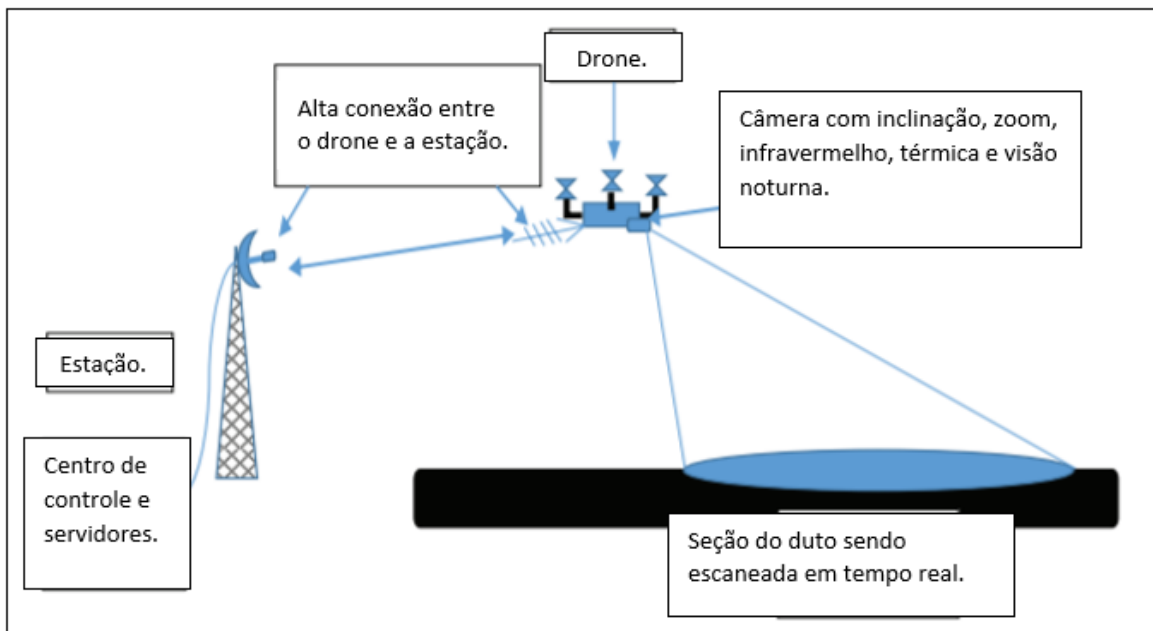


Figura 2.24 – UAV para monitoramento de tubos (Adaptado de Idachaba, 2016).

Hallermann e Morgenthal (2013), relatam como os profissionais estão usando *drones* na inspeção das condições de serviço da estrutura para combater avaliações que requerem equipamento especial e equipes com treinamento especializado (Figura 2.25).



Figura 2.25 Inspeção convencional de grandes estruturas (Hallermann e Morgenthal, 2013).

Empresas de comunicação com suas torres de celular e rádio, cidades com caixas de água elevada de distribuição e outras indústrias que usam torres como parte de suas operações diárias exigem manutenção regular e, antes que o trabalho de manutenção possa ser feito, uma pesquisa preliminar deve ser realizada para ajudar ao seu planejamento. Essa pesquisa preliminar, está cada vez mais sendo feita com recurso a *drones*. Um *drone* pode ajudar a identificar potenciais perigos de subida, encontrar danos estruturais e ajudar os inspetores de torre a entender as ferramentas de que precisam antes de subir. O uso do *drone* otimiza a eficiência do processo, economizando tempo e mantendo os operários em segurança. Casos de uso:

- (i) Identificação de perigos ambientais ou outros antes da escalada (abelhas, pássaros, danos estruturais, etc.);
- (ii) Identificação de áreas danificadas;
- (iii) Inspeção pré-trabalho para determinar as ferramentas e peças necessárias antes da escalada, para evitar perda de tempo ao retornar ao solo para encontrar a ferramenta adequada;
- (iv) No caso de uma emergência estrutural, possibilidade de avaliar a integridade da estrutura antes de subir e descobrir se é seguro realizar a escalada da estrutura;

O *zoom* é um recurso crucial para câmeras usadas em inspeções de torres, já que, as torres AM, as antenas de FM/TV e até as antenas de celular e micro-ondas podem emitir campos eletromagnéticos poderosos a curta distância. Esses campos podem interferir no seu sinal de controle e causar o mau funcionamento do *drone*. É por isso, de grande importância garantir uma distância segura em relação à torre durante o voo.

## 2.6 MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS COM VANTS

Yoon, Shin e Spencer (2017) demonstraram uma abordagem para a medição de deslocamentos em laboratório usando um *drone* equipado com câmeras de vídeo de nível comercial. Em contraste com os métodos baseados em câmara estacionária (câmara fixa ao solo), a proposta abordada permitiu estimar o deslocamento absoluto das estruturas usando um único *drone* com base em três fases:

- (i) medição do deslocamento relativo livre da estrutura, ou seja, deslocamentos mensurados pela filmagem.
- (ii) estimativa do movimento dos 6 graus de liberdade da câmera no decorrer da medição, usando como referencial um alvo estacionário.
- (iii) avaliação do deslocamento absoluto da estrutura.

Enquanto as câmeras estacionárias têm a dificuldade de implantação no campo devido à linha de visão, o método proposto resolve os problemas capturando o vídeo usando um *drone*. É importante lembrar que, mesmo quando a linha de visão pode ser alcançada com as câmeras estacionárias, as câmeras podem ser submetidas a movimentos induzidos devidos ao vento forte ou movimento do solo devido a tráfego nas proximidades. O método proposto também pode resolver o movimento não-estacionário das câmeras.

Para validar a abordagem proposta, foi realizado uma experiência em laboratório usando um canal hidráulico (Figura 2.26), simulando o tráfego em uma ponte.

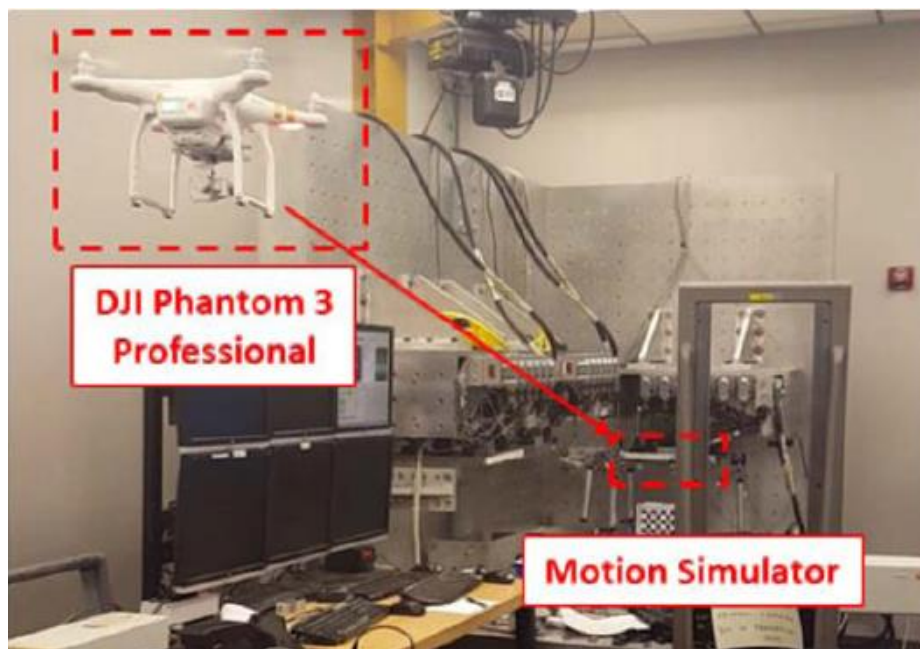


Figura 2.26 - Experiência em laboratório usando um canal hidráulico (Yoon, Shin e Spencer, 2018).

Os resultados experimentais mostraram que a abordagem proposta permite estimar o deslocamento absoluto de estruturas com uma precisão muito razoável (Figura 2.27). O RMSE calculado foi de 2.14 mm, correspondente a 1.2 pixel de resolução.

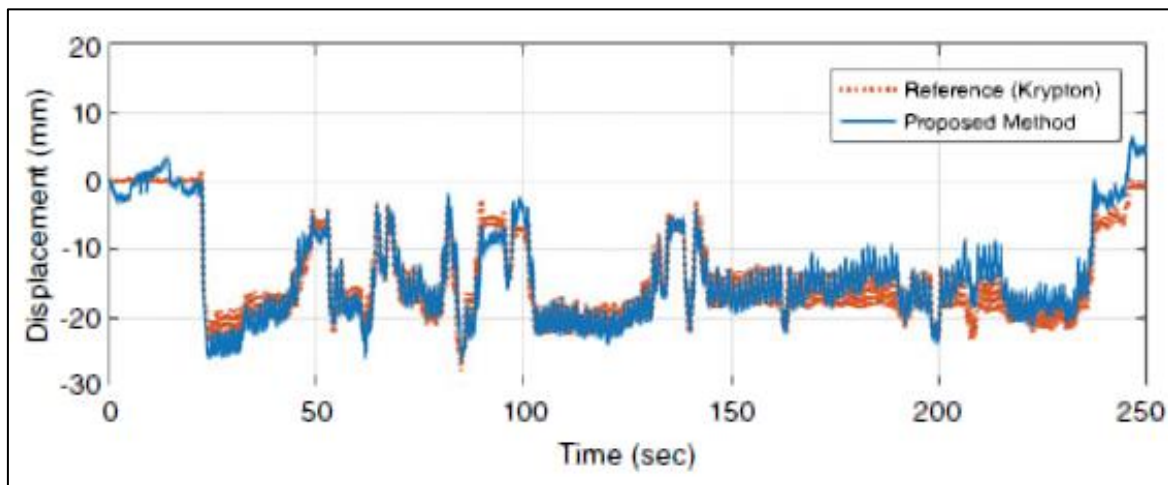


Figura 2.27 - Resultados experimentais do método proposto (Yoon, Shin e Spencer, 2018).

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO E CASO DE ESTUDO

#### 3.1 METODOLOGIA

A proposta da pesquisa é o desenvolvimento de uma ferramenta que possibilite inspecionar o deslocamento dinâmico estrutural baseado em filmagem de uma câmera acoplada ao *drone* sem um referencial estático, com aplicação à medição dos deslocamentos da torre de telecomunicações do Monte da Virgem sob ação do vento.

Será estudado, ao invés do alvo estacionário de plano de fundo utilizado por Yoon, Shin e Spencer (2017) (Figura 2.26), a utilização dos sensores internos do IMU (*Inertial Measurement Unit*) do *drone* para se obter os deslocamentos do *drone*.

A instrumentação a ser utilizada será o *drone* da DJI Phantom 4 RTK (Figura 3.1), acoplado com a câmera de Vídeo Panasonic HC-V380 (Figura 3.2) e um alvo utilizado para rastreamento com 9 círculos vermelhos de 1 cm de diâmetro (Figura 3.3). Toda a instrumentação será apresentada com maior detalhe no próximo capítulo.



Figura 3.1 – DJI Phantom 4 RTK (Mulakala, 2019).

A razão da utilização de uma câmera acoplada e não da própria câmera que vem embutida ao *drone*, está relacionada com o facto da câmara ser montada num sistema de suspensão e pivotação (gimbal) com

estabilizadores internos, incapazes de serem desligados, fazendo com que os movimentos registados pela câmara sejam diferentes do movimento real do *drone*.



Figura 3.2 – HC-V380 Câmera de Vídeo (Panasonic, 2019).

Para a validação da aquisição dos deslocamentos absolutos do *drone*, é realizado o ensaio com o *drone* em movimento e o alvo estacionário. Assim os dados de rastreamento na filmagem relativos ao alvo corresponderão ao movimento do *drone*, após o processamento dos dados dos sensores internos (IMU), os dados deverão coincidir. Após validação será feita sua aplicabilidade no caso de estudo.

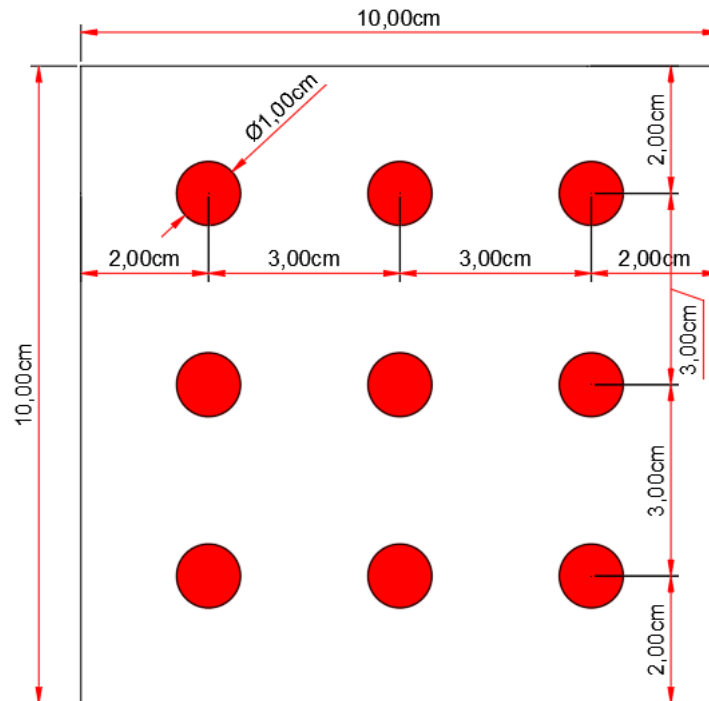


Figura 3.3 - Alvo dimensionado para o rastreamento (Autoria própria).

A pesquisa está dividida em 3 fases:

- Fase 1: Medição dos deslocamentos relativos.

O objetivo da primeira fase é estimar os deslocamentos relativos do alvo estático fixado na estrutura à posição da câmera em movimento. Através da ferramenta desenvolvida de rastreamento de objeto baseado em cores.

- Fase 2: Estimativa do deslocamento absoluto do *drone*.

A segunda fase permite estimar o movimento não-estacionário da câmera, na direção de interesse, a partir dos dados extraídos dos acelerômetros e giroscópios (IMU) do DJI Phantom 4 RTK, utilizando a ferramenta desenvolvida de processamento de sinal, considerando apenas os graus de liberdade que influenciam o rastreamento.

- Fase 3: Validação de dados.

Na terceira e última fase é quantificado o deslocamento absoluto da estrutura com base nas informações obtidas da Fase 1 (deslocamento relativo da estrutura) e Fase 2 (deslocamento absoluto da câmera). Consiste na validação dos dados processados, na comparação dos deslocamentos do alvo estático mensurados pelo sistema vídeo com os deslocamentos estimados a partir do processamento dos dados dos sensores internos do *drone*, que deverão ser iguais porque só existe movimento do *drone*, resultando no deslocamento nulo da estrutura.

A Figura 3.4 é o fluxograma que faz referência às atividades propostas na metodologia.

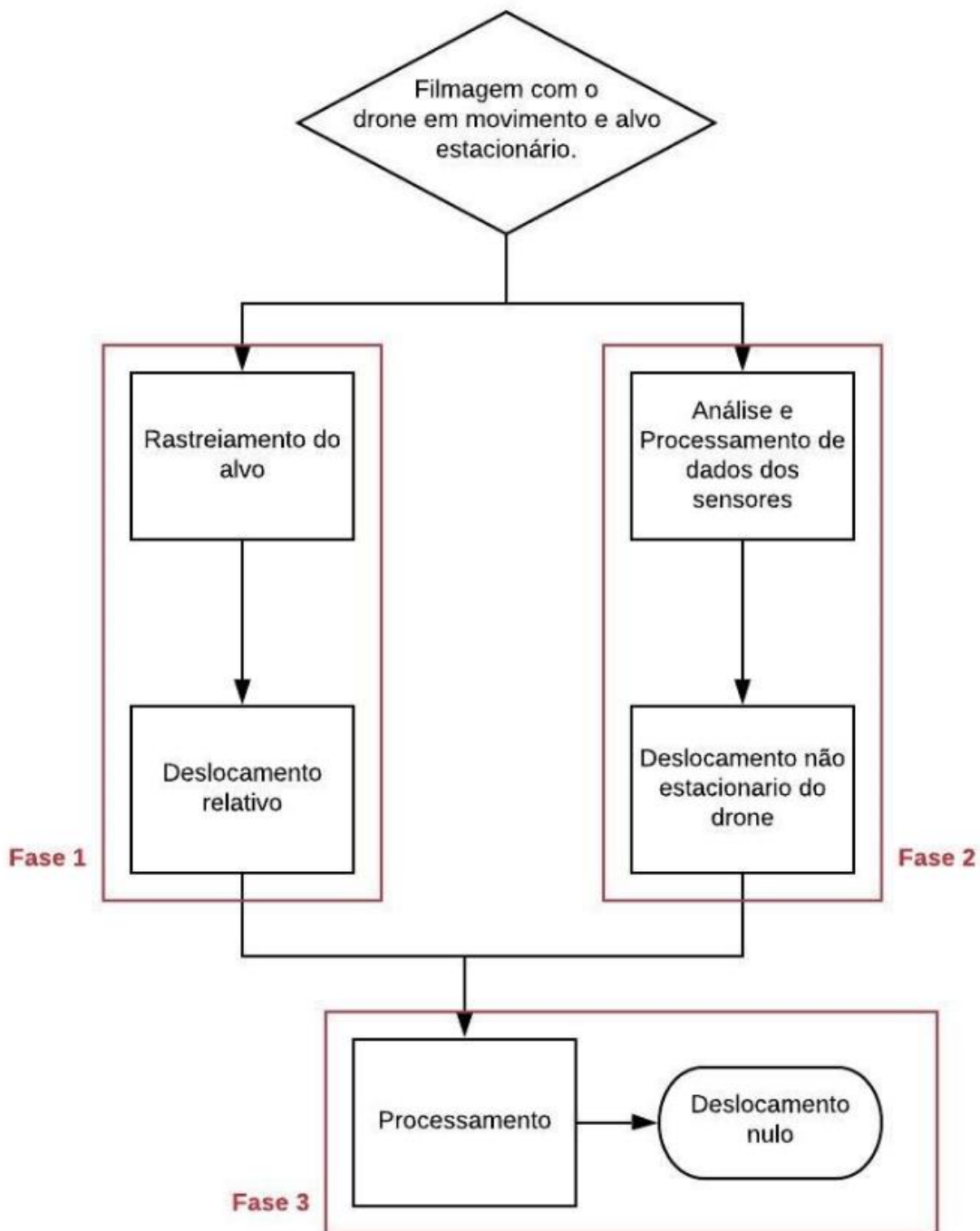


Figura 3.4 – Fluxograma de pesquisa.

## **3.2 A TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM**

A torre de telecomunicações Monte da Virgem situa-se nas proximidades da cidade do Porto, Portugal, e a sua estrutura é composta por um fuste de betão armado, com 126 m de altura, sobre o qual repousa um mastro em aço de 51 m de altura, resultando uma altura total de 177 m.

O fuste de betão armado apresenta a forma de um hiperbolóide, com uma secção circular oca e um diâmetro variável entre 14.30 m junto à base e 7.70 m no topo (Figura 3.5a). O fuste é dotado de cinco pisos técnicos, formados por laje em consola em betão pré-esforçado. Os pisos estão localizados entre as cotas 94.90 m e 112 m em relação à base do fuste, sendo que dois deles são cobertos e com fachadas exteriores, e os restantes exteriores e com guarda corpos no seu contorno (Figura 3.5c). No interior do fuste existe uma caixa de elevadores e uma escada metálica, que se apoiam em perfis metálicos, distribuídos intercaladamente ao longo da altura do fuste, e por sua vez ligados a consolas metálicas fixadas no paramento exterior (Figura 3.5d).

A torre metálica é constituída por uma treliça espacial de barras metálicas e formada por três troços ao longo da sua altura que dão suporte aos sistemas de transmissão FM, VHF e UHF (Figura 3.5b). O acesso à torre é realizado por meio de uma escada interior complementada por meio de duas plataformas intermédias munidas de guarda. A torre tem uma base em forma octogonal e é fixada ao fuste de betão por intermédio de chumbadouros. A transição da torre metálica para o fuste é realizada por meio de uma laje de betão.



Figura 3.5 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem: (a) vista geral; (b) torre metálica; (c) Pisos técnicos; (d) vista superior do interior do fuste, com vigas metálicas e detalhe de sua conexão no fuste (Ribeiro *et al.*, 2019).

Ribeiro *et al.* (2019) apresentou uma metodologia de identificação automática de eventos críticos na avaliação dos efeitos dinâmicos da ação do vento na torre de telecomunicações do Monte da Virgem com base num sistema de monitorização permanente.

O sistema de monitorização permanente possibilitou a identificação de eventos críticos associados a fenómenos de amplificação da resposta dinâmica da estrutura, com valores máximos da aceleração compreendidos entre 5 mg e 15 mg (Figura 3.6a-b), tipicamente associados a um importante contributo do modo de vibração local associado aos movimentos da torre metálica, que, por compatibilidade estrutural, induz movimentos no fuste de betão. Os eventos críticos ocorrem sobretudo para regimes de vento oriundos de Leste, praticamente sem variação de direção, e para velocidades aproximadamente constantes ao longo do tempo e situadas entre 20 km/h e 35 km/h (Figura 3.6c). A metodologia desenvolvida para a identificação automática de eventos críticos demonstrou eficiência e robustez na quantificação do número de eventos e da sua duração e máxima amplitude. Ao longo de um período de 3 meses foram identificados 114 eventos críticos, com a duração total de 3004 min, sendo a aceleração máxima registada igual a 14.4 mg (Figura 3.6d). Os eventos críticos ocorreram tipicamente em período noturno e sobretudo no mês de novembro.

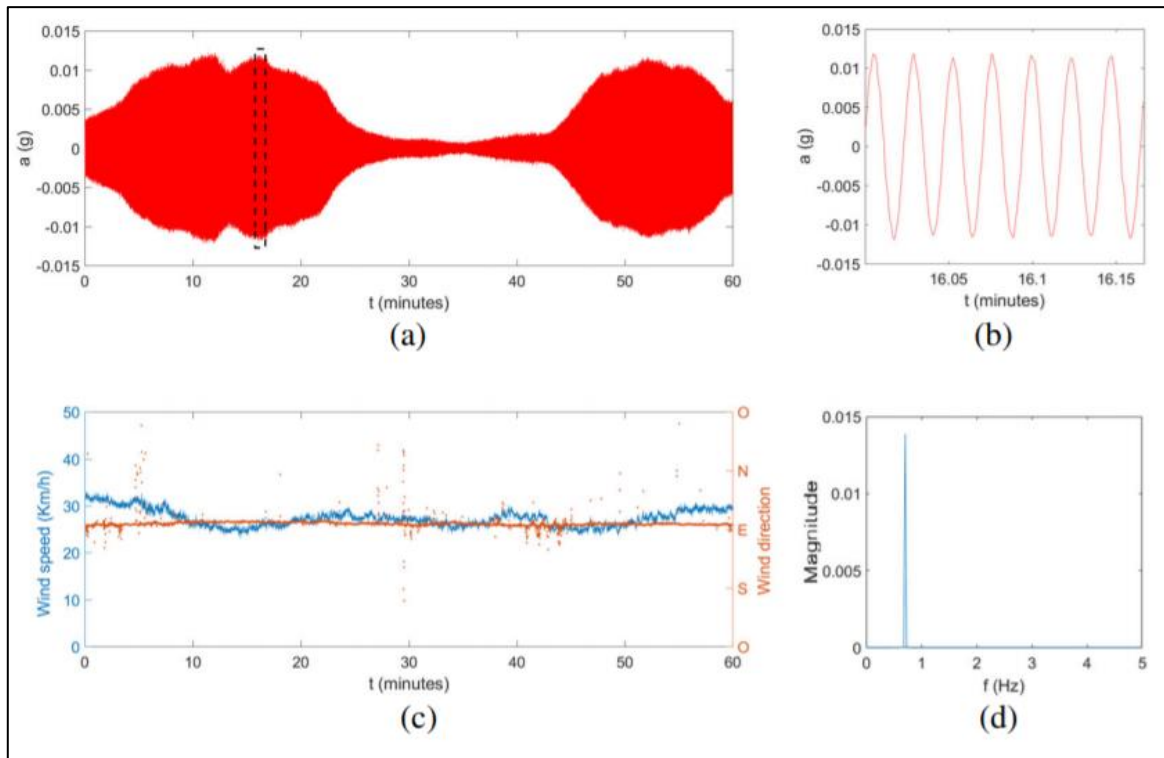


Figura 3.6 – Evento crítico: (a) Gravação da aceleração; (b) Detalhe da gravação de 10s; (c) Direção e velocidade do vento; (d) auto espectros médios e normalizados de acelerações (Ribeiro *et al.*, 2019).



## CAPÍTULO 4

### INSTRUMENTAÇÃO

Nas seções que se seguem neste capítulo, será abordado a instrumentação utilizada no decorrer do desenvolvimento do projeto, explicando sua operacionalidade e funcionalidades.

#### 4.1 DRONE DJI PHANTOM 4 RTK

O modelo de *drone* utilizado nesse estudo é o DJI Phantom 4 RTK (Figura 4.1), lançado pela DJI em outubro de 2018. O *drone* foi projetado para usar o processamento cinemático em tempo real para produzir mapas aéreos de alta precisão.



Figura 4.1 - DJI Phantom 4 RTK (acervo do autor).

A orientação das aeronaves nos eixos espaciais 3D, está destacada na Figura 4.2. Esta informação é importante, porque os dados dos sensores internos de aquisição (IMU) estarão segundo essas orientações.

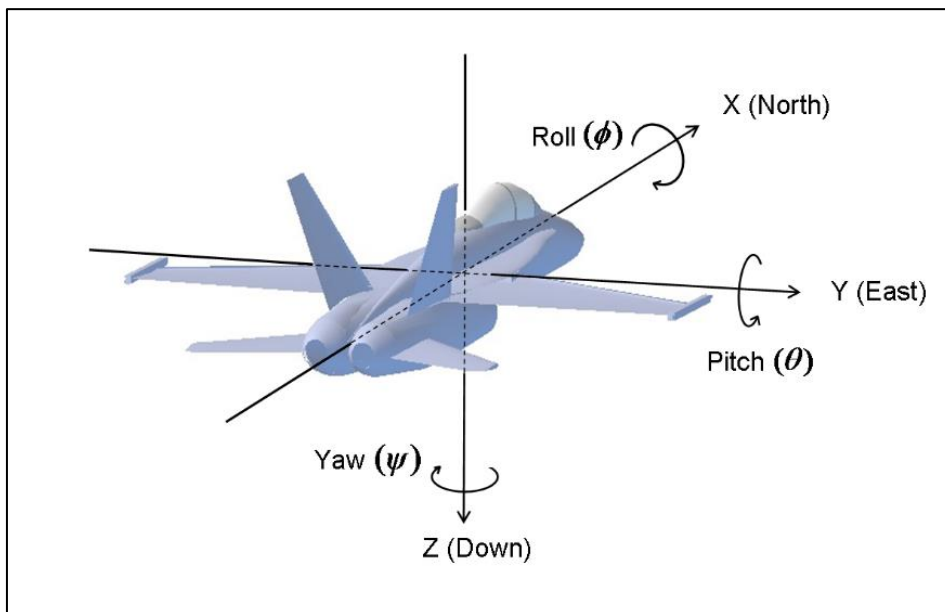


Figura 4.2 - Orientação dos VANTs no espaço 3D (DroneDeploy, 2018).

O RTK (*Real Time Kinematic*), posicionamento cinemático em tempo real, é um sistema que faz correções nos dados do GPS da aeronave em tempo real, com precisão de centímetros. Tal acontece por possuir uma base de solo, que contém um GPS Geodésico de precisão. A base registra com exatidão o ponto geográfico em que está posicionada, servindo como referência estática para o *drone* que está em movimento (Figura 4.3). Durante o voo, o sensor RTK que está embutido na aeronave (Figura 4.4) troca informações com a base estática e com os satélites, para corrigir o posicionamento geográfico do *drone* (Mulakala, 2019).

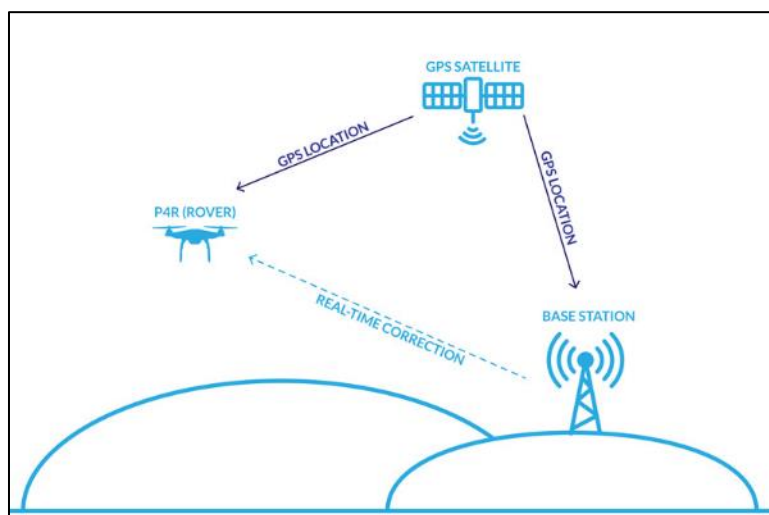


Figura 4.3 - Fluxo de trabalho do RTK com o *drone* (Mulakala, 2019).



Figura 4.4 - Sensor RTK embutido no *drone* (Mulakala, 2019).

Além da unidade RTK, o *drone* também usa o módulo americano de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), chamado de GPS, sistema de navegação por satélite que fornece ao aparelho receptor móvel a posição do mesmo, fornecendo estabilidade de voo adicional ao voar em regiões densas com sinal RTK ruim. A DJI afirma precisão de posicionamento horizontal com RTK de 1 centímetro e precisão de posicionamento vertical com RTK de 1.5 centímetro. Em termos de medições absolutas em modelos fotogramétricos, a DJI alega precisão de 5 centímetros ao voar a 100 metros com a representação do pixel da imagem de 2.7 centímetros.

Esse *drone* se destaca por possuir na sua movimentação, um sistema de detecção e desvio de obstáculos, que funciona como uma inteligência artificial. São sensores ultrassônicos e câmeras adicionais, que fazem com que o *drone* pare automaticamente e fique apenas flutuando caso se depare com um obstáculo no modo normal ou o contorne e siga o caminho no modo autônomo de voo. O sensor de obstáculos detecta objetos entre os 0.70 e os 15 metros.

O uso do *drone* possibilitará acesso em locais com limitação a implantação de uma câmera estacionária.

#### 4.1.1 Manuseamento

Controlar o *drone* e manter ele estável, não é simples, o controlador do *drone* possui quatro graus de liberdade (Figura 4.5).

- *Throttle*: O *drone* aumenta a potência dos motores tendo como consequência a maior ou menor velocidade dos rotores e garantindo a manutenção da altitude de voo ou variação da velocidade ascensional ou de descida;
- *Yaw*: Rotaciona o *drone* em torno do seu eixo vertical, no sentido horário e anti-horário;
- *Pitch*: Controla o movimento de translação para frente e para trás do *drone*;
- *Roll*: Controla o movimento de translação para esquerda e para direita do *drone*.

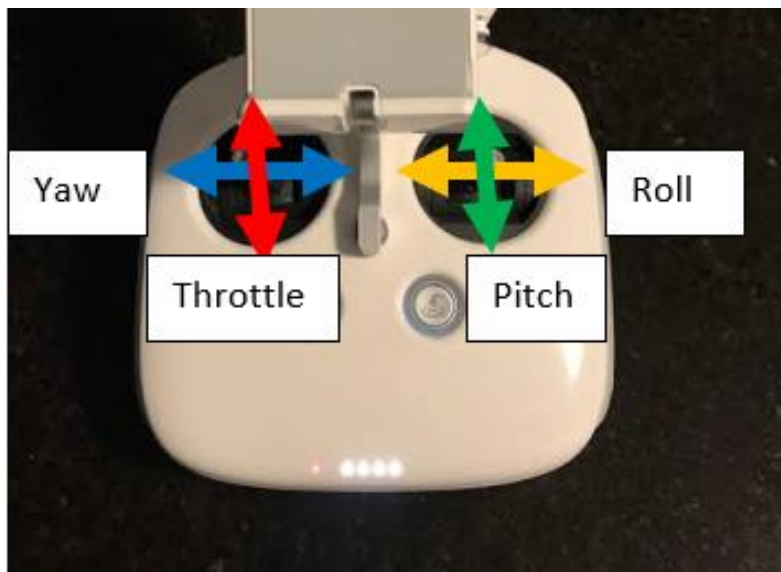


Figura 4.5 - Controlador DJI Phantom 4 (acervo do autor).

Antes de levantar voo com o *drone* real em terreno aberto, foi realizado treinamento em um aplicativo gratuito para *smartphones*, simulador de *drone*, chamado Quadcopter FX Simulator (Figura 4.6), para proporcionar experiências virtuais de manuseamento. Posteriormente foram efectuados voos de treino real nas dependências do ISEP (Figura 4.7).

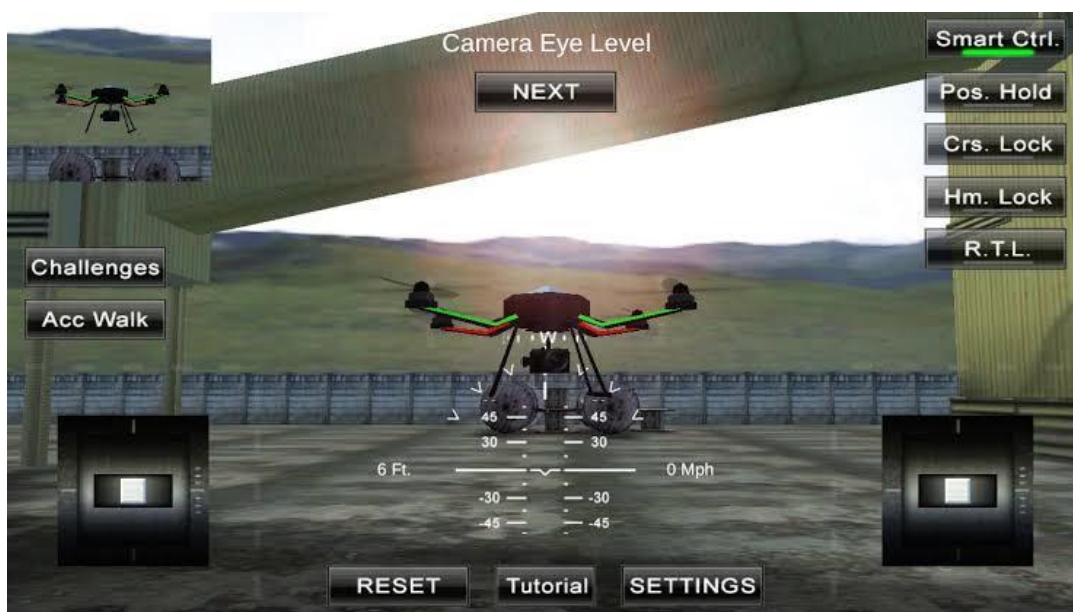


Figura 4.6 - Interface do *app* simulador (acervo do autor).



Figura 4.7 – Primeiro manuseio do *drone* (acervo do autor).

Entretanto, a utilização de *drones* faz-se necessário a utilização de operadores habilitados e familiarizados com o equipamento, devendo possuir algum tipo de treinamento, sendo necessário a utilização de pelo menos duas pessoas, sendo uma para manuseá-lo e outra para observá-lo. Apesar da adoção deste equipamento tornar algumas situações de trabalho menos inseguras, a utilização deste tipo de aeronave também apresenta suas situações de risco particulares, como por exemplo, a utilização dela em locais com concentração de pessoas no caso de queda.

#### 4.1.2 Legislação Brasileira para uso de *drones*

O uso de *drones* em território brasileiro é regulamentado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e Ministério da Defesa.

A primeira medida a ser feita é a homologação dos equipamentos junto à ANATEL, sejam eles para aeromodelismo ou para uso recreativo, uma vez que possuem transmissores de radiofrequência para controle remoto. De acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (2016) “A medida da Agência tem como objetivo evitar interferências dos *drones* em outros serviços, a exemplo das comunicações via satélite. [...]. No processo de homologação são verificadas as características técnicas de transmissão dos equipamentos.”. É necessário fazer um cadastro no Sistema de Gestão de Certificação e Homologação,

preenchendo o requerimento de homologação que necessitará de informações como a carteira de identidade, cadastro de pessoa física (CPF) ou cadastro nacional de pessoa jurídica (CNPJ), manual do produto e o certificado da *Federal Communications Commission* (FCC). Será necessário o pagamento de uma taxa, para então dar continuidade ao processo que será analisado por pessoa específica da ANATEL.

As orientações por parte da ANAC podem ser encontradas no Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial (RBRAC-E) nº 94, publicado em 2017 e intitulado por “Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil”. Este Regulamento divide os *drones* em duas categorias: aeromodelos no caso de equipamentos para uso recreativo e lazer, e *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) quando para fins comerciais, experimentais e institucionais. A categoria RPA ainda é subdividida em 3 classes, segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (2017a):

- a) Classe 1: peso máximo de decolagem superior a 150 kg;
- b) Classe 2: peso máximo de decolagem superior a 25 kg e inferior ou igual a 150 kg;
- c) Classe 3: peso máximo de decolagem máximo de 25 kg.

De maneira geral, os dois tipos (aeromodelos e RPA) só podem ser operados em áreas com no mínimo 30 metros horizontais de distância das pessoas e cada piloto remoto não pode operar mais de uma RPA por vez. Para equipamentos com peso máximo de decolagem, incluindo peso próprio, não superior a 250 g, não é necessária autorização da Agência Nacional de Aviação Civil para voo, apenas devem ser respeitadas as orientações da mesma. Apenas para aeromodelos, quando possuírem peso de decolagem superior a 250 g, e RPA classe 3 em operação visual, *vision line of sight* (VLOS), até 400 pés (120 m) de altura acima do nível da superfície, estes devem ser registrados no Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) da Agência Nacional de Aviação Civil, não necessitando de certificados de aeronavegabilidade. Para RPA classe 3, em operação VLOS acima de 400 pés (120 m), RPA classe 1 e classe 2, é necessário a emissão de um certificado de aeronavegabilidade, podendo este ser de acordo com Agência Nacional de Aviação Civil (2017a):

- a) Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE): emitido para pesquisa e desenvolvimento, treinamentos de piloto, e pesquisa de mercado;
- b) Autorização Especial de Voo (AEV): traslado de aeronave para bases de reparos, manutenções ou armazenamento das mesmas, entrega da aeronave ao seu comprador final, ensaios em voo de produção e treinamento dos pilotos do fabricante, evacuação de áreas perigosas e voos para demonstração aos clientes;
- c) Certificado de Aeronavegabilidade Especial para RPA (CAER): destinado para RPA classe 3, em operação VLOS acima de 400 pés da superfície;

d) Certificado de Aeronavegabilidade padrão: destinado para RPA classe1. podendo ser substituído por um CAVE ou AEV.

e) Certificado de Aeronavegabilidade categoria restrita: destinado para RPA classe1. podendo ser substituído por um CAVE ou AEV. O resumo da orientação para homologação junto à ANAC é visto na Figura 4.8

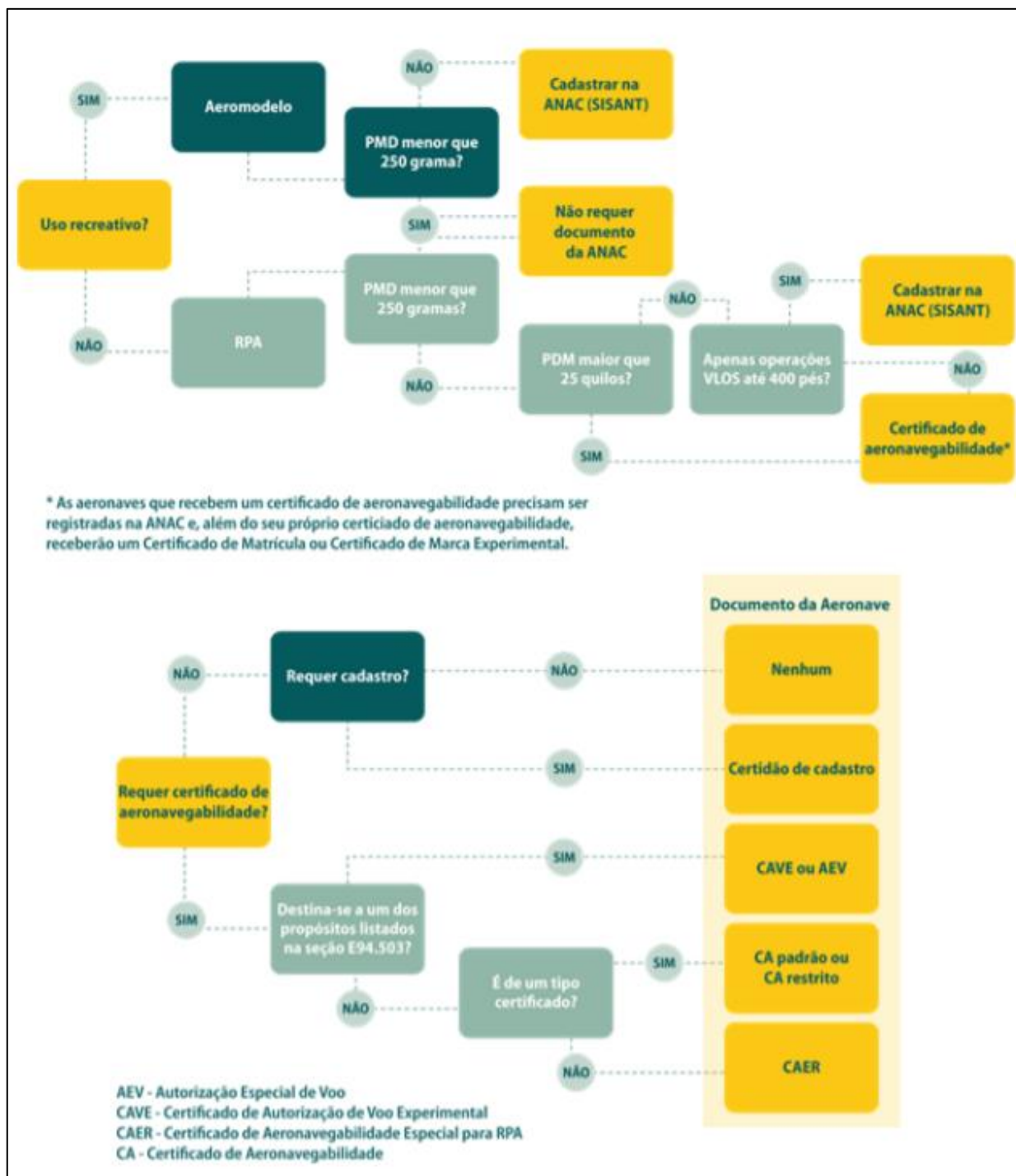


Figura 4.8 – Fluxograma para emissão de certificados. (Agência Nacional De Aviação Civil, 2017)

Por parte do DECEA, o regulamento que orienta o manuseio de RPA é o ICA-100-40, intitulado por “Aeronaves não tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”. O DECEA é o órgão que planeja, gerencia e regula as atividades do espaço aéreo. Ele divide o espaço aéreo brasileiro conforme Figura 4.9, e direciona cada região para seus órgãos regionais, Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA) I, II, III, IV e Serviço Regional de Proteção ao voo de São Paulo (SRPV-SP). Cabe a estes órgãos conceder as autorizações de acessos aos espaços aéreos para voo.

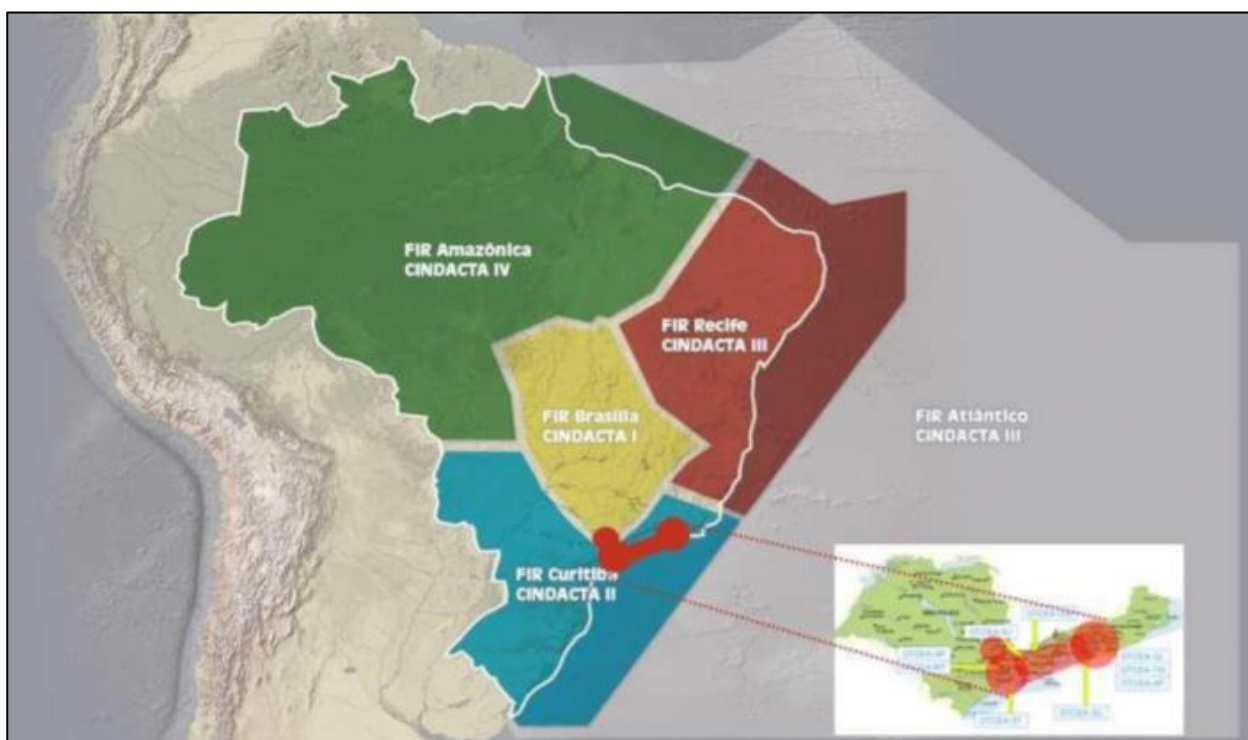


Figura 4.9 – Divisão do espaço aéreo brasileiro e seus órgãos regionais. (Ministério da Defesa, 2018)

Para o registo de imagens realizado através do uso de VANT em atividades de inspeções de estruturas, como por exemplo, fachadas de edifícios, pontes, torres, linhas de transmissão de energia elétrica, etc., de acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil, este tipo de atividade é classificado como aero inspeção, não sendo necessária a solicitação de autorizações junto ao mesmo. Autorizações do Ministério da Defesa, são, no entanto, necessárias para atividades com caráter de aerolevantamento, ou seja, “[...] conjunto de operações que visam obter informações da superfície terrestre, aérea ou marítima pertencentes território nacional [...]” (Ministério da Defesa, 2019).

### 4.1.3 Legislação Portuguesa para uso de *drones*

O uso de VANT em território português é regulamentado pela Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC) através do “Voa na Boa”. Deve-se inicialmente entender qual o tipo de equipamento que está se usando. A Autoridade Nacional da Aviação Civil (2016) define como aeronave brinquedo todas as não equipadas com motor a combustão e com peso máximo operacional de 0.250 kg para utilização de lazer de crianças com idade inferior a 14 anos, e aeromodelo como uma aeronave pilotada remotamente, que não seja, aplicada nos critérios que definem aeronave brinquedo, com massa operacional máxima de 25 kg utilizada exclusivamente para exibição, competição ou atividades recreativas.

Como regras gerais, operações com RPA não necessitam de autorização de voo desde que seja um voo diurno de operação VLOS, até 120 m acima da superfície, com exceção de aeronaves brinquedo que só podem voar com altitude máxima de 30 m. Caso os voos de aeromodelos sejam efetuados em locais ou pistas com áreas cujas características e limites laterais e verticais estejam presentes em publicações de informação aeronáutica nacionais, podem voar a altura máxima permitida pela área ainda que a mesma supere 120 m. Há alguns locais com proximidade a aeródromos ou zonas controladas que estão sujeitas a regras específicas. Para isso, deve-se verificar o anexo do regulamento para saber quais as regras a seguir.

O plano de voo deve ser feito de forma a minimizar os riscos para pessoas, bens e outras aeronaves, mantendo uma distância segura deles a fim de evitar acidentes. O piloto remoto deve dar prioridade para as aeronaves tripuladas, afastando-se das mesmas, sempre que em caso excepcional as aeronaves tripuladas estejam voando a mesma altura que o RPA. Nas operações VLOS, não podem ser pilotadas mais de uma aeronave concomitantemente.

Antes da operação com o equipamento, o piloto remoto deve garantir que a aeronave e seus sistemas estejam a funcionar corretamente para que seja possível usufruí-los em condições normais. A RPA deve voar sempre com luzes de identificação ligadas, independentemente de ser uma operação diurna ou noturna. Os pilotos e observadores de RPA não podem exercer suas funções quando se encontrarem incapazes por sua aptidão física ou mental. Carecem de autorização de voo da Autoridade Nacional da Aviação Civil voos noturnos, de operação não visual, *Beyond Visual Line of Sight* (BVLOS), e voos de altitude superior a 120 m da superfície. Estas condições podem sofrer exceções quando a RPA possua uma massa operacional máxima de 1 kg, opere com altitude máxima de 16 pés (5 m), esteja munido de equipamento com visão do *drone*, *First Person View* (FPV), ocorrência do voo numa área circular de raio de 100 m com centro no piloto remoto, e se a operação estiver afastada de pessoas e bens, de forma a evitar o risco de colisões. Voo de aeromodelos com massa operacional superior a 25 kg necessitam de autorizações para voo.

O regulamento ainda traz em seu anexo as Zonas de Controle (CTR) de acordo com os principais aeródromos do país que possuem regras específicas. Nele, são abordados os aeródromos das cidades de Lisboa, Porto, Cascais, Faro, e das regiões autónomas correspondentes aos arquipélagos portugueses. Como neste trabalho é abordada a região de Vila Nova de Gaia, esta está associada ao CTR da cidade do Porto, sendo suas áreas de restrições indicadas na Figura 4.10.

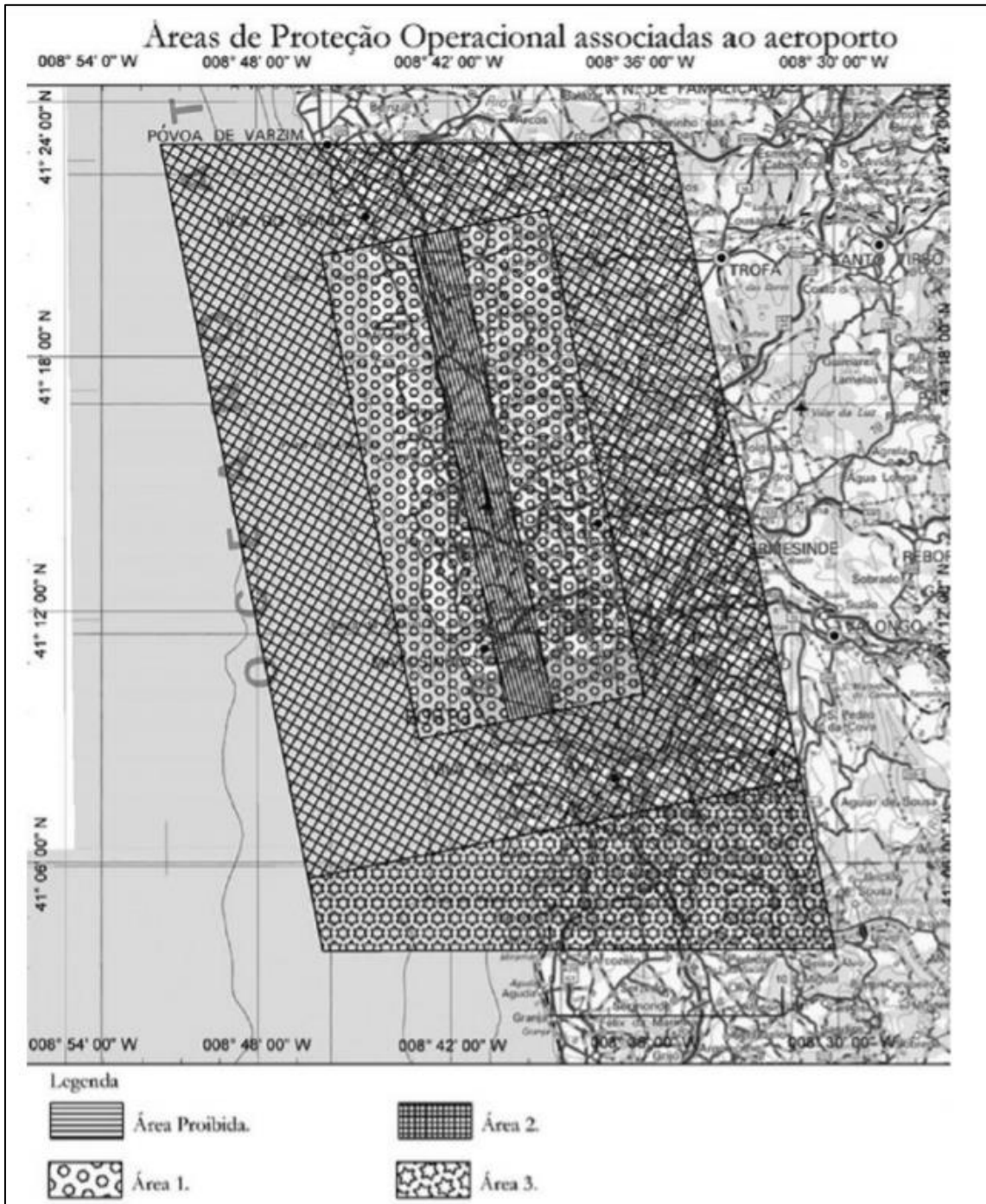


Figura 4.10 - Áreas associadas a CTR do Porto (Autoridade Nacional da Aviação Civil, 2016).

Analisando a posição da Torre do Monte da Virgem, Figura 4.11, conclui-se que a estrutura está localizada na Área 3 da CTR do Porto. A regras de utilização de RPA nesta região são que não necessitam de autorização para voo desde que a altura da operação seja no máximo 80 m da superfície ou até à altura máxima do obstáculo natural ou artificial existente em um raio de 75 m centrado na aeronave. Como a torre é considerada um obstáculo artificial com altura de 177 m, a altura máxima da operação é coincidente com a altura da torre.

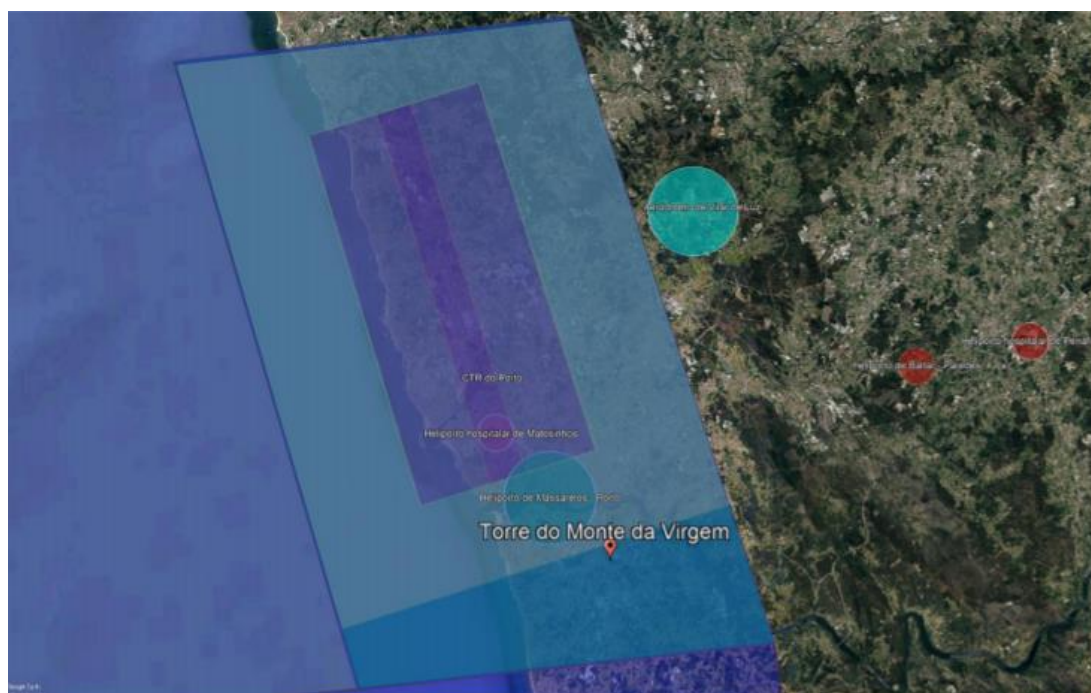


Figura 4.11 - Localização da Torre do Monte da Virgem na CTR do Porto (GOOGLE LLC, 2019).

Para operações com o intuito de registar imagens ou vídeos para efeitos de levantamentos aéreos, faz-se necessário sempre a solicitação de autorização para os registos por parte da Autoridade Aeronáutica Nacional (AAN). Entretanto, durante o desenvolvimento deste trabalho, a plataforma de registo para solicitação de autorização não estava pronta e, portanto, não foi realizada nenhuma requisição de autorização. A inspeção da Torre do Monte da Virgem foi autorizada pela Altice, atual empresa gestora da torre, assim como a sua utilização como alvo de estudo e realização dos registos necessários dela.

## 4.2 CÂMERA DE VÍDEO PANASONIC HC-V380

A câmara não removível, acoplada no *drone* DJI Phantom 4 RTK (Figura 4.1), possui características que divergem do âmbito desse trabalho, porque seus movimentos não são igualáveis aos movimentos do *drone* por possuir estabilizadores internos cuja desactivação não é possível, e também pela possível necessidade do uso de zoom nas filmagens. Partindo dessas premissas, surgiu a necessidade de acoplar uma câmara para suprir essas características.

A aquisição da câmera de vídeo Panasonic HC-V380 (Figura 3.2), foi efectuada respeitando as necessidades e condicionantes atrás referidas. Esta câmera possui 50x zoom ótico, possibilidade de desativar o estabilizador de imagem, conexão remota via *smartphone*, dimensões compactas 60x62x129 mm, 252g sem bateria, gravação da filmagem em full HD com 50 fps (*frames per second*), cumprindo todas as necessidades requisitadas.

Para fixação da câmera ao *drone*, foi projetado um suporte de alumínio nas instalações do ISEP com a menor massa possível (Figura 4.12), para não comprometer o seu funcionamento, uma vez que o *drone* não foi projetado para transporte de cargas externas. De modo a reduzir ao mínimo a carga total transportada, foram retiradas massas do suporte que não comprometiam sua estabilidade e colocadas abraçadeiras de plástico ao invés de parafusos metálicos para fixação e contenção de vibrações.



Figura 4.12- Suporte fixado ao *drone* (acervo do autor).

No painel de controle do *drone*, é possível aferir o excesso de sobrecarga nos motores, com avisos de alerta sobre a tela. Foi avaliado o conjunto em voo e após algumas correções ao suporte não se registaram notificações de excesso de carga.

### 4.3 IMU

A IMU é o dispositivo de medição de força gravitacional e orientação da aeronave. O Phantom 4 RTK, possui dois pares de IMU que integram o seguinte conjunto de sensores: acelerômetro, giroscópio, bússola, altímetro, barômetro. Os IMUs são sensores importantes para garantir um vôo estável e o Phantom 4 RTK compara constantemente os dados que recebe através dos dois pares. Esses dados são executados através de vários algoritmos para verificar a precisão, e quaisquer dados imprecisos são simplesmente descartados sem afetar o voo, mantendo o voo estável e confiável.

Dos sensores os que vão ser utilizados para o processamento de dados, destaca-se o giroscópio (Gyr) e o acelerômetro (Acc). Estes sensores possuem 3 eixos de medição cada (Figura 4.13), de forma que a

resposta de saída pode conter 6 valores. Isso também significa que ele tem 6 graus de liberdade (6 DOF - *Degree Of Freedom*).

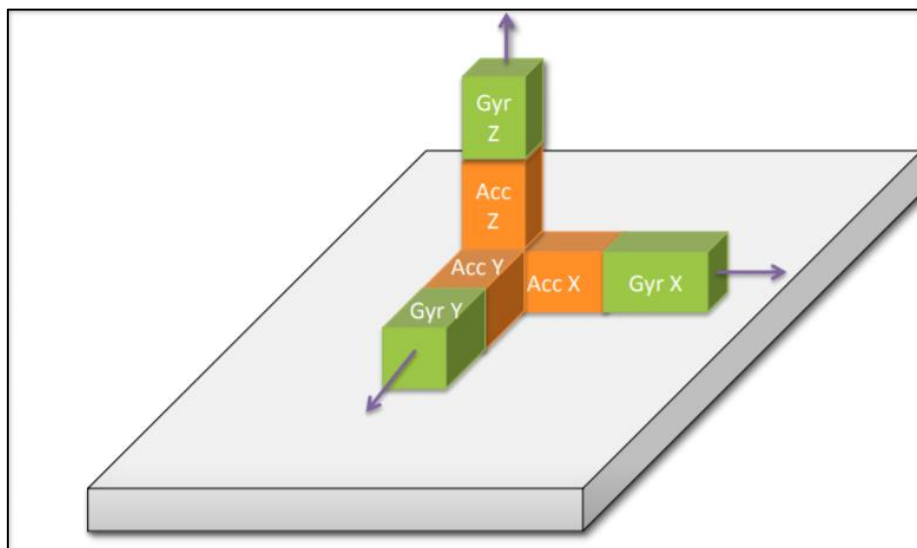


Figura 4.13- Montagem de sistema inercial com três acelerômetros e três giroscópios (Mori, 2013).

Para visualizar as informações do IMU, a DJI disponibiliza em sua plataforma digital um *software* chamado DJI Assistant 2 for Phantom (Figura 4.14), no qual o computador deve estar conectado via USB com o *drone*, para ter acesso ao arquivo DAT referente a cada voo. Esses arquivos são gerados toda vez que o *drone* reinicia.

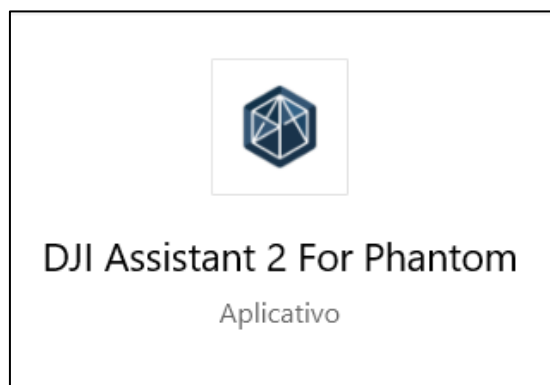


Figura 4.14 - DJI Assistant 2 for Phantom.

DAT é um arquivo de dados, em formato binário criado por um programa e só pode ser usado por ele. Os arquivos DAT não podem ser abertos ou exibidos diretamente. Logo, é possível visualizar os registros dos sensores em forma de gráfico no programa, mas não é possível extraí-los, porque são criptografados.

## CAPÍTULO 4

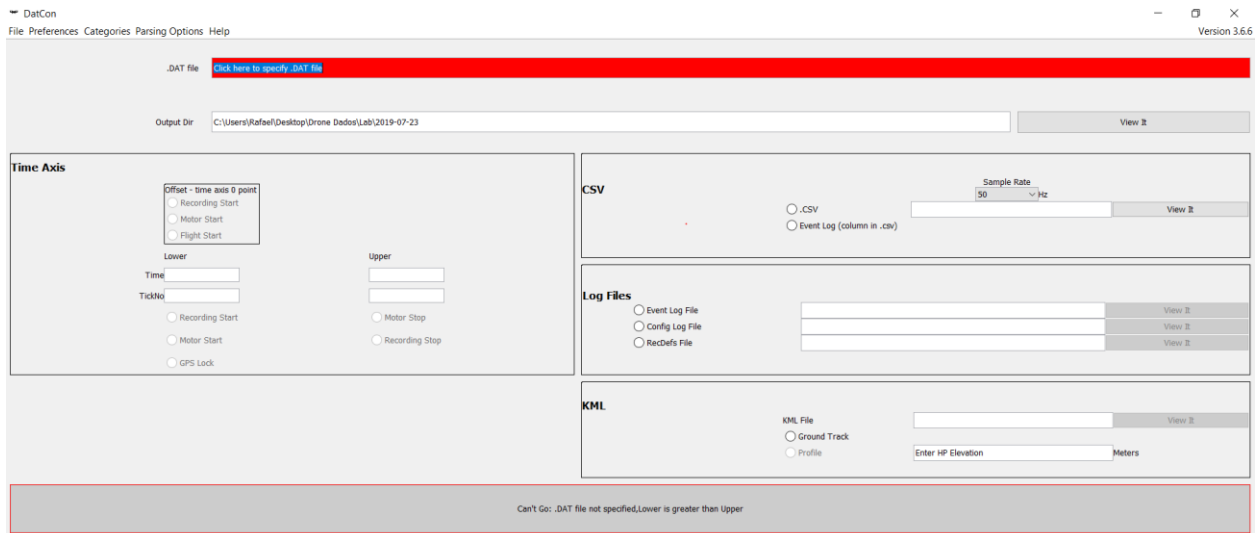


Figura 4.15 - Software DatCon (Autoria própria).

Para extrair os dados, e poder processá-los posteriormente, fez-se o uso do *software DatCon* (Figura 4.15), programa gratuito que permite acesso ao arquivo .DAT, permitindo o salvamento dos registros em arquivo no formato CSV, usado para armazenar dados que pode ser tratado e interpretado em diferentes programas (Figura 4.16).

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8	Column9
Tick#	offsetTime	IMU_ATT(0):Longitude	IMU_ATT(0):Latitude	IMU_ATT(0):numSats	IMU_ATT(0):barometer:Raw	IMU_ATT(0):barometer:Smooth		IMU_ATT
548913209	.000	-8.607786308698222	41.17845110222476	13	64.00491	63.408474	0.034095563	-0.02621
549004922	.020	-8.607786310772605	41.17845110142846	13	63.66141	63.411278	0.033972	-0.02640
549098357	.041	-8.607786312798611	41.17845110056212	13	63.593937	63.408714	0.031042548	-0.02618
549192167	.062	-8.607786314790472	41.1784510997251	13	63.620358	63.406425	0.030643372	-0.01046
549285518	.083	-8.607786316793714	41.178451098645446	13	63.908375	63.40601	0.05581738	-0.08418
549379800	.104	-8.607786319172565	41.178451097328036	13	63.73662	63.403862	0.022008391	0.005170
549472905	.124	-8.607786320581097	41.17845109692743	13	63.591293	63.404243	0.009244638	0.015494
549567321	.145	-8.607786322390844	41.178451095982936	13	63.287426	63.401184	0.04649412	-0.05132
549661423	.166	-8.607786323735391	41.178451094857685	13	63.813244	63.40291	0.06463478	-0.09462
549754946	.187	-8.607786324443287	41.17845108410181	13	63.97179	63.401783	0.011502141	0.013796
549848654	.208	-8.60778631900468	41.178451074011974	13	63.583366	63.401913	0.011679055	0.015062
549942264	.229	-8.607786317439647	41.17845106283596	13	62.97035	63.404957	0.038549922	-0.04248
550035959	.250	-8.607786316025425	41.17845105162575	13	63.583366	63.405727	0.053658575	-0.06542
550129974	.270	-8.607786314756325	41.17845104026084	13	63.54109	63.404823	0.034105208	-0.03478
550233554	.291	-8.607786312898204	41.178451029759	13	63.829105	63.406174	0.008467103	0.029991
550317279	.312	-8.607786311205121	41.17845101876864	13	63.274216	63.405373	0.03872536	-0.04017
550410926	.333	-8.607786309900088	41.17845100722297	13	63.274216	63.405197	0.05038899	-0.05047
550504880	.354	-8.607786308513264	41.17845099582386	13	63.308563	63.402336	0.04262337	-0.05015
550599051	.375	-8.607786306179943	41.178450985877326	13	63.06019	63.40715	0.010328939	0.022266
550692707	.395	-8.607786313771776	41.17845098232895	13	63.16588	63.409027	0.03353069	-0.03169
550786154	.416	-8.607786313697794	41.17845091618318	13	63.342915	63.414684	0.042896405	-0.04595
550879833	.437	-8.60778632177052	41.17845091203553	13	64.21752	63.416878	0.042184144	-0.05135
550973572	.458	-8.607786330005442	41.178450907845544	13	63.615074	63.415237	0.015634807	0.003782
551067472	.479	-8.607786337864757	41.178450904119664	13	63.218727	63.412754	0.022115452	-0.01008
551160913	.499	-8.60778634660049	41.17845089941998	13	63.438038	63.41019	0.044333614	-0.04941

Figura 4.16 - Planilha de registro dos sensores (Autoria própria).

### 4.3.1 Acelerômetro

Os acelerômetros são dispositivos utilizados para a medição de acelerações, ou seja, medem a mudança de velocidade do dispositivo no espaço. Esses acelerômetros utilizam o efeito piezoelétrico, isso é, a

geração de electricidade sobre certos tipos de cristais quando esses são submetidos a esforço. Logo, a aceleração da estrutura de ensaio, é transmitida a uma massa sísmica interna do acelerômetro que gera uma força proporcional em um cristal piezoelétrico. Esse esforço externo no cristal então gera uma carga elétrica de alta impedância proporcional à força aplicada e, assim, proporcional à aceleração (Figura 4.17). A sensibilidade é um dos parâmetros mais importantes para os acelerômetros. Para medir vibrações de alta amplitude, usam-se acelerômetros de baixa sensibilidade. Em contrapartida, usam se acelerômetros de alta sensibilidade para medir vibrações de baixa amplitude.

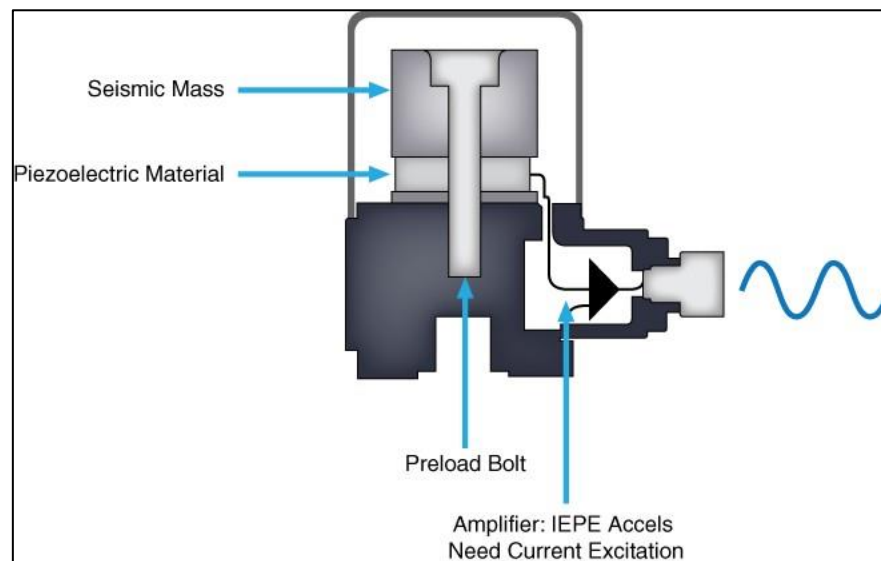


Figura 4.17 – Funcionamento de um acelerômetro (National Instrument, 2019).

Basicamente, os acelerômetros medem a força-g (gravitacional) associada a um eixo de coordenadas e por este motivo é necessária a implementação de 3 acelerômetros, sendo um para cada eixo tridimensional cartesiano, existente na IMU.

A análise e processamento dos dados do acelerômetro possibilita a obtenção dos deslocamentos lineares através da dupla integração, no entanto existe um erro significativo associado a este procedimento que deve ser analisado.

### 4.3.2 Giroscópio

O giroscópio é um sensor que mede a velocidade angular, e é constituído de um rotor suspenso através dum suporte formado por dois círculos articulados que permitem girar em qualquer direção, com uma propriedade; o rotor fica girando sempre na mesma direção espacial, mantendo-se como uma referência vetorial espacial (Figura 4.18). O giroscópio não é utilizado como referência de posição, mas sim, como de referência de direção.

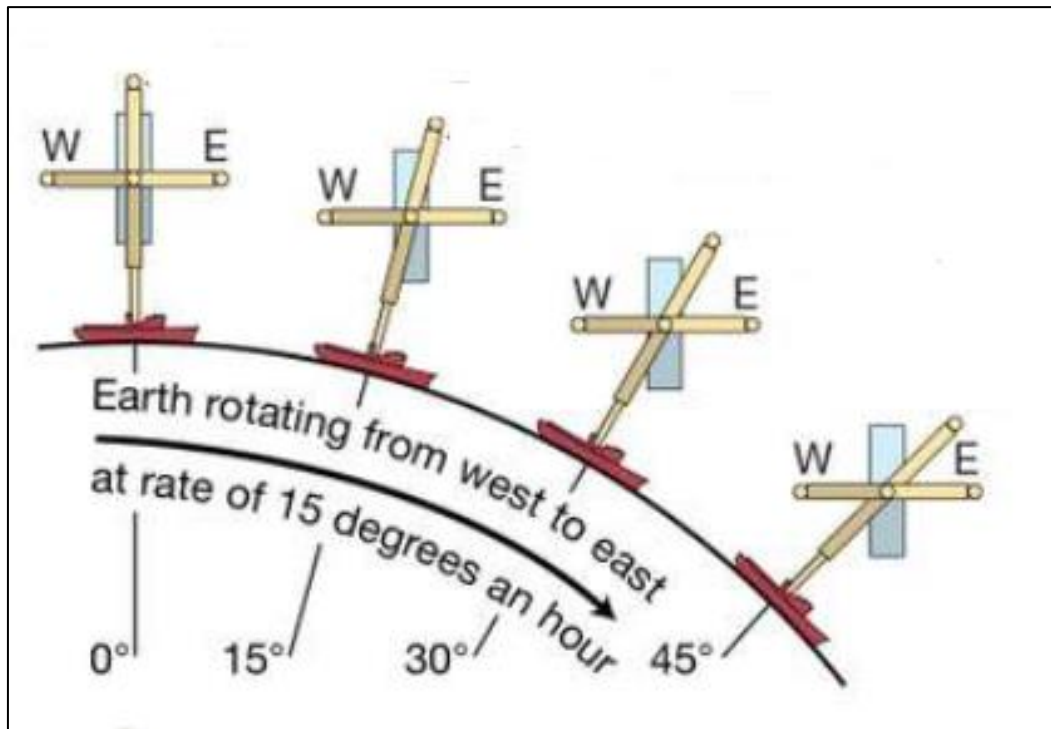


Figura 4.18 - Funcionamento de um giroscópio (Adaptado de Encyclopaedia Britannica, 2019)

Esse sensor é integrado ao IMU e utilizam-se osciladores piezoelétricos que induzem vibração em um eixo. A variação de posição do giroscópio, induz vibração deste eixo em direções diferentes da que foi anteriormente submetido. Essa variação é identificada pela mudança do padrão da tensão elétrica na saída do piezoelétrico, identificando assim as posições dos ângulos nos três eixos que está sendo desenvolvida.

A IMU dispõe de 3 giroscópios, com um rotor girando para cada eixo tridimensional, que medem a taxa de rotação, nomeadamente: roll, pitch e yaw (Figura 4.2).

- (i) roll: rotação em torno do eixo da frente para trás (eixo x).
- (ii) pitch: rotação em torno do eixo lateral (eixo y).
- (iii) yaw: rotação ao redor do eixo vertical (eixo z).

Os giroscópios fornecem leituras diferentes de zero quando houver rotação. No entanto, quando a rotação pára, o giroscópio fica em silêncio.

A análise e processamento dos dados do giroscópio possibilita a obtenção dos deslocamentos angulares através da simples integração, no entanto existe um erro associado a este procedimento de integração.

#### 4.4 ALVO

O alvo baseado em cores vermelhas foi desenvolvido para ser utilizado sob a ferramenta de processamento de imagem, utilizando uma técnica de rastreamento baseado em cores com a utilização de visão computacional e filtros.

O alvo possui dimensões de 10 cm de largura por 10 cm de altura e 9 círculos vermelhos de 1 cm de diâmetro, espaçados conforme mostra a Figura 3.3, as dimensões foram definidas empiricamente e os ensaios demonstraram bons resultados.

A razão de possuir 9 círculos vermelhos espaçados em 3 cm é que estes são utilizados para o cálculo da resolução da imagem. Assim, com mais círculos há uma diminuição de erro associada a este procedimento em busca da melhor resolução.



## CAPÍTULO 5

### DESENVOLVIMENTO DAS FERRAMENTAS

No laboratório de dinâmica nas instalações do ISEP foi criado o *setup*, que permite a realização dos ensaios com as ferramentas desenvolvidas no atual capítulo.

O *setup* é constituído pelos seguintes equipamentos (Figura 5.1):

- Alvo com 9 pontos circulares com diâmetro de 1 cm e distância entre centros dos pontos de 3 cm, colado em uma cantoneira metálica;
- Uma mesa sísmica com frequência de movimento regulável com amplitude fixa de 6.7867 mm;
- Um LVDT, nivelado e sustentado por um tripé;
- Dois acelerômetros piezoelétricos (5g e 10g) (Figura 5.2);
- *Drone* DJI Phantom 4 RTK;
- Câmera Panasonic HC-V380 – 1080p - 50 fps.

A aquisição de sinal dos acelerômetros e do LVDT foram realizada através de um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, via módulos de entrada analógica. Este sistema se conecta a um computador via USB, e permite o salvamento dos registros em arquivo no formato CSV, usado para armazenar dados que pode ser interpretado em diferentes programas.

A câmera que vem embutida ao *drone* não pode ser utilizada nos ensaios, porque é montada num sistema de suspensão e pivotagem (gimbal) com estabilizadores internos, incapazes de serem desligados, fazendo com que os movimentos registados pela câmera sejam diferentes do movimento real do *drone*.

Sendo assim, usa-se uma câmera externa, a Panasonic HC-V380 é conectada ao *drone* por um suporte de alumínio com ligações rígidas, através de abraçadeiras plásticas. Desta forma, foi possível eliminar os deslocamentos relativos entre a câmera e o *drone*.

Também foram utilizadas fitas adesivas para a ligação entre o LVDT e o alvo (cantoneira metálica), para eliminar as perturbações de contato nos deslocamentos medidos.

A razão de utilizar dois acelerômetros com capacidades de registros diferentes, um até 10g e outro até 5g, é analisar o comportamento de ambos na detecção de variações repentinas, isso é, acelerações bruscas em curto espaço de tempo.

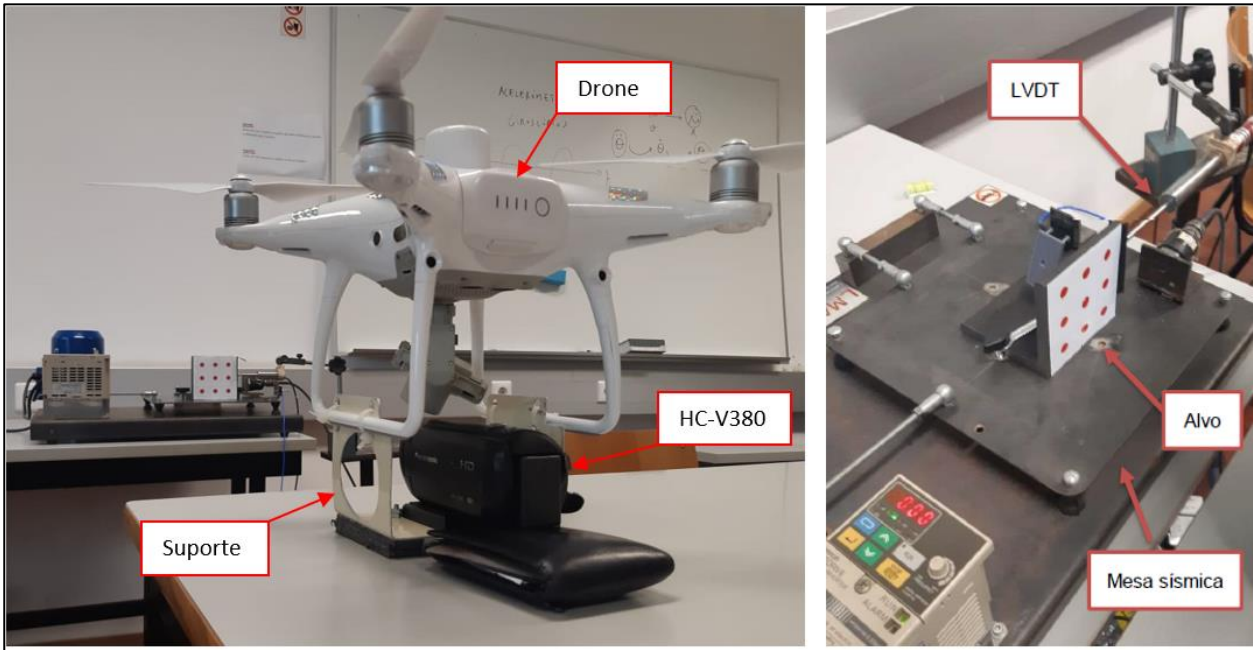


Figura 5.1 - Configuração do ensaio 1 (acervo do autor).

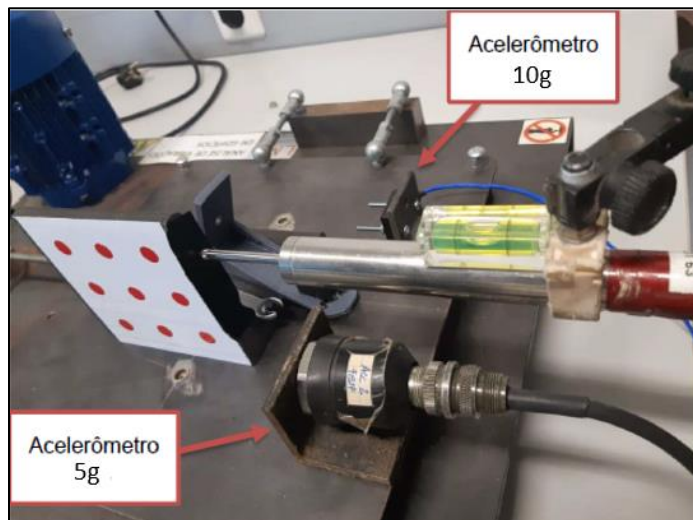


Figura 5.2 – Nivelamento do LVDT (acervo do autor).

Com a configuração do *setup*, houve uma visão pormenorizada das ferramentas que devem ser desenvolvidas, para o processamento do rastreamento do alvo e dos registros dos acelerômetros.

As ferramentas que serão detalhadas abaixo, foi efectuado no *software* MATLAB (*MATrix LABORatory*) desenvolvido por MathWorks Inc. Trata-se de um *software* interativo de alta performance dedicado ao cálculo numérico.

Tanto o *script* do processamento de imagem quanto o de processamento de sinais foram desenvolvidos utilizando este *software*, estão em anexo neste trabalho.

## 5.1 PROCESSAMENTO DE IMAGEM

A metodologia de rastreamento por filmagem baseada em cor apresentada por Fernandes (2015), na seção 2.3, foi utilizada neste trabalho. O algoritmo faz o rastreamento do objeto através de uma cor pré-definida presente no *frame* (cena ou quadro) provinda de um sensor ótico, como uma câmera, no entanto não registra o deslocamento, sendo assim foi criado um algoritmo genérico de rastreamento presente no anexo I.

A segmentação da imagem identifica em cada *frame*, a posição do objeto com um par de coordenadas na matriz de pixels da imagem. No caso da câmera Panasonic HC – V380, a imagem é *full HD*, isto é, apresenta uma resolução de 1920x1080 *pixels*. A Figura 5.3 apresenta uma imagem da aquisição do alvo durante os ensaios efectuados. As coordenadas têm como referencial de origem o canto superior esquerdo. A estratégia mais simples para a identificação do objeto em uma cena é conhecida por limiarização. A limiarização é uma das abordagens mais importantes da segmentação de imagens que consiste em criar duas regiões na imagem, o *background* (*plano de fundo*) e o *target* (objeto).

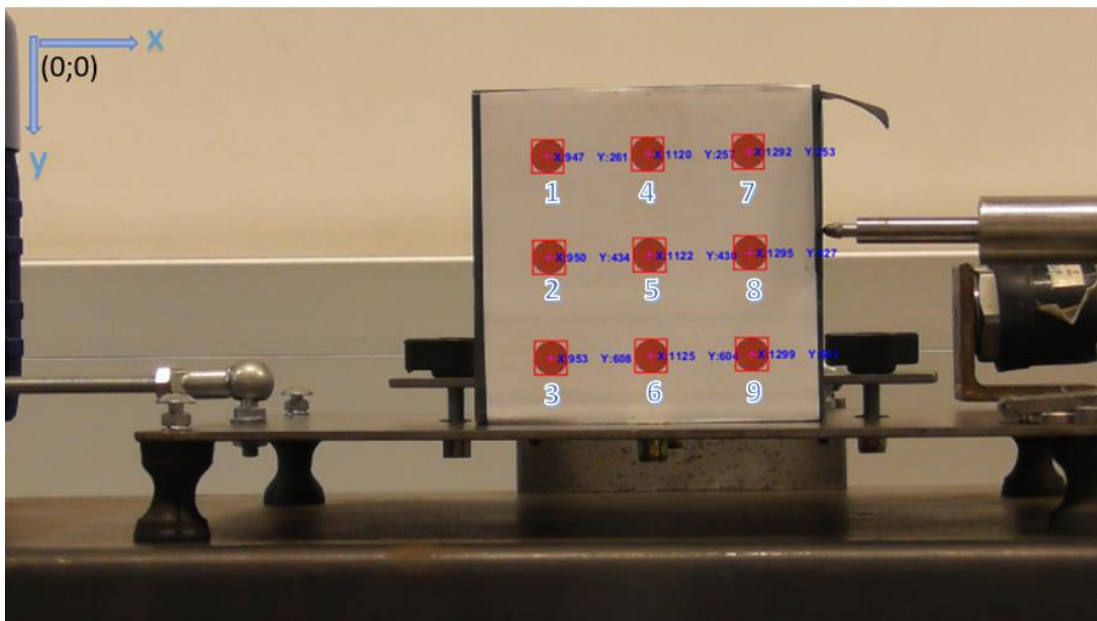


Figura 5.3 - Coordenadas do objeto de rastreo (acervo do autor).

As imagens serão trabalhadas no espaço RGB (*Red*, *Green* e *Blue*), porque esse espaço de cores demonstra ser computacionalmente menos custoso, pela razão de os dispositivos de aquisição já trabalharem nesse espaço sem necessidade de transformação. Assim as imagens obtidas pelo dispositivo de captura são em

geral formadas por três canais de cores, representadas por matrizes. Em cada matriz as entradas correspondem à intensidade de cada canal, *Red*, *Green* e *Blue* para cada pixel.

Como nosso alvo é vermelho (Figura 5.4), a estratégia de limiarização adotada foi subtrair das cenas os canais de cores *green* e *blue*. É considerado um valor limiar (*threshold*), de forma que os objetos identificados devem ter valores em *pixels* superiores ao valor limiar para serem considerados como parte do objeto a ser rastreado. O valor limiar é obtido empiricamente, através de vários ensaios, para chegar no valor ideal para as condições de iluminação no qual a câmera se encontrava no momento da implementação.

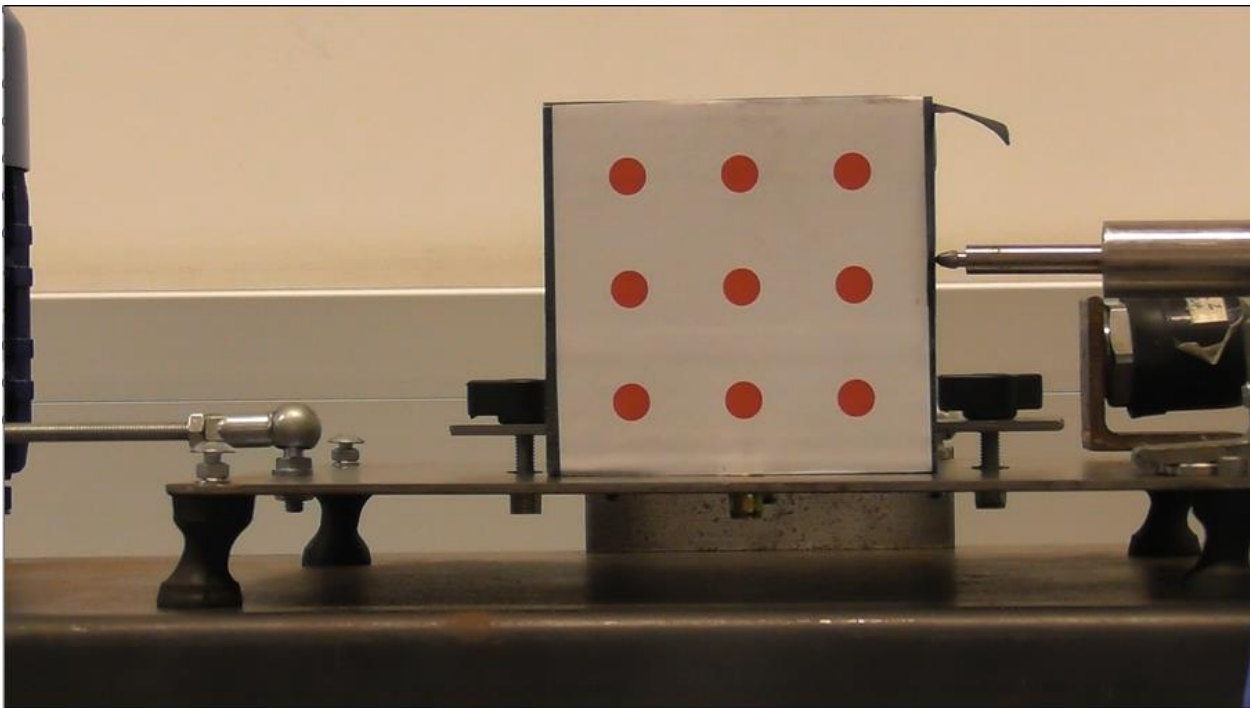


Figura 5.4 – Imagem da aquisição do alvo durante os ensaios efectuados (acervo do autor).

O resultado da limiarização é a obtenção de uma imagem binária, onde os pixels possuem valores de 0 ou 1, resultando em uma imagem do tipo preto e branco (Figura 5.5), no qual a região branca representa o objeto vermelho presente na cena.

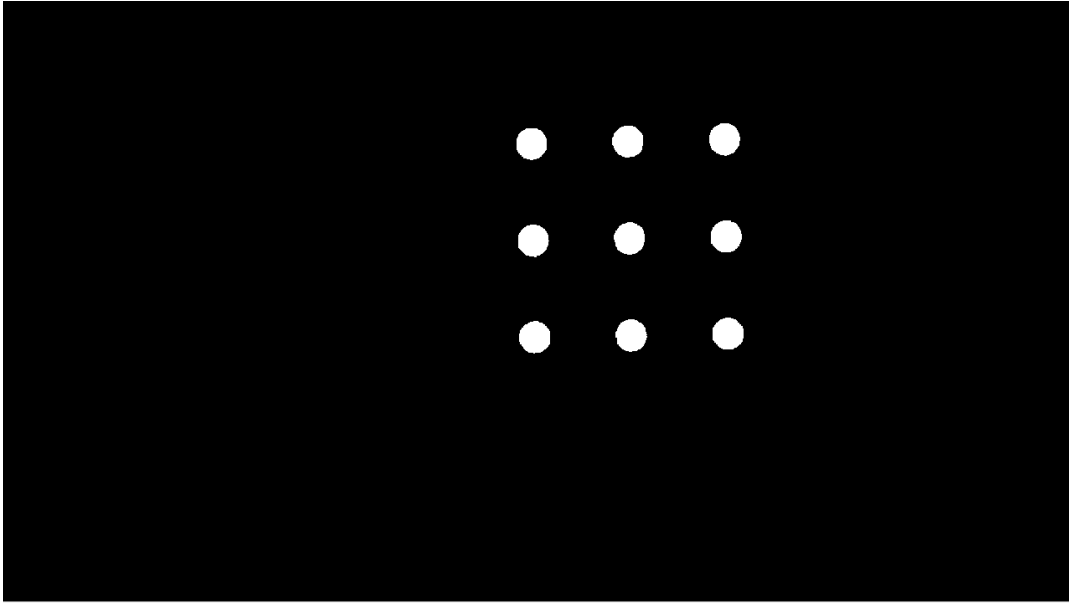


Figura 5.5 – Resultado da limiarização do frame (acervo do autor).

Com a imagem binária, rastreiam-se os objetos formados por pixels brancos, registrando as coordenadas do centróide. No caso em estudo são 9 pares de coordenadas por *frame*. Para melhor visualização, o rastreio da imagem binária é sobreposto sobre a imagem original (Figura 5.3).

Sabendo que a distância entre os círculos vermelhos do alvo é de 30 mm, é possível calcular a resolução da imagem em milímetros (mm) por pixel em cada *frame*, com  $i$  variando de 1 a 6, segundo as equações:

$$r_x = \frac{30}{X_{i+3} - X_i} \quad (5.1)$$

$$r_y = \frac{30}{Y_{i+1} - Y_i}; i \neq 3; i \neq 6; \quad (5.2)$$

Onde:

$r_x$  — é a resolução calculada no eixo x.

$r_y$  — é a resolução calculada no eixo y.

$X_i$  — é a coordenada do centróide no eixo x do objeto  $i$ .

$Y_i$  — é a coordenada do centróide no eixo y do objeto  $i$ .

No total, serão calculadas 12 resoluções e dessas serão descartadas os *outliers* (valores atípicos). O primeiro filtro a ser aplicado é descartar os valores que são maiores ou menores que 3 vezes o desvio absoluto médio (DAM) em relação à mediana, e o segundo é realizar a média das resoluções consideradas, definindo a resolução do *frame*.

O cálculo do desvio absoluto médio em relação à mediana e a da resolução considerada no *frame*, pode ser expresso por:

$$DAM = \frac{\sum r - \bar{r}}{n} \quad (5.3)$$

$$r_f = \frac{\sum r}{n}; \quad (5.4)$$

Onde:

$DAM$  — é o desvio absoluto médio.

$r$  — é as amostras de resoluções calculadas em um *frame*.

$\bar{r}$  — é a resolução mediana do *frame*.

$n$  — é o número de amostras.

$r_f$  — é a resolução a considerar no *frame*.

Desde que a resolução do *frame* é conhecida, o rastreamento do deslocamento do alvo se inicia, a partir da subtração das coordenadas dos objetos no *frame* atual com o anterior, resultando no deslocamento em pixels que pode ser convertido para medida métrica ao multiplicar pela resolução do *frame* atual.

Com essas considerações se obteve os melhores resultados do rastreamento do alvo na validação com um LVDT, realizado no ensaio 1.

## 5.2 PROCESSAMENTO DE SINAL

Nessa seção, será detalhado o desenvolvimento da ferramenta de processamento de sinal para obtenção do deslocamento a partir de registros dum acelerômetro, adotando como base a metodologia de Rocha *et al.* (2016), cujo fluxograma está apresentado na Figura 2.11. Sendo assim o algoritmo genérico foi criado e segue presente no anexo II.

Para análise e processamento de dados, foi criada uma função conhecida de deslocamento, Equação (5.7), na qual a função de aceleração pode ser obtida analiticamente, fazendo a operação de dupla derivada, Equação (5.5). Para validação da ferramenta, deseja-se a concordância das curvas da função de deslocamento analítica e da função de deslocamento calculada pela ferramenta a partir da equação de aceleração.

Existem muitos métodos na literatura para obter a integração numérica de um sinal, como a regra do retângulo, trapézio, Simpson, etc. Neste trabalho foi considerada a regra do trapézio para definir a integração numérica, por ser fácil de implementar e fornecer uma boa precisão para altas taxas de aquisição (Rocha *et al.*, 2016).

Os ensaios serão feitos com diferentes frequências e ciclos, permitindo obter um algoritmo o mais genérico possível. As equações que permitem obter as grandezas em jogo, são expressas por:

$$a(t) = \sin(2.\pi.f.t) \quad (5.5)$$

$$v(t) = -\frac{1}{(2.\pi.f)} \cos(2.\pi.f.t) \quad (5.6)$$

$$s(t) = -\frac{1}{(2.\pi.f)^2} \sin(2.\pi.f.t) \quad (5.7)$$

Onde:

$a(t)$  — é a aceleração em função do tempo

$v(t)$  — é a velocidade em função do tempo

$s(t)$  — é o deslocamento em função do tempo

$t$  — é o tempo em segundos.

$f$  — é a frequência em Hertz (Hz).

Nas Figura 5.6 e Figura 5.7, as equações da aceleração e do deslocamento, Equações (5.5) e (5.7) são traçadas, respectivamente, considerando a frequência de 0.5 Hz.

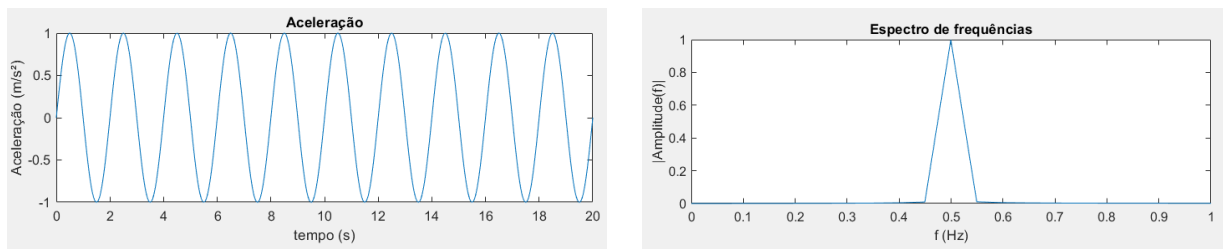


Figura 5.6 – Aceleração analítica e seu espectro de frequência.

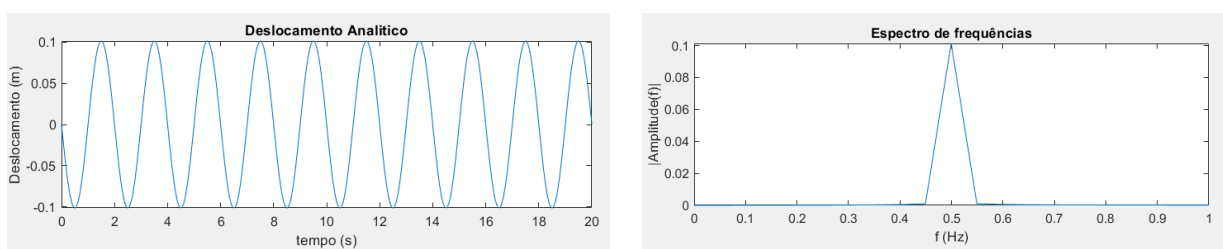


Figura 5.7 – Deslocamento analítico e seu espectro de frequência.

Com o objetivo de testar a ferramenta de integração, a aceleração é duplamente integrada (azul) e comparada com a resposta analítica esperada (laranja) (Figura 5.8).

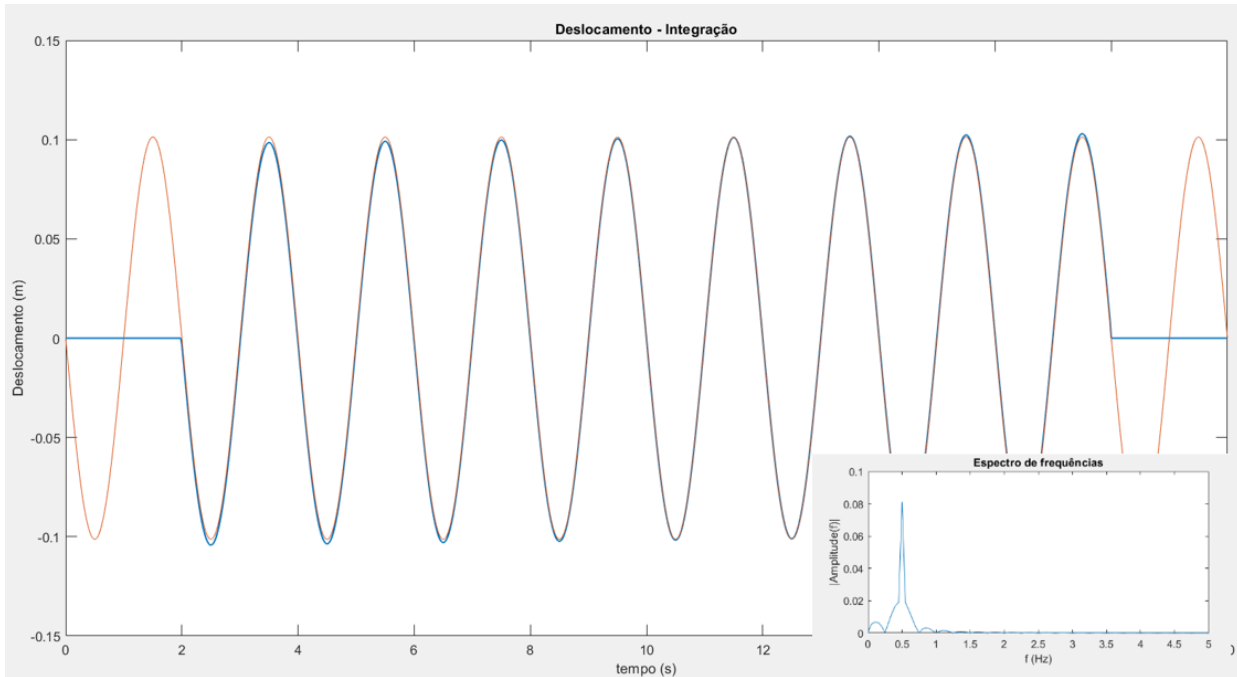


Figura 5.8 – Deslocamento comparado e seu espectro de frequência.

Para aferir o erro entre as curvas é feito o RMSE desprezando as extremidades onde é realizado o truncamento num trecho de dois segundos, o RMSE calculado é 0.0016 unidades.

O RMSE é definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(R-C)^2}{n}} \tag{5.8}$$

Onde:

$R$  — é o elemento da curva de referência.

$C$  — é o elemento da curva de calculada.

$n$  — é o número total de elementos.

$RMSE$  — é a raiz do erro médio quadrático da diferença entre o mensurado e o valor calculado

Para melhor avaliar a ferramenta e simulando um caso prático foram acrescentados ruídos ao sinal com frequências de 2 Hz, 7 Hz e 9 Hz, resultando no registro de aceleração da Figura 5.9.

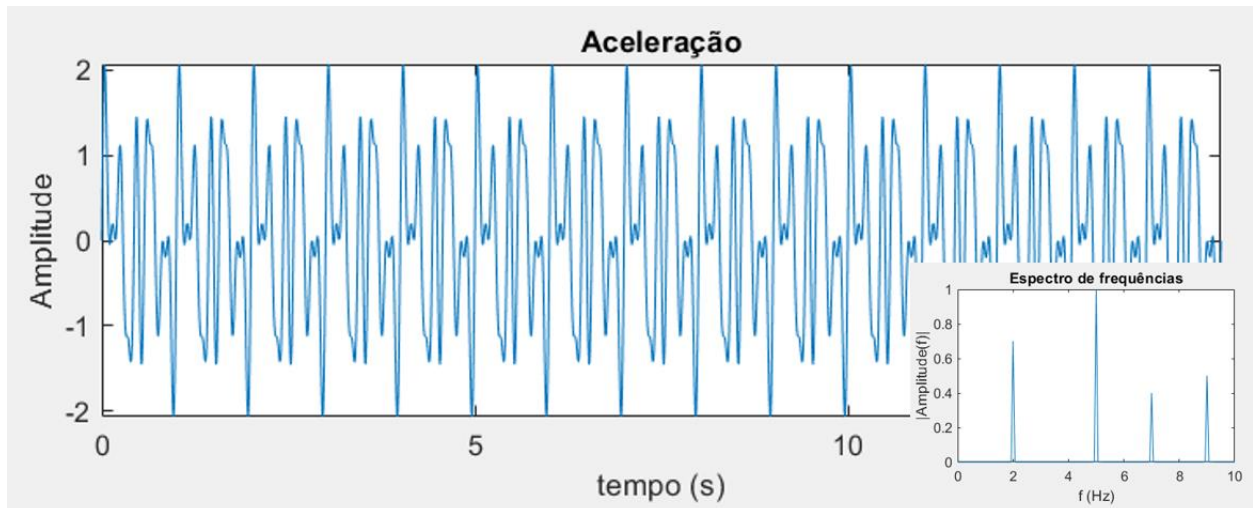


Figura 5.9 – Registro de aceleração com ruídos acrescentados e seu espectro de frequências.

A frequência de interesse é a de 5 Hz. Para a isolar será passado um filtro passa alto e passa baixo com frequências de corte iguais a 4 Hz e 6Hz, respectivamente.

No MATLAB para inserir a frequência de corte ao filtro é necessário normalizá-la, isto é, dividir pela frequência de Nyquist, definida pelo teorema de amostragem sendo a metade da frequência de amostragem (5kHz).

$$\frac{4}{2500} = 0.0016 \quad (5.9)$$

$$\frac{6}{2500} = 0.0024 \quad (5.10)$$

Os filtros apresentam-se nas Figura 5.10 e Figura 5.11 com a frequência de corte destacada.

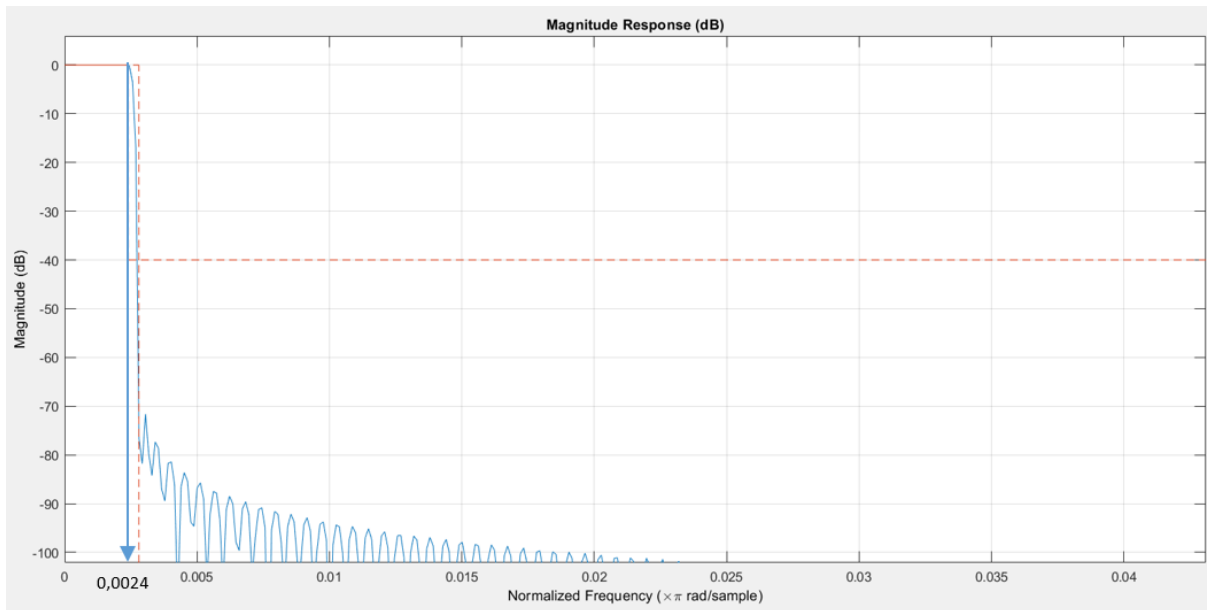


Figura 5.10 – Filtro Passa Baixo com frequência de corte de 6 Hz.

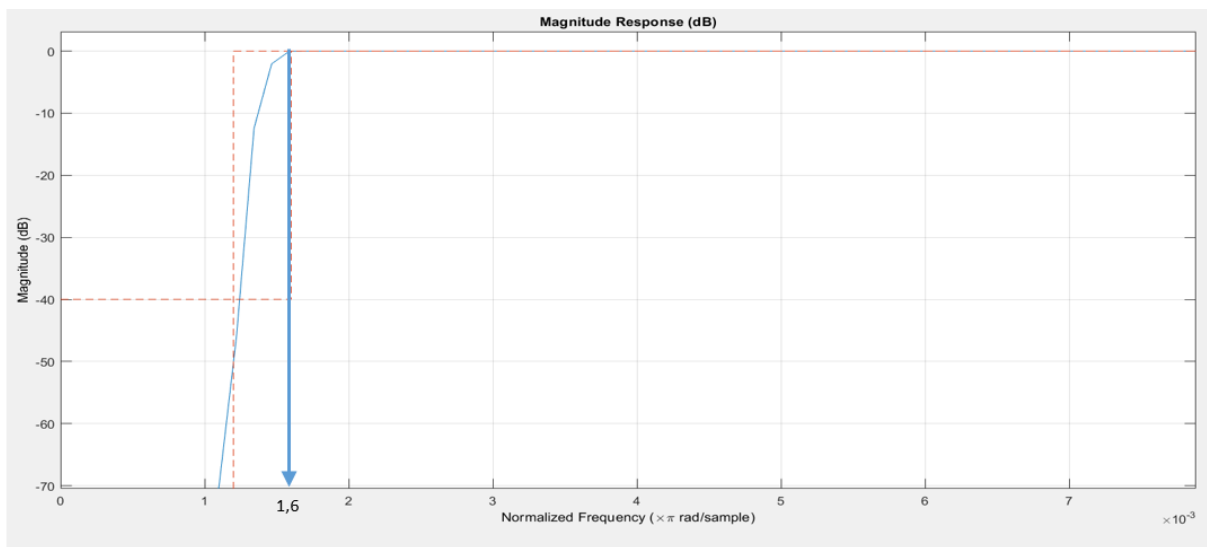


Figura 5.11 – Filtro Passa Alto com frequência de corte de 4 Hz.

Com os filtros criados, a metodologia de Rocha *et al.* (2016) é aplicada ao registro de aceleração para obtenção do deslocamento (azul) e posteriormente é comparado (Figura 5.12) com o deslocamento analítico (laranja). Desprezando o truncamento nas extremidades, o RMSE neste estudo foi de 0.00000068, comprovando que há excelente concordância entre as curvas e que a metodologia é consequentemente aplicável.

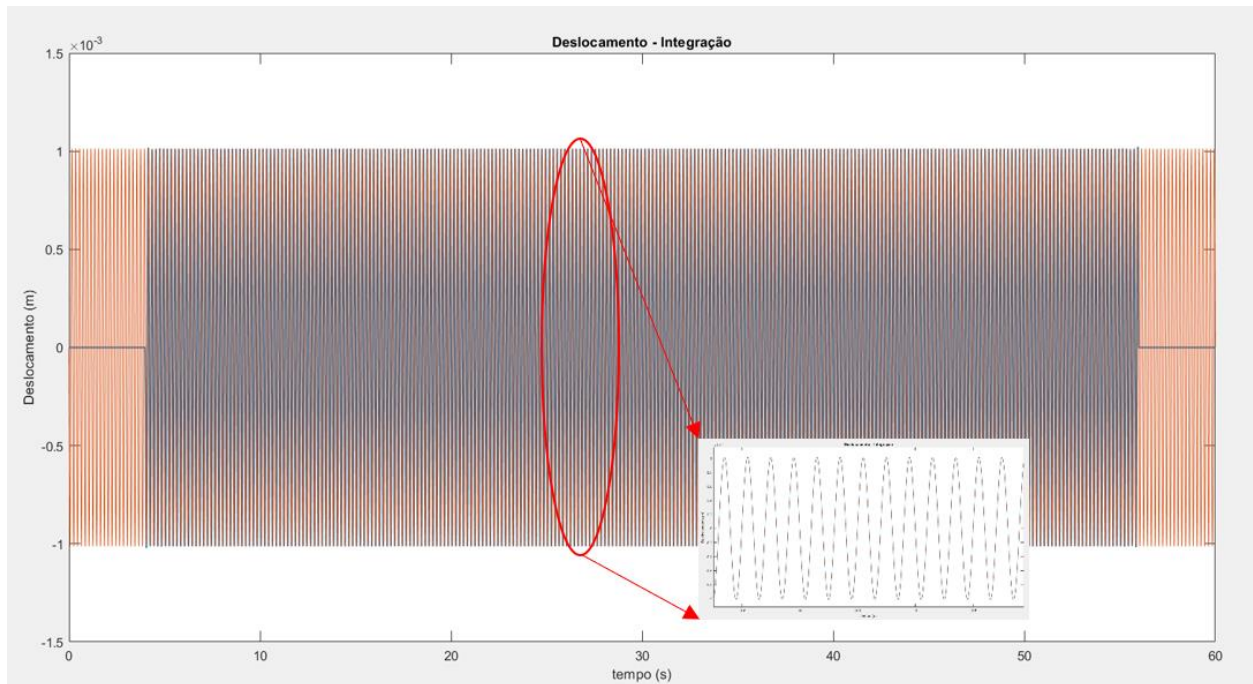


Figura 5.12 - Deslocamento com eliminação dos ruídos

Os bons resultados do desenvolvimento destas ferramentas, tanto na de processamento de imagem quanto na de processamento de sinal, permitiram avançar no trabalho e permitiram a realização dos ensaios que seguem no capítulo 6.



## CAPÍTULO 6

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com as ferramentas desenvolvidas descritas no Capítulo 5. foram iniciados os ensaios para validação da metodologia. O primeiro ensaio a ser feito corresponde à configuração com o alvo em movimento e o *drone* estacionário, o segundo corresponde ao alvo estacionário com o *drone* em movimento e o terceiro e último, caso a ferramenta seja validada no ensaio 2. uma aplicação prática na torre de telecomunicações do Monte da Virgem.

#### 6.1 ENSAIO 1: CÂMERA ESTACIONÁRIA E ALVO EM MOVIMENTO

Foram realizados quatro ensaios na mesa sísmica, para três frequências ( $f$ ) conhecidas e um ensaio com frequências variáveis.

Usando a ferramenta de processamento de imagens baseado em cores, os resultados obtidos a partir do rastreamento do alvo (Figura 6.1), foram comparados com os medidos pelo LVDT no que respeita à amplitude dos deslocamentos e com os registros dos dois acelerômetros no que respeita a acelerações .

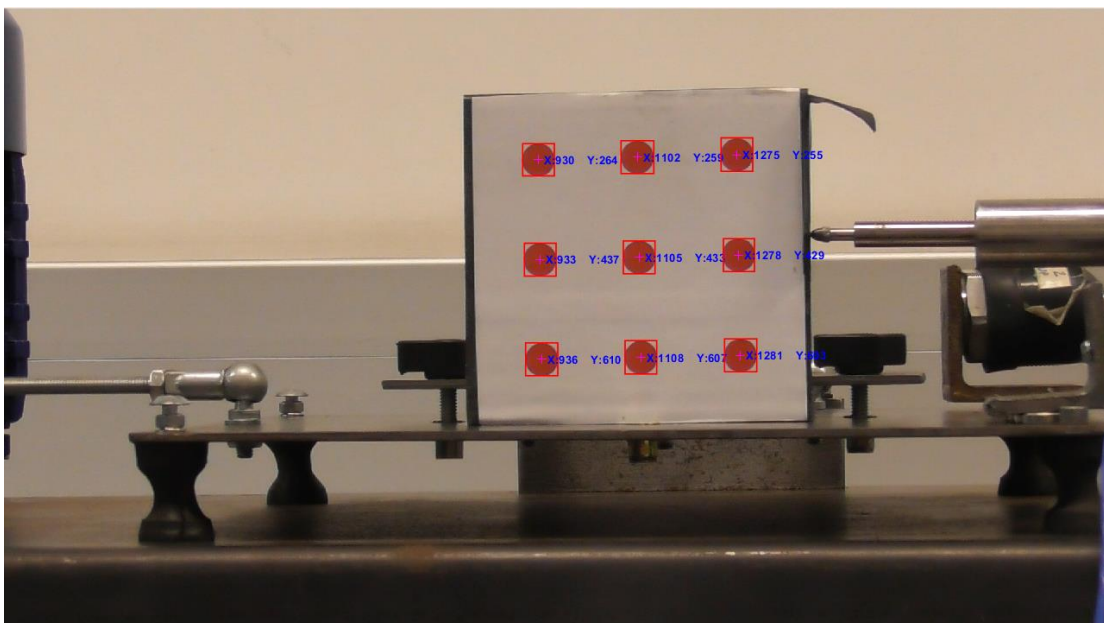


Figura 6.1 – Vídeo utilizado para fazer o rastreamento do alvo (acervo do autor).

Os sensores possuem taxa de aquisição de 2048 amostras por segundo, enquanto a câmera faz a aquisição em 50 amostras por segundo. Contudo, os deslocamentos mensurados foram sincronizados, processados e sobrepostos, tendo sido também realizada uma análise no domínio da frequência a partir dos deslocamentos mensurados pela câmera, apresentados na Figura 6.2, Figura 6.5, Figura 6.8, Figura 6.11 e Figura 6.14.

Com objetivo de aferir o erro entre as curvas dos registros do rastreamento da câmera e dos acelerômetros de 10g e 5g processados, mantendo como referência o mensurado pelo LVDT, desprezou-se os trechos de distorção nas extremidades como mostrado na Figura 6.3, Figura 6.6, Figura 6.9, Figura 6.12 e Figura 6.15 e calculou o RMSE como apresentado na Figura 6.4, Figura 6.7, Figura 6.10, Figura 6.13 e Figura 6.17.

No primeiro ensaio feito a mesa sísmica foi colocada em movimentos oscilatórios com uma frequência de 0.54 Hz.

Foram utilizados filtro passa alto e passa baixo, com frequência de corte, 0.4 Hz e 0.6 Hz, respectivamente.

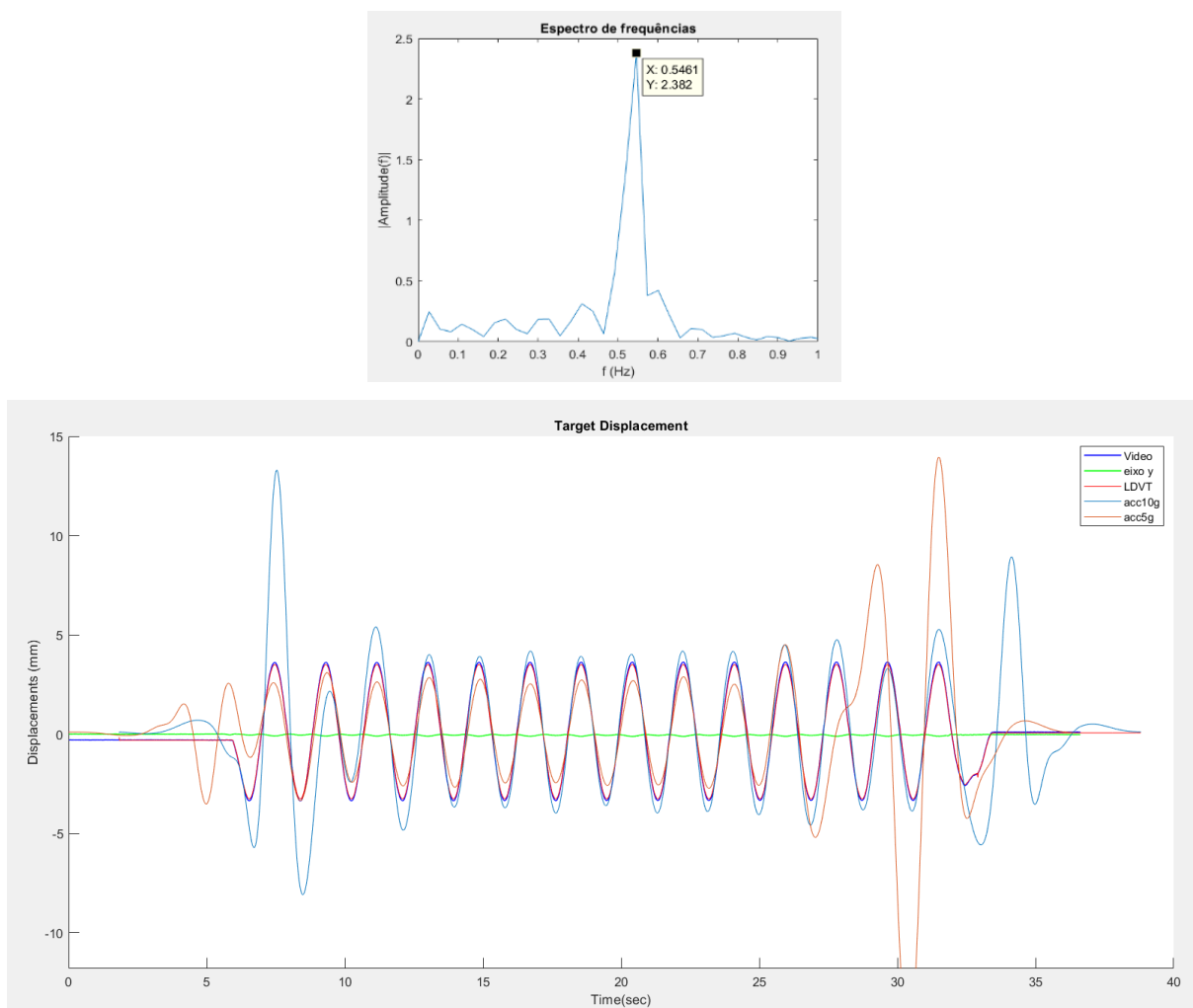


Figura 6.2 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para  $f=0.54\text{Hz}$ .

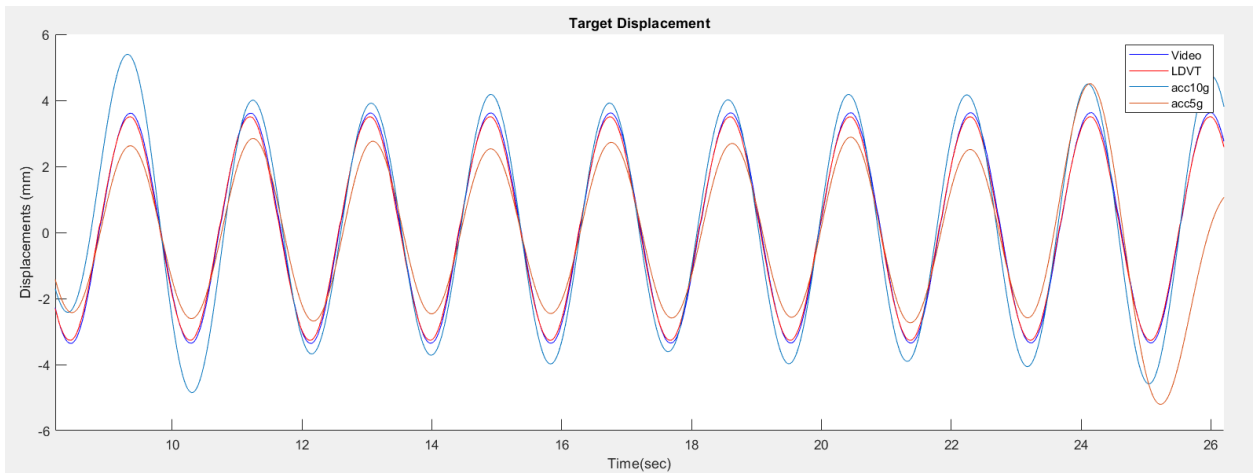


Figura 6.3 –Deslocamentos medidos para f=0.54Hz.

O RMSE encontrado foi (Figura 6.4):

0.1077 mm para o mensurado na filmagem;

0.7568 mm para o acelerômetro de 10g;

1.0391 mm para o acelerômetro de 5g;

0.1452 mm/px é resolução média da câmera.

```

RMSE_video = RMSE_acc5 =
    0.1077      1.0391

RMSE_acc10 = ans =
    0.7568      0.1452
    
```

Figura 6.4 – Resultados MATLAB f= 0.54 Hz.

O segundo ensaio feito, foi a mesa sísmica em movimentos oscilatórios com uma frequência de 0.76 Hz.

Foram utilizados filtro passa alto e passa baixo, com frequência de corte, 0.6 Hz e 0.8 Hz, respectivamente.

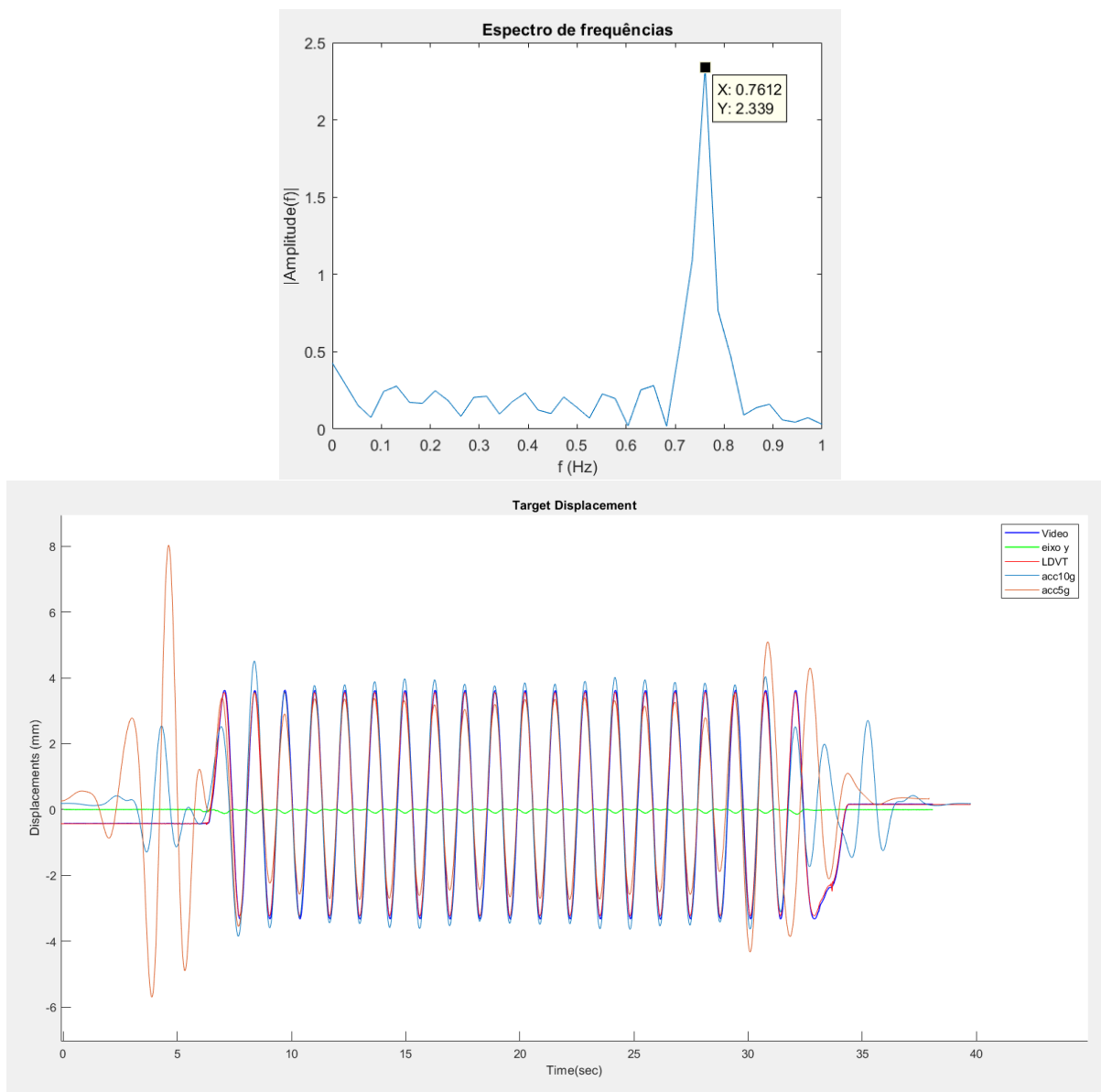


Figura 6.5 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para  $f=0.76\text{Hz}$ .

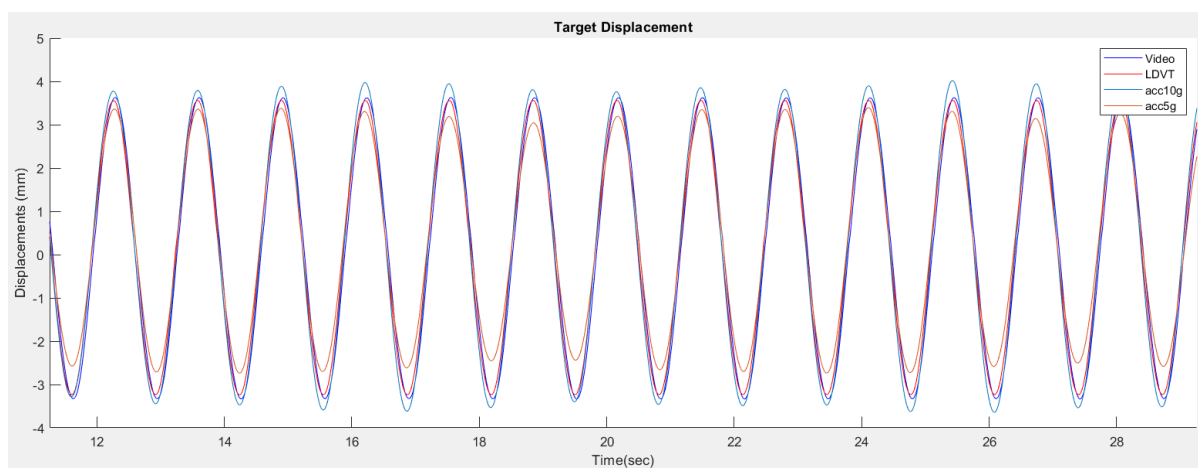


Figura 6.6 – Deslocamentos medidos para  $f=0.76\text{Hz}$ .

O RMSE encontrado foi (Figura 6.7):

0.0777 mm para o mensurado na filmagem;

0.2395 mm para o acelerômetro de 10g;

0.3640 mm para o acelerômetro de 5g;

0.1442 mm/px é resolução média da câmera.

RMSE_video =	RMSE_acc5 =
0.0777	0.3640
RMSE_acc10 =	Resolucao =
0.2395	0.1442

Figura 6.7 – Resultados MATLAB  $f = 0.76$  Hz.

O terceiro ensaio feito, a mesa sísmica foi colocada em movimentos oscilatórios com uma frequência de 1.09 Hz.

Foram utilizados filtro passa alto e passa baixo, com frequência de corte, 0.9 Hz e 1.2 Hz, respectivamente.

Nota-se na Figura 6.9, após o uso da ferramenta de processamento de sinal ambos acelerômetros possuem distorções em seus registros de deslocamento, destacado na imagem com linhas pretas. Há uma suposição que ocorreu devido aos acelerômetros registrarem alguma ação externa próximo da frequência em estudo, e os filtros não obtiveram êxito no processamento.

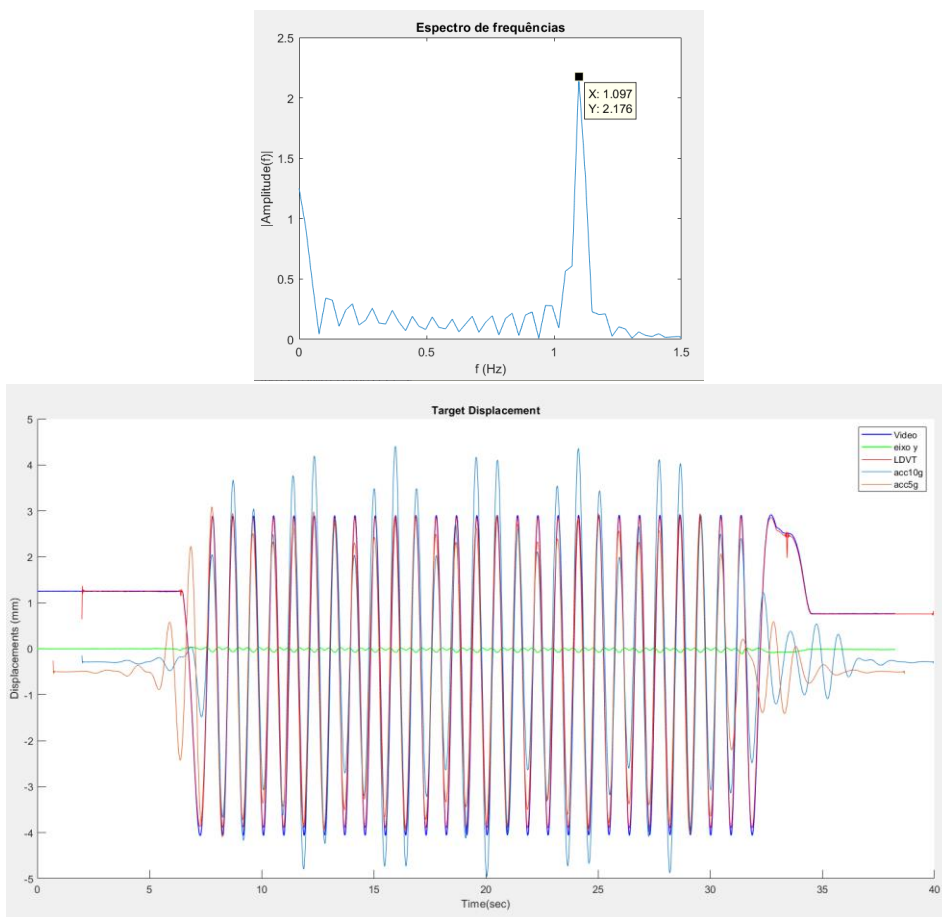


Figura 6.8 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para  $f=1.09$  Hz.

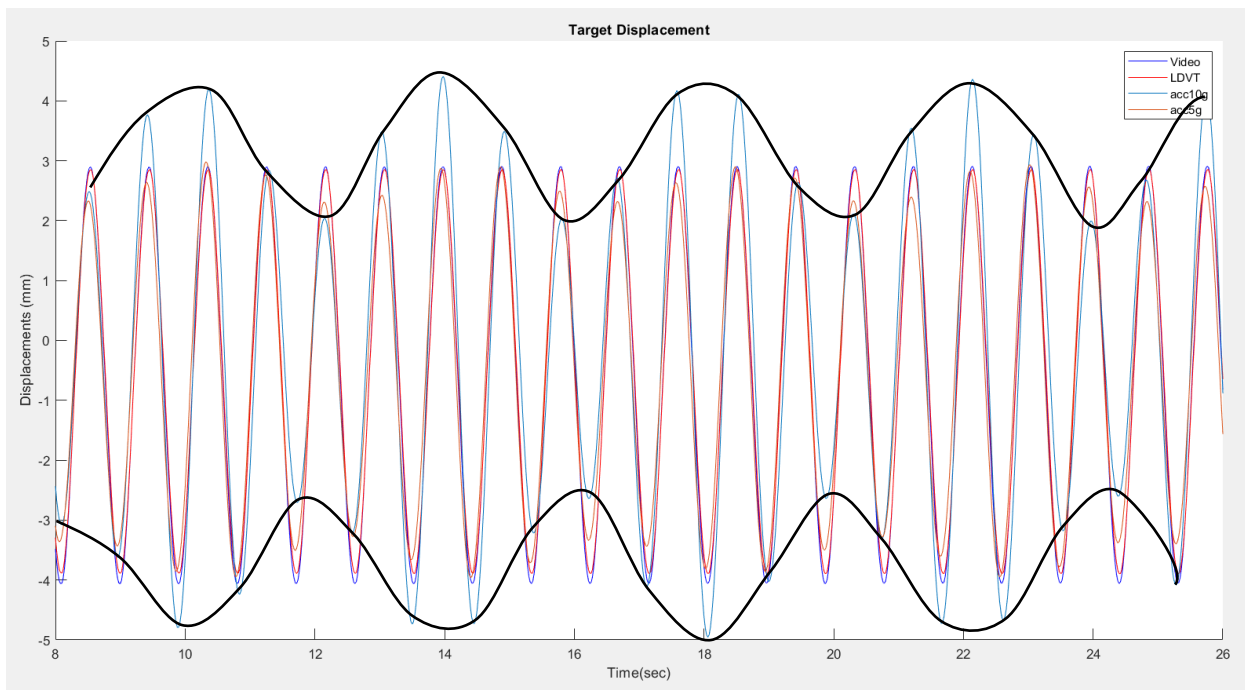


Figura 6.9 – Deslocamentos medidos para  $f=1.09$  Hz. .

O RMSE encontrado foi (Figura 6.10):

0.1120 mm para o mensurado na filmagem;

0.8662 mm para o acelerômetro de 10g;

0.5291 mm para o acelerômetro de 5g;

0.1452 mm/px é resolução média da câmera.

RMSE_video =	RMSE_acc5 =
0.1120	0.5291
RMSE_acc10 =	Resolucao =
0.8662	0.1452

Figura 6.10 – Resultados MATLAB f= 1.09 Hz.

O quarto ensaio realizado, a mesa sísmica foi colocada em movimentos oscilatórios com uma frequência de 2.18 Hz.

Foram utilizados filtro passa alto e passa baixo, com frequência de corte, 2.0 Hz e 2.3 Hz, respectivamente.

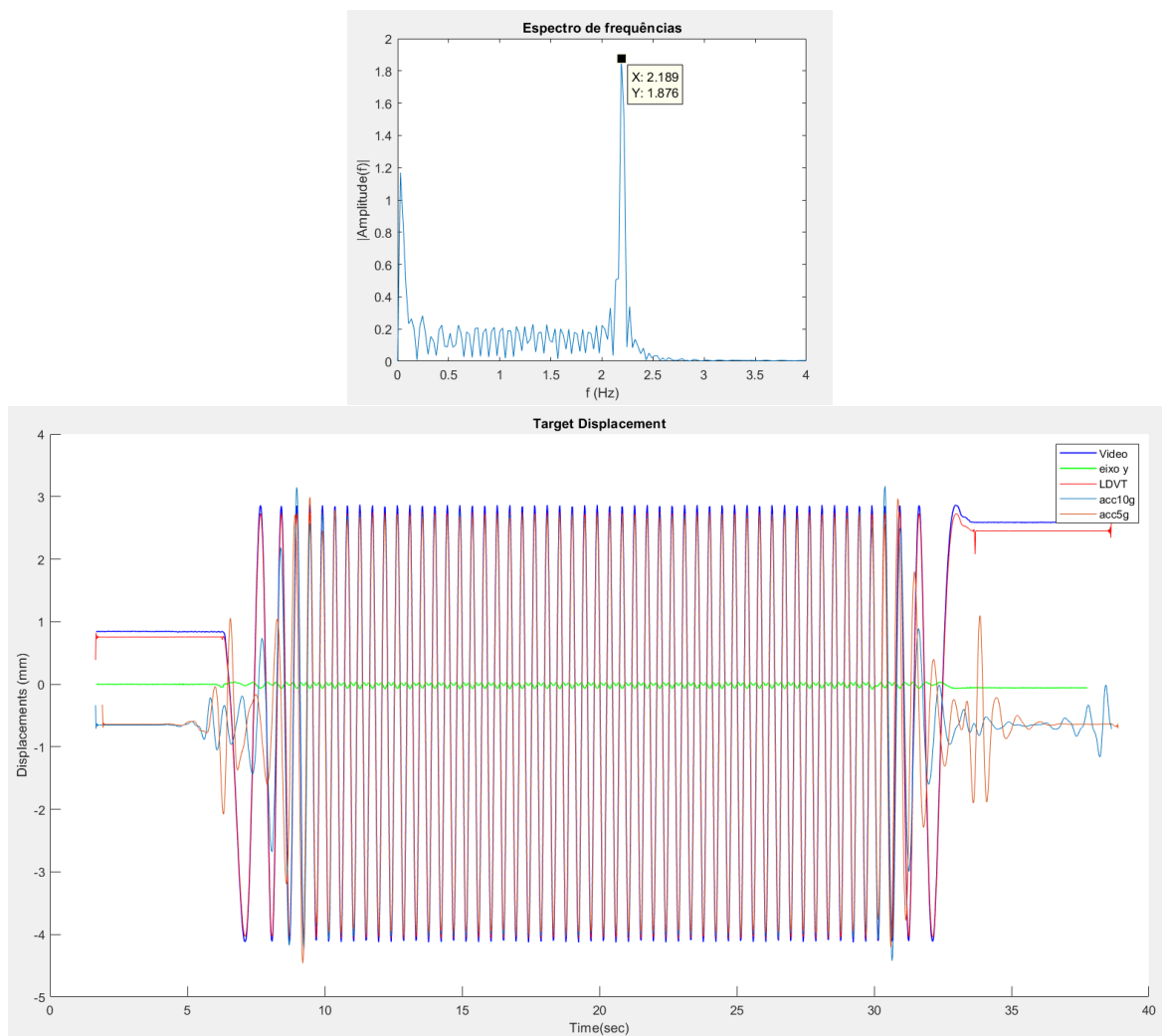


Figura 6.11 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para  $f=2.18$  Hz.

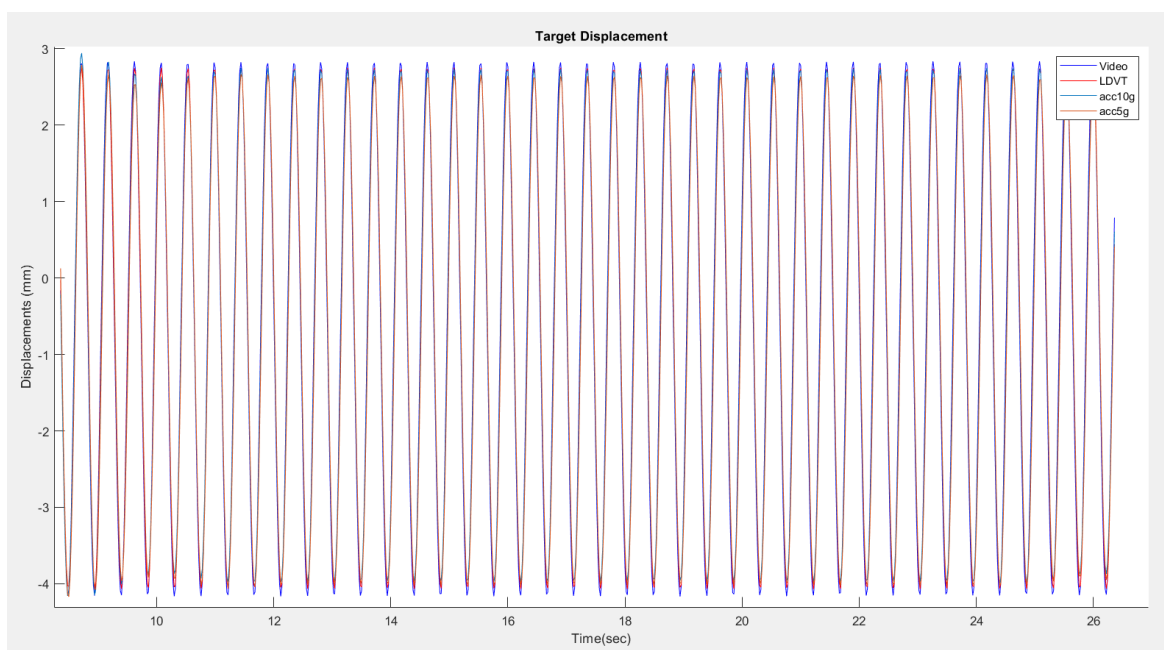


Figura 6.12 –Deslocamentos medidos para  $f=2.18$  Hz.

O RMSE encontrado foi (Figura 6.13):

0.1855 mm para o mensurado na filmagem;

0.0730 mm para o acelerômetro de 10g;

0.1607 mm para o acelerômetro de 5g;

0.1451 mm/px é resolução média da câmera.

```

RMSE_video = RMSE_acc5 =
    0.1855      0.1607

RMSE_acc10 = Resolucao =
    0.0730      0.1451
  
```

Figura 6.13 – Resultados MATLAB f= 2.18 Hz.

Por fim, no último ensaio feito, a mesa sísmica foi colocada em movimentos oscilatórios com frequência variável.

Foram utilizados filtro passa alto e passa baixo, com frequência de corte, 0.4 Hz e 5.0 Hz, respectivamente.

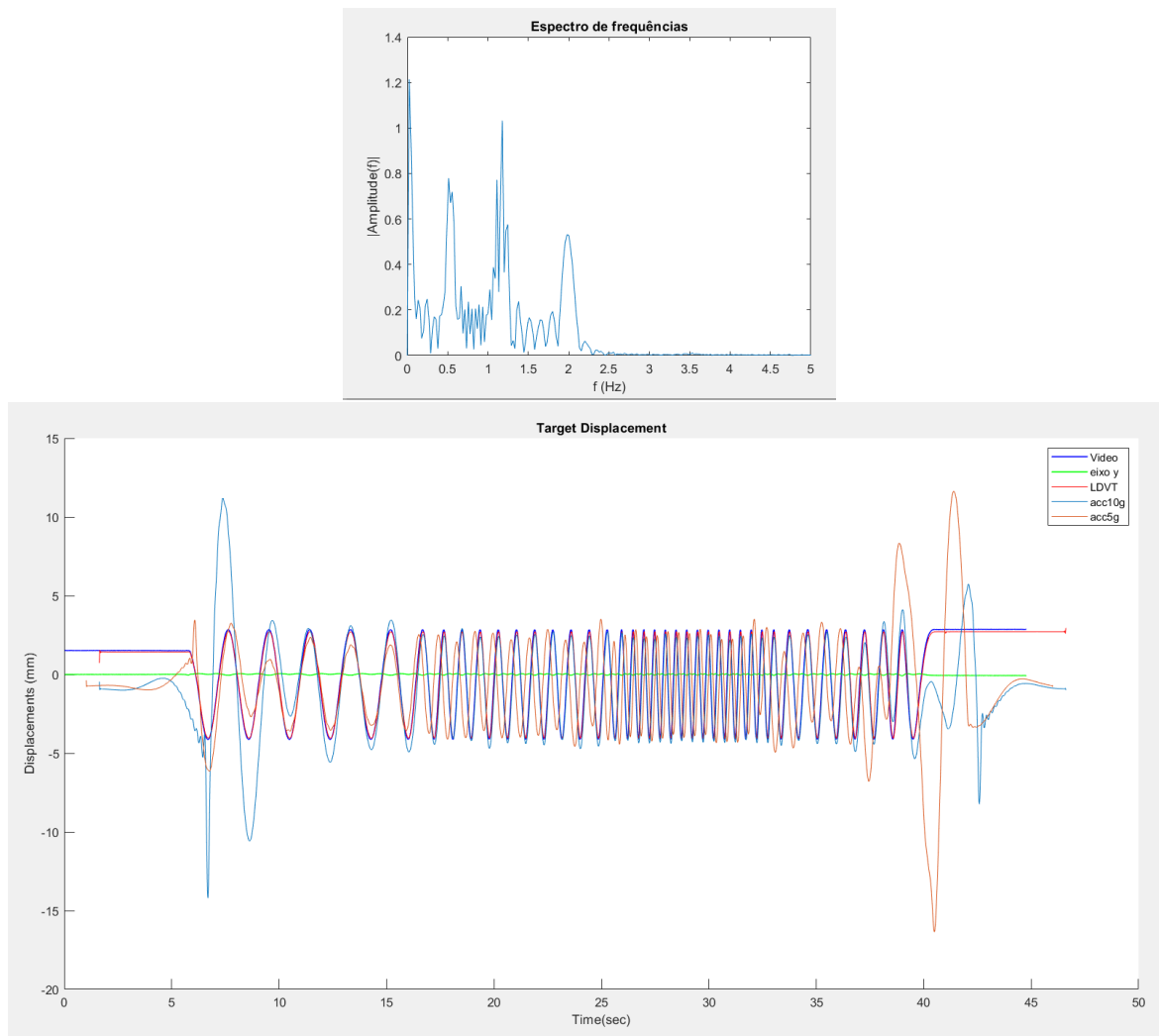


Figura 6.14 – Espectro de frequências e deslocamentos medidos para frequência alternada.

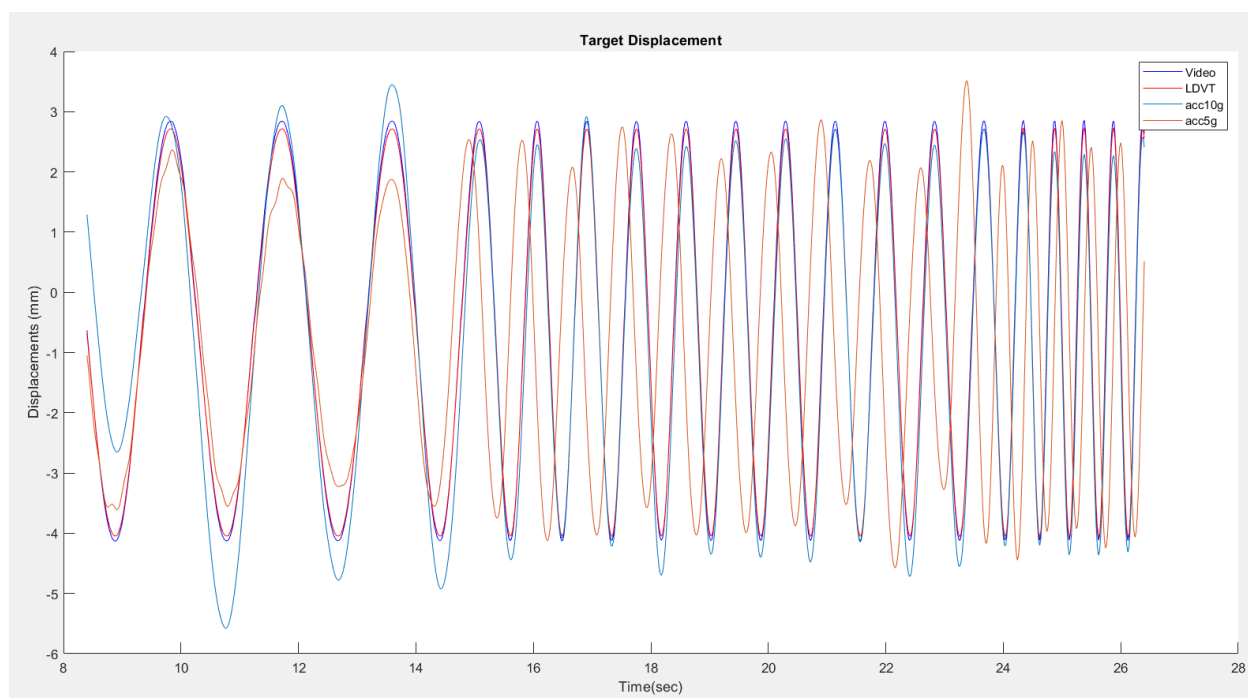


Figura 6.15 – Deslocamentos medidos para frequência alternada.

O acelerômetro com capacidade de registrar até 5g, não apresentou bom comportamento na detecção de variações repentinas apresentado na Figura 6.15, sendo assim desconsiderou-se a análise na Figura 6.16.

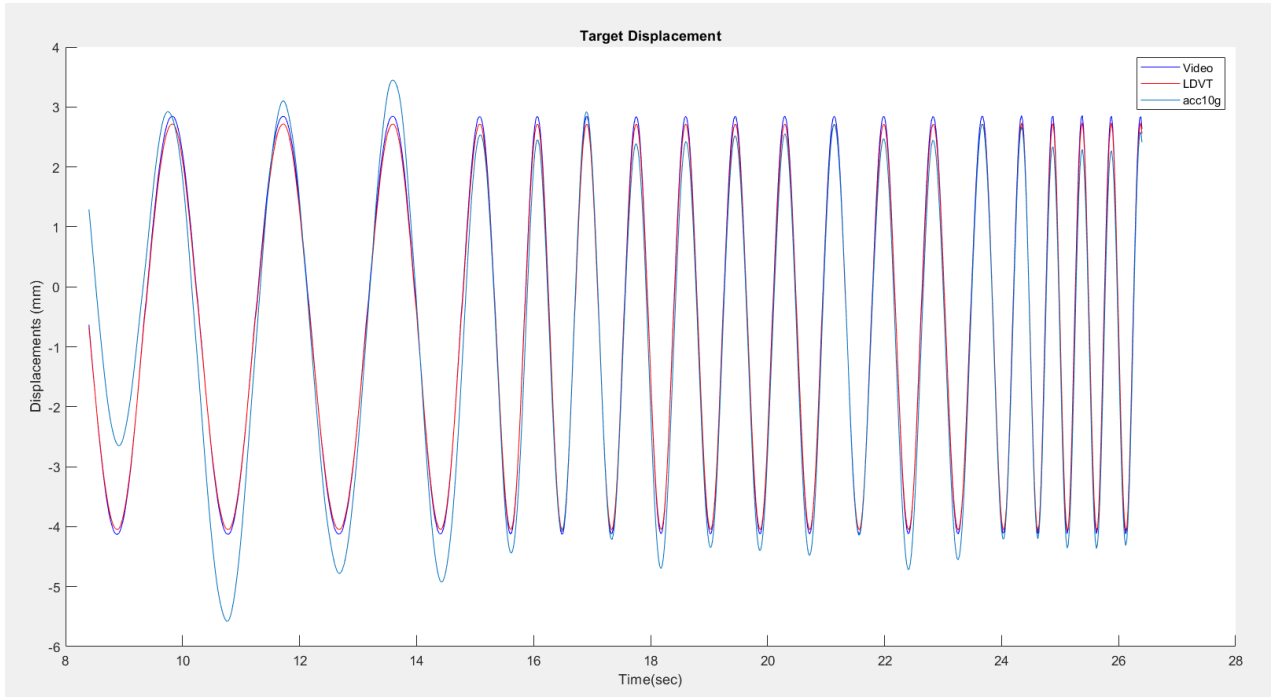


Figura 6.16 – Deslocamentos medidos para frequência alternada sem o acelerômetro de 5g.

O RMSE encontrado foi:

0.0839 mm para o mensurado na filmagem;

0.5932 mm para o acelerômetro de 10g;

3.0012 mm para o acelerômetro de 5g;

0.1452 mm/px é resolução média da câmera.

RMSE_video =	RMSE_acc5 =
0.0839	3.0012
RMSE_acc10 =	Resolucao =
0.5932	0.1452

Figura 6.17 – Resultados MATLAB frequência alternada.

Resumidamente, os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 6.1. Como se está a trabalhar a nível de pixels, o erro tolerável são valores menores que a resolução média do vídeo que está na unidade de mm por pixel. Na tabela estão apresentados os RMSE da curva de rastreio do vídeo, e dos deslocamentos processados a partir dos acelerômetros destacados, utilizando como referência o registro do LVDT.

Tabela 6.1 – Quadro resumo do ensaio 1.

Frequência (Hz)	Resolução (mm/px)	Vídeo (mm)	Acelerômetro 10g (mm)	Acelerômetro 5g (mm)
0.54	0.1452	0.1077	0.7568	1.0391
0.76	0.1442	0.0777	0.2395	0.3640
1.09	0.1452	0.1120	0.8662	0.5291
2.18	0.1451	0.1855	0.0730	0.1607
Alternada (0.5-2.0Hz)	0.1452	0.0839	0.5932	3.0012

Na Tabela 6.1 as células de cor verde indicam erros admissíveis abaixo da resolução, as células de cor vermelha erros acima da resolução. As células de cor laranja contêm valores a ignorar.

Os resultados admitem que o rastreio do alvo com a câmara funciona muito bem abaixo da resolução da câmara para frequências inferiores a 2 Hz, enquanto para frequências superiores, o processamento do registro de aceleração do acelerômetro de 10g, ficou abaixo da resolução da câmara.

## 6.2 ENSAIO 2: CÂMERA EM MOVIMENTO E ALVO ESTACIONÁRIO

Antes do *setup* para o ensaio nas instalações do ISEP, com autorização de voo e condições climáticas favoráveis, foi realizado o voo pre-ensaio, onde foi encontrado dificuldades na sincronização do RTK, devido o perímetro possuir campo eletromagnético, mas foi possível operação. Outra análise relevante foi na frequência de banda de comunicação entre o drone-comando e a do drone-visão, se não

influenciava a frequência de banda de comunicação Wi-Fi entre a câmera Panasonic HC-V380 e o *Smartphone*, causando interferência na comunicação remota, esse pormenor não foi detectado.

Com o *drone* em movimento foram avaliados quais graus de liberdade além da translação no eixo  $y$ , influenciam no rastreamento horizontal do alvo, porque esse será a orientação deslocamento da torre do monte da virgem (Figura 6.18).



Figura 6.18 – Fotografia da campanha de ensaios e identificação do sistema de eixos associado ao sistema (acervo do autor).

Foi constatado dois graus de liberdade, os das rotações em torno do eixo  $z$  (Figura 6.19) e as no eixo  $x$  (Figura 6.20), geradas pela força de arrasto no *drone* devido ao vento.

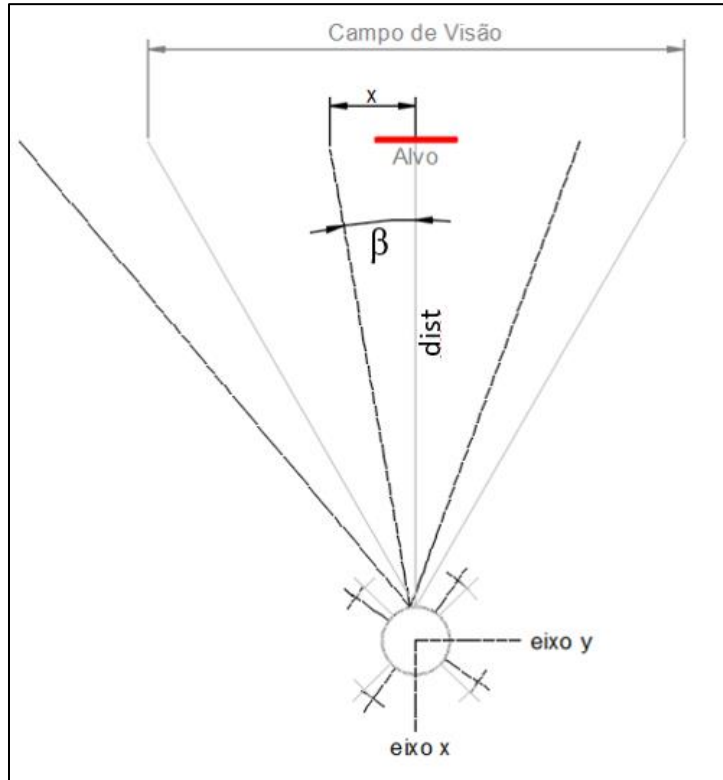


Figura 6.19 - Rotação torno do eixo z (*yaw*) (autoria própria).

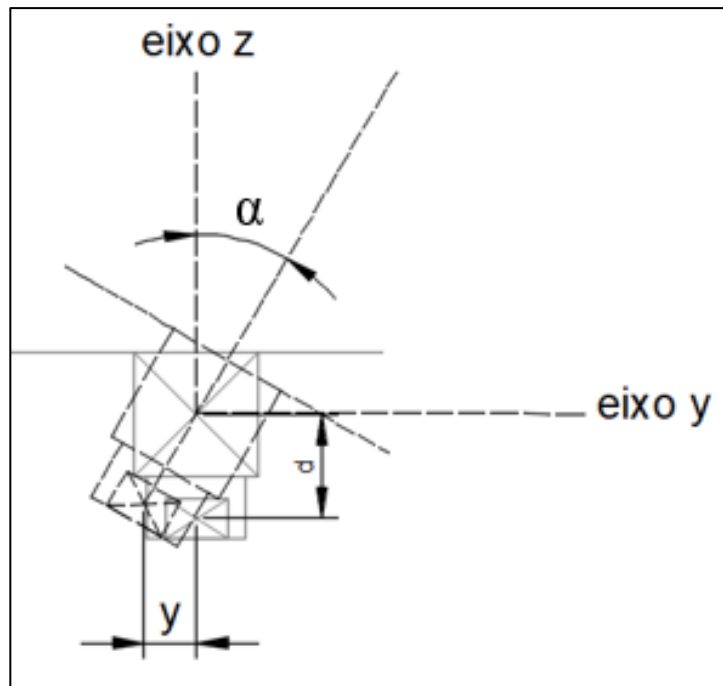


Figura 6.20 - Rotação torno do eixo x (*roll*) (autoria própria).

Para ser contabilizado os deslocamentos gerados por esses graus de liberdade, destacados nas imagens acima de y e x, será feito o uso de trigonometria e física óptica.

Os deslocamentos em  $y$  e em  $x$ , pode ser simplificado e calculado por:

$$y = d \cdot \alpha \quad (6.1)$$

$$x = dist \cdot \beta \quad (6.2)$$

Onde:

$y$  – é o deslocamento em milímetros;

$x$  – é o deslocamento em milímetros;

$\alpha$  – é o ângulo com o eixo  $z$  em radianos;

$\beta$  – é o ângulo com o eixo  $x$  em radianos;

$d$  – é a distância entre o centro de massa do drone e o centro da lente da câmera em milímetros;

$dist$  – é a distância entre a lente da câmera e o alvo em milímetros.

A variável  $d$  foi mensurada e corresponde a 217 mm para o caso em estudo, os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser calculados, processando os registros do giroscópio no eixo  $x$  e eixo  $z$ , respectivamente, utilizando a ferramenta de processamento de sinal.

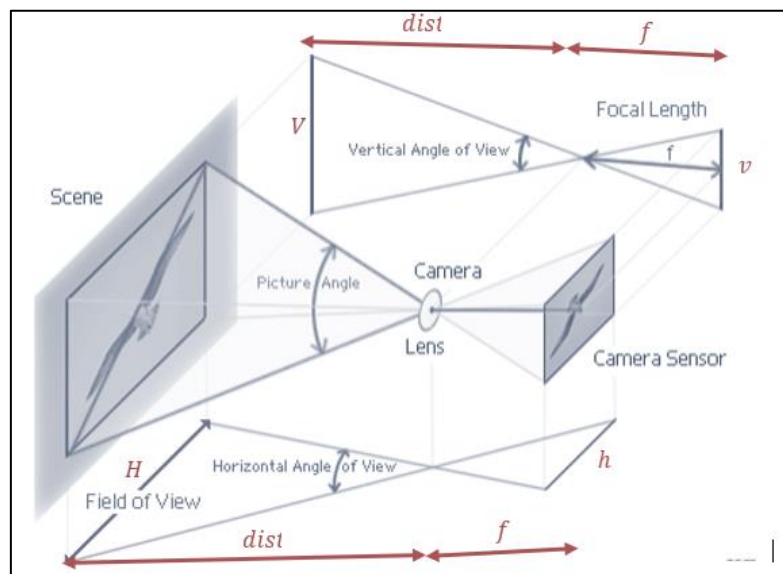


Figura 6.21 - A distância focal e o campo de visão (adaptado de Kocic, Makarov e Vujic, 2011).

Através da física óptica (Figura 6.21), conhecida a distância focal ( $f$ ), uma das dimensões do sensor da câmera ( $v$  ou  $h$ ) e uma das dimensões do campo de visão ( $V$  ou  $H$ ), a variável  $dist$  pode ser calculada por uma das seguintes equações:

$$dist = \frac{f}{v} \cdot V \quad (6.3)$$

$$dist = \frac{f}{h} \cdot H \quad (6.4)$$

Onde:

$dist$  – é a distância entre a lente da câmera e o alvo;

$f$  – é a distância focal em milímetros;

$V$  – é a dimensão vertical do *frame* em milímetros;

$H$  – é a dimensão horizontal do *frame* em milímetros;

$v$  – é a dimensão vertical do sensor em milímetros;

$h$  – é a dimensão horizontal do sensor em milímetros.

Segundo Panasonic (2019), a distância focal da câmera varia de 2.06 mm a 103 mm, diretamente proporcional ao zoom óptico aplicado na captação de imagens o qual varia entre 1x a 50x.

As informações referentes as dimensões do sensor não constam nos manuais técnicos da câmera, o suporte técnico da Empresa Panasonic foi contatado tendo sido fornecidas as correspondentes dimensões, 2.50 mm x 1.85 mm ( $h \times v$ ).

As dimensões do *frame* em *pixels* são conhecidas, 1920 x 1080 (*full HD*), no entanto, as dimensões do *frame* em milímetros dependem da resolução e variam em cada *frame*, porque o *drone* está em movimento. Após o cálculo da resolução da imagem (em milímetros por pixel), foi incorporado na ferramenta de processamento de imagem, o cálculo das dimensões do *frame* em milímetros, que corresponde à resolução multiplicada pelas dimensões do *frame* em *pixels*.

Com a necessidade da sincronização dos dados do vídeo com os registros dos acelerômetros e giroscópios é feito uma pré-sincronização na decolagem (Figura 6.22), com o registro do alvo rastreado e o registro do acelerômetro no eixo z. O alvo é colocado em frente ao drone antes da decolagem, de forma totalmente visível a câmera de vídeo que inicia o processo de gravação, paralelamente o motor do drone é ligado, iniciando o registro dos sensores internos, uma decolagem de modo que se perda a visão do alvo, resultará em um pico no rastreo vertical do alvo e conseqüentemente ao acelerômetro no eixo z, esses dois picos serão utilizados para uma pré-sincronização dos dados.

Levando em consideração todas essas variáveis do *drone* em movimento, o ensaio é realizado nas dependências do ISEP.



Figura 6.22 - Pré – sincronização na decolagem (acervo do autor).

O *setup* do ensaio, consiste no alvo fixo sobre um pilar estático, do *drone* sincronizado com RTK em movimento e do alvo de pré-sincronização (Figura 6.23).

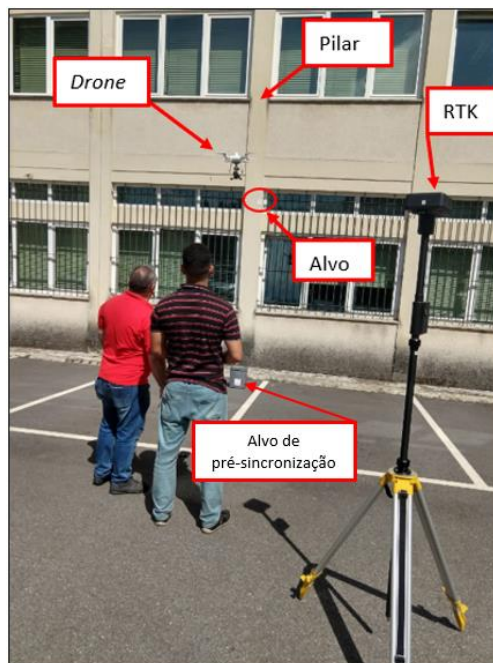


Figura 6.23 – Configuração do ensaio 2 no ISEP (acervo do autor).

Após demasiadas tentativas para realização do ensaio nas instalações do ISEP, malsucedidas por intempéries climáticas e pelas oscilações de sinal causadas por interferências eletromagnéticas resultando em instabilidade na conexão entre o *drone* e o RTK. Houve necessidade de uma área aberta para realizar o ensaio, sendo assim, o ensaio foi efectuado na base da torre do Monte da Virgem (Figura 6.24), onde existe autorização para operar o *drone*.



Figura 6.24 - Base da torre de telecomunicação do monte da virgem (acervo do autor).

Após verificação do comportamento do *drone*, não foi constatado instabilidade de sinal (Figura 6.25). A configuração do ensaio 2 na base da torre é realizada e os equipamentos utilizados são o(a):

- *Drone* Phantom 4 RTK;
- Câmera Panasonic HC-V380;
- Estação base RTK;
- Alvo;
- Alvo de pré-sincronização.



Figura 6.25 – Configuração do ensaio 2 na base da torre (acervo do autor).

O ensaio 2 foi realizado, de modo que o alvo estivesse sempre enquadrado na filmagem da câmera de vídeo (Figura 6.26).



Figura 6.26 - Realização do ensaio 2 na base da torre (acervo do autor).

Os deslocamentos relativos do alvo estacionário fixado sobre a parede em relação a posição da câmera em movimento, foi registrado através da ferramenta desenvolvida de processamento de imagem baseado em cores (Figura 6.27). O registro dos sensores internos de interesse, a aceleração no eixo  $y$  e  $z$ , e a velocidade angular nos eixos  $x$  e  $z$  são extraídos para um posterior processamento (Figura 6.28).

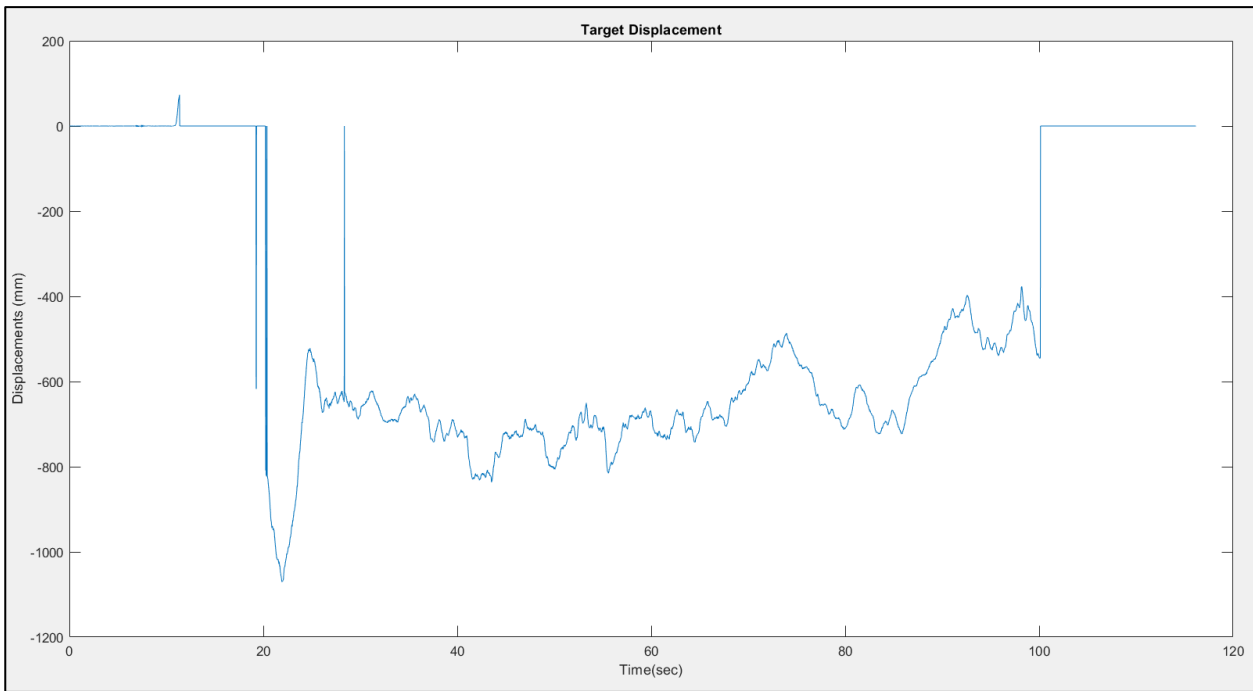


Figura 6.27 - Registro da filmagem do alvo.

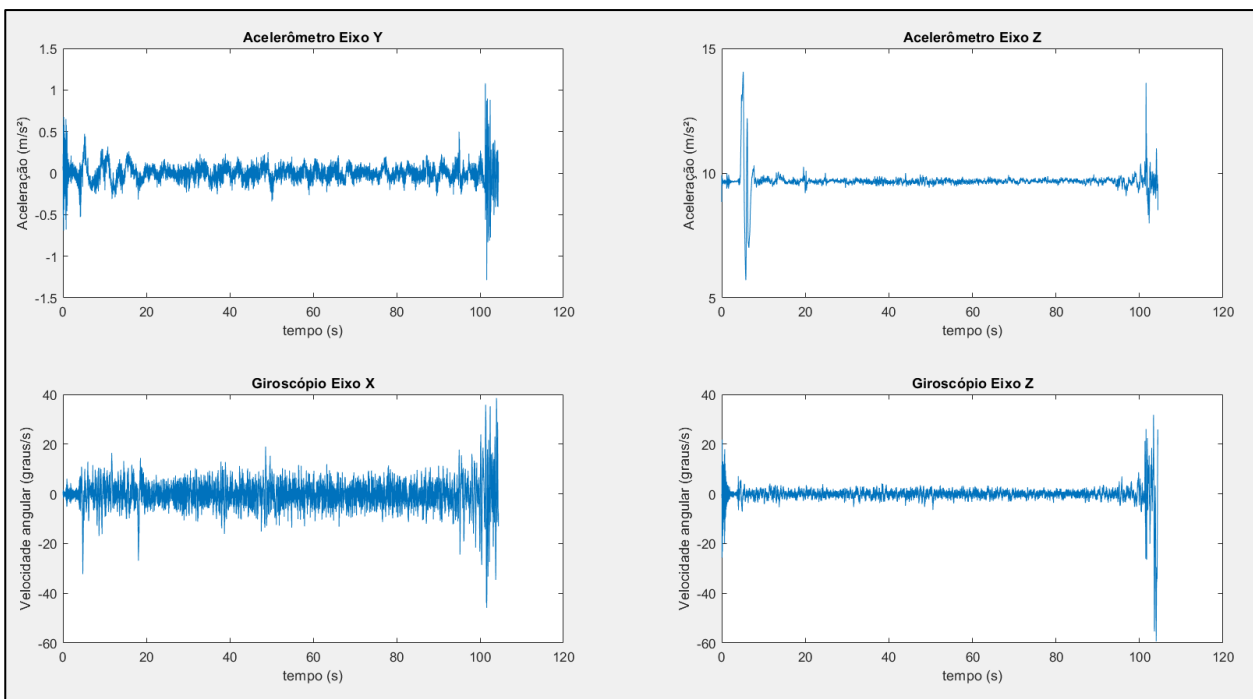


Figura 6.28 - Registro dos sensores internos de interesse.

O processamento dos registros dos sensores internos permite estimar o movimento não-estacionário da câmera, na direção de interesse, a partir dos dados extraídos dos acelerômetros e giroscópios (IMU) do DJI Phantom 4 RTK.

Utilizando a ferramenta desenvolvida de processamento de sinal, os dados extraídos dos sensores são processados com o objetivo de obter o movimento absoluto do *drone* no eixo *y*, de modo que tenha equivalência ao rastreamento do alvo estacionário computados pela ferramenta de processamento de imagem. Os deslocamentos são processados com a pré-sincronização e é feita uma análise visual (Figura 6.29).

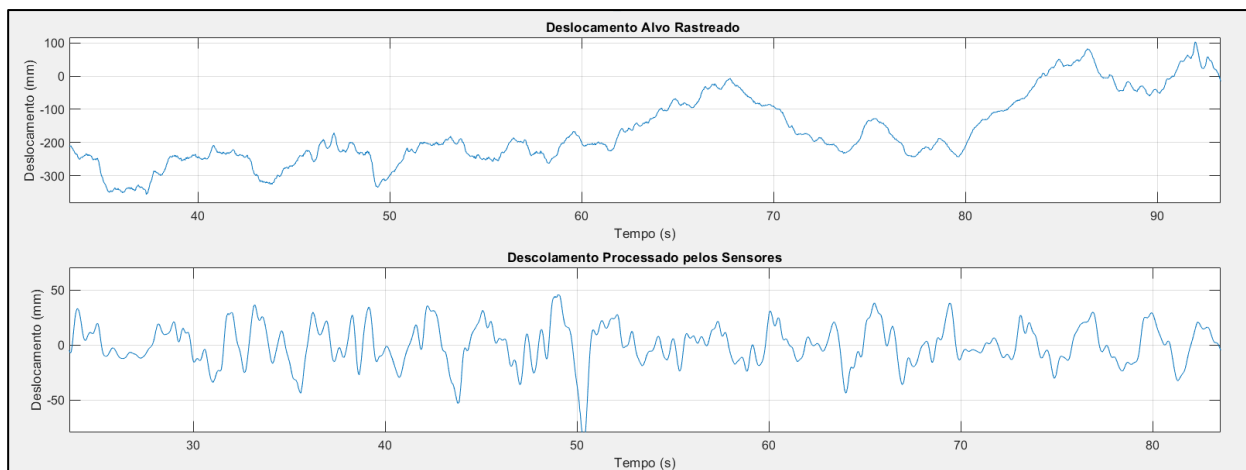


Figura 6.29 - Análise visual entre os deslocamentos.

Não é constatado similaridade entre os registros como o esperado, no entanto através da análise visual é constatado que os registros processados pela ferramenta de processamento de sinais variam em torno do valor de deslocamento 0 mm, o que não é real, porque o drone possui movimentos não harmônico com tendências, provocadas pela força de arrasto do vento, como registrado pela ferramenta de processamento de imagem no rastreamento do alvo.

Para efeito de comparação da ordem de grandeza, as tendências no registro de rastreamento na ferramenta de processamento de imagem serão eliminadas com a aplicação do filtro passa-alto à frequência de corte de 0.3 Hz, e comparados com os registros processados a partir dos sensores internos do drone (Figura 6.30).

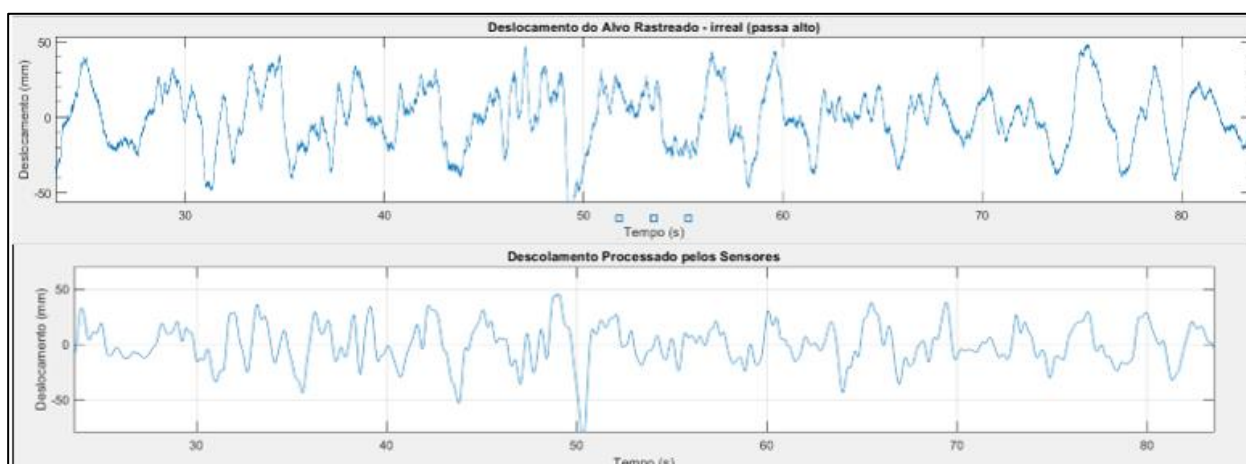


Figura 6.30 – Análise da ordem de grandeza dos registros.

A ordem de grandeza dos registros do rastreamento de imagem com filtro passa-alto e o registro processado a partir da aceleração e velocidades angulares dos sensores internos do drone apresenta similaridade. Uma vez que, a metodologia utilizada no processamento de sinais utiliza filtro passa-alto em cada integração afim de remover as baixas frequências que são amplificadas, o resultado esperado nunca será alcançado. O estudo de uma nova metodologia onde não se utiliza filtro passa-alto deve ser incorporada a ferramenta de processamento de sinal para aperfeiçoar o trabalho.

### 6.3 ENSAIO 3: CÂMERA EM MOVIMENTO E ALVO EM MOVIMENTO

Uma vez que, o desfecho do ensaio da câmera em movimento e alvo estacionário, seja de natureza satisfatória, validando a metodologia proposta, um caso prático irá ser realizado.

O caso em questão será na torre de telecomunicação do Monte da Virgem, o alvo será anexado a estrutura no último piso com guarda-corpos no seu contorno, localizado à aproximadamente 112 m. Por economia de bateria, agilidade, e maior controle sobre o drone, a decolagem realizará no mesmo piso (Figura 6.31).



Figura 6.31 - Configuração do ensaio (acervo do autor).

A torre do Monte da Virgem reúne as condições necessárias para aplicação da metodologia, segundo Ribeiro *et al.* (2019), a torre é submetida a eventos denominados de críticos, onde existe uma amplificação da resposta dinâmica da estrutura sob ação do vento.

Um estudo será posteriormente realizado para determinar a melhor localização para fixação do alvo.

O deslocamento estrutural da torre será quantificado através do rastreamento do alvo fixado sobre ela realizado pelo drone.

Os procedimentos laboratoriais conduziram a resultados muito satisfatórios, mas os resultados com ensaios de campo têm outras complicações que dificultaram o ensaio 2 e não permitiram que o ensaio 3 fosse testado e ficando para desenvolvimentos futuros.



## CAPÍTULO 7

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 7.1 CONCLUSÕES

Em uma varredura de artigos e trabalhos relacionados com a inspeção de deslocamento estrutural, somente o trabalho de Yoon, Shin e Spencer (2018) faz o uso de *drone* para medição de deslocamento estrutural, através de um referencial estático próximo ao alvo que registra o deslocamento do *drone* por processamento de imagem.

A metodologia apresentada, inova na tentativa registrar os deslocamentos do *drone* a partir do processamento dos sensores internos (IMU), excluindo o uso do referencial estático.

Foi apresentado uma revisão bibliográfica sobre o assunto, com algumas pesquisas do que já foi feito em inspeção de deslocamento estrutural. Em contraste a esta nova metodologia de inspeção, foram descritos os procedimentos mais utilizados para a realização de inspeções dinâmicas, como sensores de contato, LDVT, acelerômetros ou recorrendo ao sistema GPS, e sensores sem contato, RTS, LIDAR e LDV, para então avaliar o estado de conservação da estrutura.

A dificuldade de acesso de estruturas ou partes de estruturas apresenta limitações adicionais na capacidade de inspeção directa que pode, em muitos casos, ser substituída por inspeção —ou até intervenção— remota. A utilização de tecnologias que possibilitem o acesso visual e à distância de estruturas, dispensando a utilização de equipamentos, outras estruturas ou sistemas precários tem ganho importância nos tempos mais recentes, pela facilidade, segurança, economia e eventual repetibilidade que permite quando comparado com os métodos tradicionais. A inspeção remota recorrendo a *drones* do tipo da que se refere neste trabalho, insere-se neste conjunto de tecnologias de inspeção remota que começa a ser cada vez mais utilizada nos mais diferentes casos, muitas vezes com vantagens funcionais óbvias e em intervenções de valor acrescentado.

Visto a aplicabilidade do uso do DJI Phantom 4 RTK na inspeção dinâmica da Torre do Monte da Virgem, foi desenvolvida uma ferramenta de rastreio de cores através do processamento de imagem e uma ferramenta de processamento de sinais, que possibilitasse a obtenção do deslocamento a partir do

processamento dos registros dos acelerômetros e giroscópios internos do *drone* para alcançar os objetivos traçados.

No ensaio com alvo móvel e drone estacionário, a ferramenta de processamento de imagem apresentou resultados satisfatórios para frequências inferiores a 2 Hz. Enquanto, a ferramenta de processamento de sinais apresentou resultados satisfatórios para frequências superiores a 2 Hz para os registros de dados contabilizados nesse trabalho.

No ensaio com alvo estacionário e drone em movimento, os deslocamentos do *drone* foram processados a partir do registro dos sensores internos considerados influentes no grau de liberdade rastreado e comparados visualmente com o rastreamento do alvo parado. Os dados possuem mesma ordem grandeza, porém o processamento deve ser aperfeiçoado, através da introdução de uma nova metodologia de integração de sinais, na qual não se utiliza filtros passa-alto, que atua removendo as frequências abaixo da frequência de corte.

O último ensaio é mais importante, mas também o mais difícil, deverá ser feito em desenvolvimentos futuros, assim que o ensaio com alvo estacionário e drone em movimento apresentar resultados satisfatórios, neste ensaio o alvo e o drone estarão em movimento, sendo o alvo fixo à aproximadamente 112 m da base do fuste de betão da torre de telecomunicação do Monte da Virgem e o drone sobrevoando a mesma altitude.

Por se tratar de uma torre de telecomunicações onde foi feita identificação de eventos críticos por Ribeiro *et al.* (2019), pretendia-se que a utilização do *drone* possibilitasse a fácil mensuração dos deslocamentos da mesma, especialmente durante os eventos classificados como críticos.

Com o *software* MATLAB, foi possível a criação das ferramentas utilizadas nesse trabalho. Porém, algumas das funções criadas neste trabalho necessitam de alguns ajustes devido à sensibilidade relativamente aos filtros passa-baixo e passa-alto, que influenciam na integração dos registros, causando distorções e erros significativos, gerando resultados irreais.

No geral e para as aplicações laboratoriais, a metodologia feita neste trabalho apresentou resultados satisfatórios. Para trabalhos de campo e em situações de acompanhamento de estruturas reais, uma vez que é uma técnica inovadora, será necessário desenvolver algumas das metodologias propostas, incluindo a realização de ensaios e calibrações adicionais que permitam a sua validação e aplicação em estruturas de grande porte entre as quais se incluem, por exemplo, a torre de telecomunicações do Monte da Virgem, na cidade de Gaia, Portugal.

Por motivos de intempéries na região de Gaia e limite do prazo que compete o desenvolvimento deste trabalho, não foram realizados ensaios com registros mais longos, mas salienta-se que estes devem ser

realizados de modo a ter mais conhecimento da influência do tempo de registro no processamento de sinal.

Na situação deste trabalho, o próximo passo da inspeção dinâmica estrutural, é aperfeiçoar a técnica de processamento de sinal do IMU para ter mais precisão do movimento do *drone*.

Apesar da metodologia adotada apresentar investimentos iniciais que podem ser relativamente elevados, devido aos equipamentos adotados, o uso de *drones* contribui para redução significativa de tempo de execução da inspeção estrutural, número de equipes e a torna acessível visualmente, concluindo-se então que na inspeção da estrutura deve considerar o custo-benefício e viabilidade técnica do método de inspeção que se deseja adotar.

## 7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na realização do presente trabalho foram surgindo assuntos e conclusões que mereciam ser alvo de investigações futuras. A metodologia apresentada, se tornou meio e não fim deste estudo. Assim sendo, apresentam-se alguns aspectos que se consideram alvo de possíveis desenvolvimentos complementares ao presente estudo:

- Análise do espectro do frequências e processamento de um maior registro dos sensores internos;
- Aplicação de uma metodologia de maior precisão para integração dos sinais dos sensores internos (IMU) onde não se utiliza filtros passa-alto, com objetivo de obter o deslocamento absoluto do *drone*;
- Conhecimento da sensibilidade dos acelerômetros do drone, utilizando-o sobre a mesa sísmica;
- Realização do ensaio da câmera em movimento e alvo em movimento, com aplicação prática da metodologia na torre de telecomunicações do Monte da Virgem;



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - **Certificados de Drones** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 10 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones/registros-e-certificados-de-drones>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - **RBAC-E nº 94** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 10 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo\\_norma/RBACE94EMD00.pdf](http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf)>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES - **Drones devem ser homologados para evitar interferências** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 7 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.anatel.gov.br/institucional/noticias-destaque/2-uncategorised/1485-drones-devem-ser-homologados-para-evitar-interferencias>>.

ARIAS-LARA, Damaris; DE-LA-COLINA, Jaime - Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records. **Measurement**. . ISSN 02632241. 114:September 2017 (2018) 261–273. doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.019.

AUTORIDADE NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL - **Condições de Operação Aplicáveis à Utilização do Espaço Aéreo Pelos Sistemas de Aeronaves Civis Pilotadas Remotamente (“drones”)** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 7 jun. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.voanaboa.pt/Files/downloads/Regulamento-1093-2016-Drones.pdf>>.

BOORE, David; STEPHENS, Chris; JOYNER, William - Comments on baseline correction of digital strong-motion data: examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake. **Bulletin of the Seismological Society of America**. 92:april (2002) 1543–1560.

BRADY, A. Gerald; CONVERSE, April - BAP basic strong-motion accelerogram processing software version 1.0. 1992) 92-296-A. doi: 10.3133/ofr92296A.

CHIU, Hung-Chie - Stable baseline correction of digital strong-motion data. 1997) 932–944.

DARRAGH, Robert; SILVA, Walter J.; GREGOR, Nick - Strong Motion Record Processing for the PEER Center. **Proceedings of COSMOS Invited Workshop on Strong-Motion Record Processing**. 2004) 1–12.

DRONE DEPLOY - **2018 Commercial Drone Industry Trends** [Em linha], atual. 2018. [Consult. 10 jan.

2019]. Disponível em

WWW:<URL:https://cdn2.hubspot.net/hubfs/530284/10M\_Acre\_Report\_2017\_.pdf?blog>.

ELLENBERG, A. *et al.* - Use of Unmanned Aerial Vehicle for Quantitative Infrastructure Evaluation.

**Journal of Infrastructure Systems**. . ISSN 1076-0342. 21:3 (2015). doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000246.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA - Gyroscope. Em Britannica [Em linha]. [S.l.] : Encyclopædia Britannica, inc., 2019 Disponível em WWW:<URL:https://www.britannica.com/technology/gyroscope>.

FERNANDES, Marcos Rogério - **Rastreamento de Objetos usando Visão Computacional e Filtro de Kalman** [Em linha], atual. 2015. [Consult. 3 fev. 2019]. Disponível em

WWW:<URL:https://marofe.github.io/tutorials/rastreamento\_usando\_visao\_filtro\_kalman>.

GOOGLE LLC - **Google Earth** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 10 jul. 2019]. Disponível em

WWW:<URL:https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>.

HALLERMANN, Norman; MORGENTHAL, Guido - Unmanned aerial vehicles (UAV) for the assessment of existing structures. **IABSE Symposium Report**. . ISSN 2221-3783. 101:14 (2013) 1–8. doi:

10.2749/222137813808627172.

HAM, Youngjib *et al.* - Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. **Visualization in Engineering**. . ISSN 2213-7459. 4:1 (2016) 1–8. doi: 10.1186/s40327-015-0029-z.

IDACHABA, Francis Enejo - Monitoring of Oil and Gas Pipelines by Use of VTOL-Type Unmanned Aerial Vehicles. **Oil and Gas Facilities**. . ISSN 2224-4514. 5:01 (2016) 47–52. doi: 10.2118/172471-PA.

KOCIC, Jelena; MAKAROV, Aleksej; VUJIC, Sasa - Multiple Sensors' Lenslets for Secure Document Scanners. **Infotech-Jahorina International Symposium**. 10:March (2011) 892–896.

LARRAURI, Juan I.; SORROSAL, Gorka; GONZALEZ, Mikel - Automatic system for overhead power line inspection using an Unmanned Aerial Vehicle &#x2014; RELIFO project. Em **2013 International**

**Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)** [Em linha]. Atlanta, GA, USA : IEEE, Mai. 2013

Disponível em WWW:<URL:http://ieeexplore.ieee.org/document/6564696/>. ISBN 978-1-4799-0817-2

LEE, V. W.; TRIFUNAC, Mihailo D. - **Automatic digitization and processing of accelerograms using PC**

LIU, Chun *et al.* - Architecture planning and geo-disasters assessment mapping of landslide by using airborne lidar data and UAV images. Em **International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011:**

**Technologies and Applications** [Em linha] Disponível em

WWW:<URL:http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.912525>. ISBN 0277786X (ISSN); 9780819489333 (ISBN)

- LIU, Peter *et al.* - A review of rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. **Smart Structures and Systems**. . ISSN 1738-1584. 13:6 (2014) 1065–1094. doi: 10.12989/sss.2014.13.6.1065.
- LUQUE-VEGA, Luis F. *et al.* - Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter. Em **MELECON 2014 - 2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference** [Em linha]. Beirut, Lebanon : IEEE, Abr. 2014 Disponível em WWW:<URL:http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6820566>. ISBN 978-1-4799-2337-3
- MASCAREÑAS, David *et al.* - Wireless sensor technologies for monitoring civil structures. **Sound and Vibration**. . ISSN 15410161. 42:4 (2008) 16–21.
- MINISTÉRIO DA DEFESA - **ICA 100-40** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 10 jul. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4944>.
- MOREU, F. *et al.* - Reference-Free Displacements for Condition Assessment of Timber Railroad Bridges. **Journal of Bridge Engineering**. . ISSN 1084-0702. 21:2 (2016) 04015052. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000805.
- MORI, Anderson Morais - **O Uso de Sistema Inercial para Apoiar a Navegação Autônoma** [Em linha]. [S.l.] : ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2013 Disponível em WWW:<URL:http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-26062014-114414/pt-br.php>.
- MULAKALA, Jay - **Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & Photogrammetry** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:https://DroneDeploy-www.cdn.prismic.io/DroneDeploy-www%2Fb9c899fc-e093-4c3b-ae31-8dcbbd4a08ac\_dji\_phantom\_4\_rtk\_book\_f4.pdf%0Ahttps://DroneDeploy-www.cdn.prismic.io/DroneDeploy-www%2F93423f49-b020-4b5a-8546-7ed3ccbde6cd\_dji\_phantom\_4\_rtk\_book\_f-2.pdf>.
- NAGAYAMA, T.; SPENCER, Jr F.; FUJINO, Y. - Structural health monitoring using smart sensors. Em **EASEC-11 - Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction**
- NASSIF, Hani H.; GINDY, Mayrai; DAVIS, Joe - Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration. **NDT & E International**. . ISSN 09638695. 38:3 (2005) 213–218. doi: 10.1016/j.ndteint.2004.06.012.
- NATIONAL INSTRUMENT - **Medição de vibração com acelerômetros** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 10 mai. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>.
- NTI-AUDIO - **Fast Fourier Transformation FFT - Basics** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 2 mai. 2019].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Disponível em WWW:<URL:https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>.

PANASONIC - **HD Camcorder HC-V380** [Em linha], atual. 2019. [Consult. 15 abr. 2019]. Disponível em WWW:<URL:https://www.panasonic.com/middleeast/en/support/product-archive/camcorder/hc-v380.html>.

PARK, H. S. *et al.* - A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**. . ISSN 1093-9687. 22:1 (2007) 19–30. doi: 10.1111/j.1467-8667.2006.00466.x.

PARK, Ki-Tae *et al.* - The determination of bridge displacement using measured acceleration. **Engineering Structures**. . ISSN 01410296. 27:3 (2005) 371–378. doi: 10.1016/j.engstruct.2004.10.013.

PSIMOULIS, Panos A.; STIROS, Stathis C. - Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS). **Engineering Structures**. . ISSN 01410296. 29:12 (2007) 3312–3324. doi: 10.1016/j.engstruct.2007.09.006.

RIBEIRO, D. *et al.* - Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system. **Engineering Structures**. . ISSN 01410296. 75:2014) 164–180. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.04.051.

RIBEIRO, Diogo *et al.* - Continuous monitoring of the dynamic behavior of a high-rise telecommunications tower. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**. . ISSN 15417794. 28:11 (2019) 1–15. doi: 10.1002/tal.1621.

ROCHA, Said M. S. *et al.* - Method to Measure Displacement and Velocity from Acceleration Signals. **International Journal of Engineering Research and Applications**. . ISSN 2248-9622. 6:6 (2016) 52–59.

SHAKHATREH, Hazim *et al.* - Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. **IEEE Access**. . ISSN 2169-3536. 7:2019) 48572–48634. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.

VAZQUEZ B., G. Esteban *et al.* - Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. **Measurement**. . ISSN 02632241. 110:2017) 146–153. doi: 10.1016/j.measurement.2017.06.026.

WANG, R. *et al.* - An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong-Motion Records. **Bulletin of the Seismological Society of America**. . ISSN 0037-1106. 101:5 (2011) 2029–2044. doi: 10.1785/0120110039.

YANG, Yanli; ZHAO, Yanfei; KANG, Dali - Integration on acceleration signals by adjusting with envelopes. **Journal of Measurements in Engineering**. . ISSN 2335-2124. 4:2 (2016) 117–121.

YOON, Hyungchul; SHIN, Jaeho; SPENCER, Billie F. - Structural Displacement Measurement Using an Unmanned Aerial System. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**. . ISSN 10939687. 33:3 (2018) 183–192. doi: 10.1111/mice.12338.



## ANEXO I – PROCESSAMENTO DE IMAGEM

```
clear all;close all;clc;

%% inputs
filename_video="C:\Users\Rafael\Desktop\Drone Dados\Lab\2019-11-08\S1080002-002.MP4"; % video to load

%% data video Acquisition
wb = waitbar(0.'Loading the file...'); % show progress bar
v = VideoReader(filename_video); % create VideoReader object
fr= v.FrameRate;
w = v.Width; % get width
h = v.Height; % get height
duration = v.Duration; % get duration
frame = 1;
dcent=30; % distance between circles mm
c=1;

%Parameters from camcorder
zoom=5;
np = w;
fcam = 103-(50-zoom)*(103-2.06)/(50-1);
Ds = 2.5;
while hasFrame(v) % while object has frame
    f = readFrame(v); % read the frame

% we have to subtract the red componente from the grayscale image to extract
the red components in the image.
diff_im = imsubtract(f(:,:,1), rgb2gray(f));
%Use a median filter to filter out noise
diff_im = medfilt2(diff_im, [3 3]);
% Convert the resulting grayscale image into a binary image.
diff_im = im2bw(diff_im,0.18);
% Remove all those pixels less than 300px
diff_im = bwareaopen(diff_im,300);
```

## ANEXO I

```
% Label all the connected components in the image.
screen = bwlabel(diff_im, 8);
% Here we do the image blob analysis.
% We get a set of properties for each labeled region.
stats = regionprops(screen, 'BoundingBox', 'Centroid');
t_video(frame)= v.CurrentTime;
imshow(f)

hold on
if length(stats) == 9
    for obj = 1:length(stats)
        bb = stats(obj).BoundingBox;
        bc = stats(obj).Centroid;
        rectangle('Position',bb,'EdgeColor','r','LineWidth',1)
        plot(bc(1),bc(2), '-m+')
        a=text(bc(1)+10.bc(2), strcat('X: ',num2str(round(bc(1))),
'Y: ', num2str(round(bc(2)))));
        set(a, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold',
'FontSize', 8, 'Color', 'blue');
        centroid(obj,:,frame) = bc;
    end
else % if 9 circles not detected
    centroid(:, :, frame) = zeros([9 2]);
end
hold off

% This is a loop to calculate the resolution in each frame (mm/px) for 12
distance
if length(stats)==9
    j=1;
    k=1;
    while k<=6 % horizontal
        r(j)=dcent/(centroid(k+3.1.frame)- centroid(k,1.frame));
        j=j+1;
        k=k+1;
    end
    k=1;
    while k<=6 % vertical
        if k ~= 3 | k ~= 6
            r(j)=dcent/(centroid(k+1.2.frame)- centroid(k,2.frame));
```

```

        j=j+1;
    end
    k=k+1;
end

% filter the resolutions outliers, mean resolution of the frame, distance
target to cam
    loc_outliers = isoutlier(r);
    pos_outliers = find(loc_outliers==1);
    r(pos_outliers)=[];
    resolution_mmpix(frame) =mean(r);
    dist_to_target_mm(frame) =(np*fcam*resolution_mmpix(frame)/Ds);
    rtotal(1.c)=mean(r);
    rtotal(2.c)=std(r);
    rtotal(3.c)=std(r)/mean(r);
    c=c+1;

% show on screen each resolution from each frame
    fprintf('%s px/mm.\n',1/resolution_mmpix(frame))
    fprintf('%s mm.\n',dist_to_target_mm(frame))

% If not detected 9 red circles
    else
        rtotal(1.c)=0.0;
        rtotal(2.c)=0.0;
        rtotal(3.c)=0.0;
        c=c+1;
        resolution_mmpix(frame)=0.0;
        dist_to_target_mm(frame) = 0.0;
        disp('target no detected')
    end
    frame = frame + 1;           % increment counterk
    waitbar(v.CurrentTime/duration) % update progress bar
end
close(wb)
close(gcf)

%% calculate target displacement
iobj=1;obj=9;
while iobj<=obj
    k1=2;

```

## ANEXO I

```
distxp(iobj,1.1)=0;
distyp(iobj,1.1)=0;
while k1<frame
    distxp(iobj,1.k1)=(centroid(iobj,1.k1)-centroid(iobj,1.k1-
1))*rtotal(1.k1)+distxp(iobj,1.k1-1);
    distyp(iobj,1.k1)=(centroid(iobj,2.k1)-centroid(iobj,2.k1-
1))*rtotal(1.k1)+distyp(iobj,1.k1-1);
    k1=k1+1;
end
iobj=iobj+1;
end

%% vector media from the curves
k1=1;
while k1<frame
    displ_cam_x(k1)=-1*mean(distxp(:,1.k1));
    displ_cam_y(k1)=-1*mean(distyp(:,1.k1));
    k1=k1+1;
end

plot(t_video,displ_cam_x,t_video,displ_cam_y)
```

## ANEXO II – PROCESSAMENTO DE SINAL

```
%% Import data using xlsread
[~, ~, raw] = xlsread('C:\Users\Rafael\Desktop\Drone Dados\Lab\2019-07-25\50_19-07-25_1630.xlsx', '50_19-07-25_1630', 'A24:D75799');
raw(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x), raw)) = {' '};
stringVectors = string(raw(:,1));
stringVectors(ismissing(stringVectors)) = ' ';
raw = raw(:, [2.3.4]);
I = ~all(cellfun(@(x) isnumeric(x) || islogical(x), raw), 2); % Find rows with non-numeric cells
raw(I, :) = [];
stringVectors(I, :) = [];
I = any(cellfun(@(x) isempty(x) || (ischar(x) && all(x==' ')), raw), 2); % Find row with blank cells
raw(I, :) = [];
stringVectors(I, :) = [];
data = reshape([raw{:}], size(raw));
time = stringVectors(:,1);
time=str2double(time);
Acc_05GDC = 9.81*data(:,1);
Acc_10GDC = 9.81*data(:,2)/.1991;
LVDT_63 =data(:,3);
LVDT_63=(LVDT_63-LVDT_63(1));

%% FFT
vector_FFT=displ_cam_x;
Fs = 50; % Sampling frequency

T = 1/Fs; % Sampling period
L = length(vector_FFT); % Length of signal
t = (0:L-1)*T; % Time vector
Y = fft(vector_FFT);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
```

## ANEXO II

```
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(f,P1)
title('Espectro de frequências')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|Amplitude(f)|')
xlim([0 100])

%% Filtros
low_PB=2.3;
low_SB=3;
high_SB=1.6;
high_PB=2;
incr=1/2048;
low_drone=designfilt('lowpassfir','PassbandFrequency',2*low_PB/(1/incr),'StopbandFrequency',2*low_SB/(1/incr),'PassbandRipple',.01...
    'StopbandAttenuation',20.'DesignMethod','kaiserwin');
high_drone=designfilt('highpassfir','StopbandFrequency',2*high_SB/(1/incr),'PassbandFrequency',2*high_PB/(1/incr),'PassbandRipple',.01...
    'StopbandAttenuation',20.'DesignMethod','kaiserwin');

fvtool(high_drone)                %plot filter

%% Integrations
ti=5*(1/incr);
tf=length(X_Value)-4*(1/incr);
Acc_2(1:ti)=0;
Acc_2(tf:end)=0;
Acc_10GDC(1:ti)=0;
Acc_10GDC(tf:end)=0;

Acc_05GDCd=detrend(Acc_2.'c');
Acc_05GDCdf=filtfilt(low_drone,Acc_05GDCd);
Acc_05GDCdff=filtfilt(high_drone,Acc_05GDCdf);
plot(time,Acc_05GDCdf,time,Acc_05GDCd)

Acc_10GDCd=detrend(Acc_10GDC,'c');
Acc_10GDCdf=filtfilt(low_drone,Acc_10GDCd);
Acc_10GDCdff=filtfilt(high_drone,Acc_10GDCdf);

%% velocity
```

```

vel_05GDC=cumtrapz(time,Acc_05GDCdff);
vel_05GDCd=detrend(vel_05GDC,'c');
vel_05GDCd(1:ti)=0;
vel_05GDCd(tf:end)=0;
vel_05GDCdf=filtfilt(low_drone,vel_05GDCd);
vel_05GDCdff =filtfilt(high_drone,vel_05GDCdf);
vel_05GDCdff(1:ti)=0;
vel_05GDCdff(tf:end)=0;

vel_10GDC=cumtrapz(time,Acc_10GDCdff);
vel_10GDCd=detrend(vel_10GDC,'c');
vel_10GDCd(1:ti)=0;
vel_10GDCd(tf:end)=0;
vel_10GDCdf=filtfilt(low_drone,vel_10GDCd);
vel_10GDCdff =filtfilt(high_drone,vel_10GDCdf);

%% displacement
displ_05GDC=cumtrapz(time, vel_05GDCdff);
displ_05GDCd=detrend(displ_05GDC,'c');
displ_05GDCd(1:ti)=0;
displ_05GDCd(tf:end)=0;
displ_05GDCdf =filtfilt(low_drone,displ_05GDCd);
displ_05GDCdff =1000*filtfilt(high_drone,displ_05GDCdf);

displ_10GDC=cumtrapz(time, vel_10GDCdff);
displ_10GDCd=detrend(displ_10GDC,'c');
displ_10GDCd(1:ti)=0;
displ_10GDCd(tf:end)=0;
displ_10GDCdf =filtfilt(low_drone,displ_10GDCd);
displ_10GDCdff =-1000*filtfilt(high_drone,displ_10GDCdf);

```