

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DE SISTEMA DE ISOLAMENTO VIBRACIONAL PARA CAIXA DE  
ELETRÔNICOS DE UM DRONE DE ALTA CAPACIDADE

por

Mateus Cendron

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

Cendron, Mateus  
ESTUDO DE SISTEMA DE ISOLAMENTO VIBRACIONAL PARA  
CAIXA DE ELETRÔNICOS DE UM DRONE DE ALTA CAPACIDADE /  
Mateus Cendron. -- 2021.  
15 f.  
Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Vibrações. 2. Drones. 3. Isolamento Vibracional  
. I. De Leon, Daniel Milbrath, orient. II. Título.

Mateus Cendron

ESTUDO DE SISTEMA DE ISOLAMENTO VIBRACIONAL PARA CAIXA DE  
ELETRÔNICOS DE UM DRONE DE ALTA CAPACIDADE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Prof<sup>a</sup>. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Herbert Martins Gomes

Porto Alegre, maio de 2021

Cendron, Mateus. **Estudo de sistema de isolamento vibracional para caixa de eletrônicos de um drone de alta capacidade**. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## RESUMO

A crescente utilização de drones em várias áreas do mercado faz com que os fabricantes se preocupem em construir um equipamento estável e de longa vida útil, sendo que a vibração transmitida através da estrutura da aeronave é considerada como um dos fatores que podem prejudicar sua durabilidade, além de atrapalhar o bom funcionamento do equipamento. O presente trabalho traz um estudo para a implementação de um sistema de isolamento em uma caixa de componentes eletrônicos de um drone. Inicialmente, instala-se o drone em uma bancada de testes e mede-se, por meio de um acelerômetro, vibração transmitida para o local do conjunto a ser isolado, gerando-se gráficos de frequência-aceleração. A partir dos gráficos obtidos, são calculadas as características necessárias para um sistema isolante considerado como ótimo e busca-se no mercado elementos atenuadores com características que se aproximem das que foram indicadas. Após a seleção, foi calculado o grau de isolamento esperado com a implementação dos elementos escolhidos, atingindo o valor de 57% de atenuação na frequência mais baixa da faixa estudada e 80% de redução na frequência mais alta.

PALAVRAS-CHAVE: vibrações, drones, isolamento vibracional

Cendron, Mateus. **Study of vibrational isolation system for electronics box of a high capacity drone**. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## ABSTRACT

The increasing use of drones in various areas of the market makes manufacturers concerned with building stable and long-life equipment, and the vibration transmitted through the aircraft structure is considered as one of the factors that can impair its durability in addition to disrupting the proper functioning of the equipment. The present work brings a study for the implementation of an isolation system in a box of electronic components of a drone. Initially, the drone is installed on a test bench and the vibration transmitted to the location of the assembly to be isolated are measured using an accelerometer, generating frequency-acceleration graphs. From the graphs obtained, the necessary characteristics for an insulating system considered as optimal are calculated and attenuating elements with characteristics that approximate those indicated were sought in the market. After the selection, the degree of isolation expected with the implementation of the chosen elements was calculated, reaching a value of 57% of attenuation in the lowest frequency of the studied range and 80% of reduction in the highest frequency.

**KEYWORDS:** vibrations, drones, vibrational isolation

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>2</b>
3.1 SISTEMAS COM UM GRAU DE LIBERDADE SOB EXCITAÇÃO FORÇADA .	2
3.2. ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS: TRANSFORMADA DE FOURIER.....	2
3.3. TRANSMISSIBILIDADE.....	3
3.4 ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES .....	4
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>5</b>
4.1 INSTRUMENTAÇÃO E BANCADA DE ENSAIO .....	5
4.2 ENSAIO, AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS.....	7
4.3 CÁLCULO DE RIGIDEZ DOS ISOLADORES .....	7
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>12</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>13</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>14</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Drone é, por definição, qualquer aeronave, e também outros tipos de veículos, que operam com elevado grau de automatismo. Em geral, todo drone é um aeromodelo ou uma aeronave não tripulada remotamente pilotada (*RPA, Remotely Piloted Aircraft*). (ANAC, 2019)

As *RPA* possuem um vasto leque de aplicações como, lazer, imageamento, agricultura de precisão, entre outros. Na agricultura a utilização do equipamento vem ganhando destaque no mercado e, com isso, o agronegócio tem papel fundamental na utilização e na evolução da tecnologia. Tem-se como estimativa que 25% do que é faturado mundialmente através da utilização de drones esteja relacionado à aplicação agrícola. (ITARC, 2019)

São utilizadas três classes de divisão para segmentar os drones de acordo com o máximo peso de decolagem, no qual são consideradas as baterias ou combustível do equipamento e sua carga de transporte. Acima de 150 Kg, classe 1; entre 25 Kg e 150 Kg, classe 2; até 25 Kg, classe 3. (ANAC, 2017)

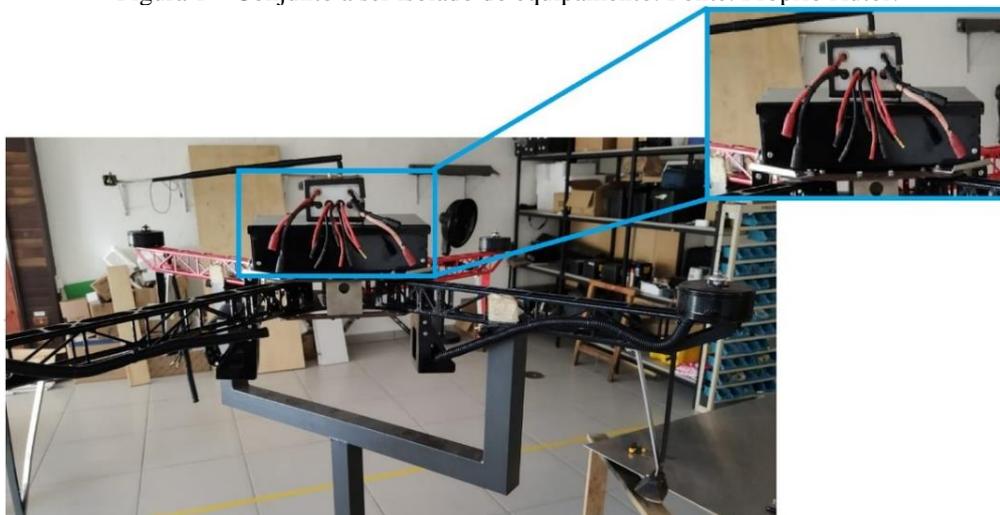
Os drones de alta capacidade, utilizados para pulverização agrícola ou mesmo para obtenção de imagens da lavoura são compostos, normalmente, por 4 ou 6 motores e hélices; em operação, vibrações são ocasionadas devido aos desbalanceamentos inerentes aos conjuntos em rotação. As vibrações mecânicas impactam negativamente a leitura na *IMU (Inertial Measurement Unit)* prejudicando a operação de controle do equipamento, além reduzir a vida útil dos componentes. (Radkowski; Szulim, 2014)

Para minimizar os efeitos prejudiciais da vibração, são utilizados isoladores que visam reduzir a transmissão de energia de um componente para o outro. Existem algumas formas de minimizar a transmissão de energia, sendo uma das mais comuns a instalação de um material absorvedor de energia entre a fonte de excitação e a estrutura que se quer isolar. (Gheller, 2013)

### 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo a análise vibracional em uma caixa de eletrônicos de um drone classe 3, identificando os pontos críticos com intuito de desenvolver um sistema de isolamento de vibração para o sistema, a fim de reduzir o problema de ruído mecânico lido pelos acelerômetros da controladora e de aumentar a vida útil dos componentes envolvidos. As dimensões principais do chassi estão detalhadas no Anexo 1. O sistema a ser isolado está representado pela Figura 1.

Figura 1 – Conjunto a ser isolado do equipamento. Fonte: Próprio Autor.



O conjunto a ser isolado é constituído por duas caixas, sendo que a de menor tamanho está colada diretamente na face superior da caixa maior.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Em seu artigo, Loewen (2013) busca identificar os principais problemas causados pela vibração mecânica em uma aeronave não tripulada, analisando picos de vibração geradas na operação do equipamento, exemplificando possíveis falhas de medição do acelerômetro que o excesso de vibração pode ocasionar; faz uma explanação sobre as diferenças entre choque e vibração e a forma que se deve abordar cada uma das situações; sugere uma metodologia de análise para, por fim, ser feita a escolha de um sistema de isolamento vibracional do sistema de controle da máquina.

Verbeke e Debruyne (2016) discutem em seu trabalho a análise experimental e numérica da vibração em um chassi de drone; fazem um estudo das principais fontes de vibração que podem trazer dano ao equipamento e realizam uma análise modal experimental dos principais componentes estruturais do conjunto. Os dados resultantes permitem, por exemplo, localizar regiões onde a eletrônica deve ser instalada para que não sofram com vibrações demasiadas.

Bekdash e la Cour-Harbo (2020) destacam em seu trabalho a importância do controle de vibrações de um drone, visto que as operações envolvem riscos que devem ser observados com cautela. Ressaltam que a análise modal da aeronave fornece informações importantes sobre a condição estrutural do equipamento, onde desenvolvem um sistema de monitoramento de falhas, demonstrando a importância da análise de vibração no contexto de estimar a potência de um sinal de vibração em diferentes frequências.

As pesquisas relacionadas a aeronaves remotamente pilotadas vêm crescendo nos últimos anos, acompanhando o crescimento da utilização desses equipamentos em diversas áreas. Os estudos abordam pontos que podem melhorar a operação dos drones, sendo a atenuação de vibração um assunto pertinente para que possíveis problemas sejam evitados.

## **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1 SISTEMAS COM UM GRAU DE LIBERDADE SOB EXCITAÇÃO FORÇADA**

Segundo Rao (2008), a definição de grau de liberdade é o menor número necessário de coordenadas independentes para determinar as posições de todos os componentes de um sistema em qualquer instante, assim, é possível denominar um sistema com um grau de liberdade quando apenas uma coordenada é suficiente para especificar sua posição em qualquer tempo.

Rao (2008) diz que um sistema que está sob excitação de uma força externa, que pode ser repetitiva, terá como resultado uma vibração denominada vibração forçada. Se a frequência da fonte excitadora coincidir com uma das frequências naturais do sistema, ocorre o fenômeno da ressonância, o que pode gerar grandes oscilações no sistema que podem ocasionar falhas estruturais e danos irreversíveis.

### **3.2. ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS: TRANSFORMADA DE FOURIER**

Rao (2008) descreve que se existir um conjunto de funções senoidais diferentes, haverá para cada qual uma amplitude e uma frequência particular. Todas as componentes de Fourier podem ser representadas em um gráfico, sendo que para cada frequência haverá uma amplitude relacionada.

Os termos de uma série de Fourier têm coeficientes que variam com a frequência e, utilizando o eixo das abcissas para plotar o domínio da frequência, tais coeficientes estarão nas ordenadas e a sequência dessas ordenadas será o espectro discreto das frequências.

O diagrama de espectro da transformada de Fourier se caracteriza pela representação gráfica da transformada de Fourier  $F(\omega)$  associada a uma função  $f(t)$ . Assim como o diagrama de espectro da série de Fourier é dividido em amplitude e fase, o diagrama de espectro da transformada de Fourier também se divide em magnitude e fase. (Sauter; Azevedo, 2020).

A forma exponencial da transformada de Fourier de uma função  $f(t)$  está representada pela Equação 1.

$$F(\omega) = F\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

onde  $f(t)$  é uma função real no tempo e  $F(\omega)$  é uma função complexa da frequência.

### 3.3. TRANSMISSIBILIDADE

Jordan (2005), demonstra que a relação entre as amplitudes dos movimentos da massa (movimento transmitido) e da base (movimento imposto), em termos absolutos, como função da frequência  $\omega$  é definida como transmissibilidade.

As frequências importantes do espectro de vibrações devem ser identificadas, de forma a evitar que elas se situem na região de amplificação, onde a transmissibilidade é superior a 1. (Jordan, 2005).

Segundo Rao (2008), a transmissibilidade de deslocamento ou  $Tr$  é a relação da amplitude de resposta do grau de liberdade  $X$  e do movimento da base  $Y$ , indicada pela razão  $X/Y$  através da Equação 2.

$$\frac{X}{Y} = Tr = \left[ \frac{1+(2\zeta r)^2}{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

onde  $\zeta$  representa o fator de amortecimento e  $r$  representa a relação da frequência de excitação e a frequência natural do sistema, determinada pela Equação 3.

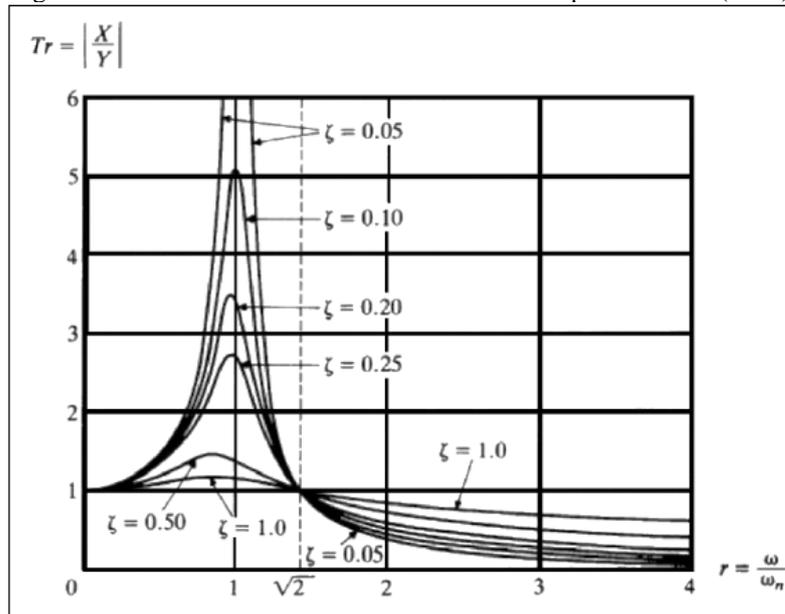
$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (3)$$

A frequência natural  $\omega_n$  pode ser calculada pela Equação 4.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

onde  $k$  é a rigidez e  $m$  é a massa do conjunto a ser isolado. O gráfico da Figura 2 mostra as curvas de transmissibilidade em função de  $r$  para diferentes fatores de amortecimento  $\zeta$ , para um sistema de um grau de liberdade.

Figura 2 – Curvas de transmissibilidade. Fonte: Adaptado de Rao (2008).



Observa-se no gráfico, segundo Rao (2008) que:

- se  $r$  tende a 0 ou se  $r$  tende a  $\sqrt{2}$ ,  $Tr$  tende a 1, ou seja, 100%;
- quando  $r < \sqrt{2}$  (região de amplificação) quanto maior o  $\zeta$  menor será  $Tr$ ;
- quando  $r > \sqrt{2}$  (região de isolamento) quanto maior o  $\zeta$  maior será  $Tr$ ;
- se  $r > \sqrt{2}$ , tem-se  $Tr < 1$  para qualquer  $\zeta$ .

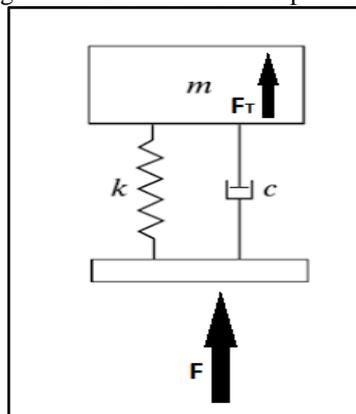
Rao (2008) demonstra que quando  $r$  possui um valor elevado ( $> \sqrt{2}$ ) e  $\zeta$  é pequeno, o termo  $(2\zeta r)^2$  da Equação 2 pode ser suprimido por simplicidade. Sendo assim, a Equação 2 pode ser aproximada pela Equação 5.

$$\frac{X}{Y} = Tr = \left[ \frac{1}{r^2 - 1} \right] \quad (5)$$

### 3.4 ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES

O modelo mais simplificado para se representar matematicamente um sistema no qual foi instalado um isolador de vibrações, é um sistema de 1 grau de liberdade excitado pelo suporte através de uma força  $F$  ao qual está conectado um elemento de rigidez e um elemento de amortecimento, transmitindo a força  $F_T$  ao corpo massivo, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Sistema de 1 grau de liberdade excitado pela base. Fonte: Próprio Autor.



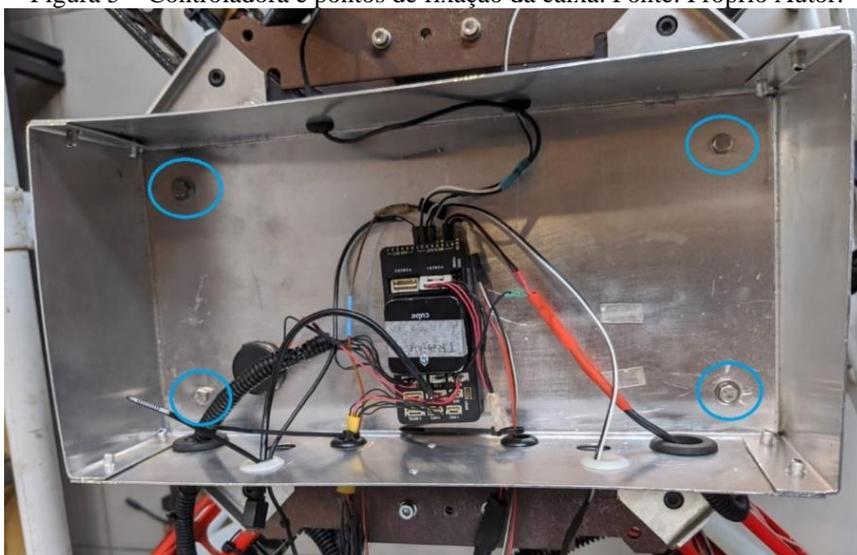
O isolador de vibrações atua no sentido de reduzir força transmitida ou movimento vibratório de um corpo para outro. Tal força pode ser proveniente do desbalanceamento de componentes rotativos. Um isolamento é tido como ótimo quando a transmissibilidade é igual ou menor que 0,1. (Gerges 2005)

#### 4. METODOLOGIA

##### 4.1 INSTRUMENTAÇÃO E BANCADA DE ENSAIO

O experimento consiste na aquisição dos dados de vibração do drone através do acelerômetro, que está situado dentro da controladora, sendo que a controladora está fixada na face inferior interna da caixa de eletrônicos. O acelerômetro utilizado é o ICM-20689 da TDK. O conjunto de caixas, com massa de 1,7 kg, por sua vez, é preso através de 4 parafusos no chassi da aeronave, sem qualquer tipo de isolante, fazendo com que a vibração da estrutura, gerada pelos motores e hélices, seja transmitida ao sistema. A localização da controladora e os pontos de fixação da caixa no chassi podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Controladora e pontos de fixação da caixa. Fonte: Próprio Autor.



O dispositivo é instalado no centro da caixa, fixado diretamente com fita de fina espessura e amortecimento desprezível. A fixação da caixa é feita pelos parafusos que prendem diretamente a caixa às chapas de alumínio, conforme destacado na figura. O tamanho demasiado da caixa se deve ao fato de que, em drones utilizados em operação, a caixa menor (vide figura 1) não existe, sendo que todos os componentes nela presentes estão distribuídos na caixa maior. O drone do experimento é usado apenas para testes e ainda está em uma configuração antiga de eletrônica, porém de massa equivalente, não trazendo prejuízos significativos ao estudo.

Para realizar o teste, utiliza-se uma bancada para experimento controlado. A Figura 6 ilustra a bancada utilizada para fixar o drone.

Figura 6 – Bancada de fixação da aeronave. Fonte: Próprio Autor.



Constituída basicamente por madeira e com dimensões de 580 x 580 mm de base e 1120 mm de altura, a bancada é presa ao solo. Na parte superior estão situados mancais que anexam eixos com finalidade de fixar a aeronave.

Na sequência, instala-se o drone à bancada para realizar o experimento. O equipamento instalado na bancada pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Drone instalado à bancada. Fonte: Próprio Autor.



Fixado na bancada, o drone tem seu movimento de translação limitado nos eixos x, y e z, estando livre para girar no eixo x. O teste necessita que o equipamento permaneça em equilíbrio para evitar leituras que não sejam de vibração da estrutura no acelerômetro.

#### 4.2 ENSAIO, AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Com a aeronave fixada na bancada, o experimento é iniciado. Para obter toda a faixa de frequências de operação, programou-se para que o *throttle*, que é o acelerador do drone e está relacionado com o nível de tensão que é enviado aos motores, aumentasse de 2 em 2 por cento, aumentando a velocidade angular dos motores gradativamente. Os dados de cada estágio são coletados por aproximadamente 4 segundos. O intervalo de *throttle* observado em um voo do equipamento varia de 30% até 80%, sendo essa a faixa que deve ser analisada no experimento. A relação entre *throttle* e velocidade angular dos motores não é linear e depende de configurações programadas no sistema de controle da aeronave, podendo apresentar características distintas em outros drones, além de depender das baterias utilizadas pelo equipamento. No caso de estudo, são utilizadas duas baterias de 25,4 Volts completamente carregadas, ligadas em série.

Com o experimento concluído, são extraídos os dados gerados pelo acelerômetro para analisar os picos de aceleração, relacionados à vibração da estrutura.

Com o auxílio de uma rotina de MATLAB® (versão estudantil), o gráfico no domínio do tempo gerado pelo acelerômetro é segmentado de forma que cada estágio do experimento tenha seu respectivo gráfico; aplica-se a transformada de Fourier descrita na Equação 1, gerando-se os gráficos no domínio da frequência, tornando-se possível a análise das frequências fundamentais, que caracterizam os pontos de maior concentração de energia, causados pela vibração do equipamento.

#### 4.3 CÁLCULO DE RIGIDEZ DOS ISOLADORES

Feita a análise dos picos de amplitude, calcula-se uma rigidez necessária para que o sistema de isolamento reduza a transmissibilidade consideravelmente, visando procurar o isolador disponível no mercado que seja adequado ao projeto. Para fazer tal análise, toma-se uma faixa de frequências considerada como crítica e calcula-se a rigidez necessária para o isolante considerando que, de forma ideal, a transmissibilidade seja igual ou menor do que 0,1 em toda a faixa. Sabe-se, conforme supracitado, que se  $r$  possui um valor elevado ( $> \sqrt{2}$ ),  $\zeta$  pode ser desconsiderado para simplificar os cálculos. Inicialmente, faz-se necessário definir  $r$ , ou seja, a relação entre a frequência de excitação e a frequência fundamental do conjunto a ser isolado. Para tal, isola-se  $r$  da Equação 5 anteriormente citada, resultando na Equação 6.

$$r = \sqrt{\left[\frac{1}{(Tr)} + 1\right]} = 3,31 \quad (6)$$

onde  $Tr = 0,1$ .

A partir da definição de  $r$ , faz-se possível descobrir a frequência natural fundamental do sistema, utilizando-se a Equação 3 com  $\omega_n$  em evidência, resultando na Equação 7.

$$\omega_n = \frac{\omega}{r} \quad (7)$$

na qual  $\omega$  é a frequência de excitação a ser isolada, obtida no ensaio descrito anteriormente.

Conforme o gráfico da transmissibilidade apresentado (Figura 2), nota-se que o valor de transmissibilidade decresce com o aumento de  $r$  (na região de isolamento), portanto o valor de  $\omega$  para definir  $\omega_n$  deve ser o menor da faixa crítica, visto que as vibrações das frequências superiores serão mais atenuadas pelo isolamento.

Com  $\omega_n$  definido, a rigidez do sistema é encontrada através da Equação 4, isolando-se a variável  $k$ , conforme indicado pela Equação 8.

$$k = \omega_n^2 * m \quad (8)$$

onde  $m=1,7$ .

Em posse do valor de rigidez ideal para o sistema, calcula-se a rigidez para cada isolador que será utilizado na fixação da caixa de eletrônicos. Dada a disposição do projeto, sem que haja modificação na maneira com que o conjunto é fixado ao chassi, tem-se a necessidade da utilização de 4 isoladores em paralelo, substituindo-se os 4 parafusos passantes. Considerando que são 4 isoladores iguais, com mesmo valor de rigidez, a rigidez individual  $k_{ind}$  dos elementos é obtida através da Equação 9.

$$k_{ind} = \frac{k}{4} \quad (9)$$

onde  $k$  é a rigidez total do sistema.

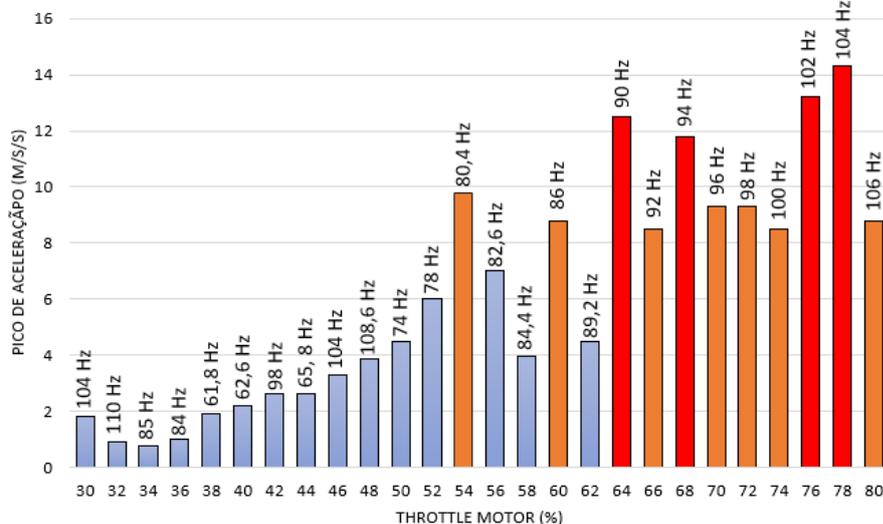
Com  $k_{ind}$  calculado, procura-se um isolante para a base com característica tão próxima do ideal quanto possível.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A faixa de operação do drone varia entre 30% e 80% de *throttle*, faixa que foi analisada no experimento. Os picos de aceleração medidos nos eixos X e Y do acelerômetro foram insignificantes se comparados aos picos encontrados no eixo Z, portanto a análise considerou a caixa de eletrônicos como um sistema de um grau de liberdade.

O gráfico da Figura 8 ilustra os picos de maior aceleração no eixo Z para cada estágio, indicando a frequência relacionada ao pico.

Figura 8 – Pico de Aceleração x *Throttle* x Frequência relacionada. Fonte: Próprio Autor.

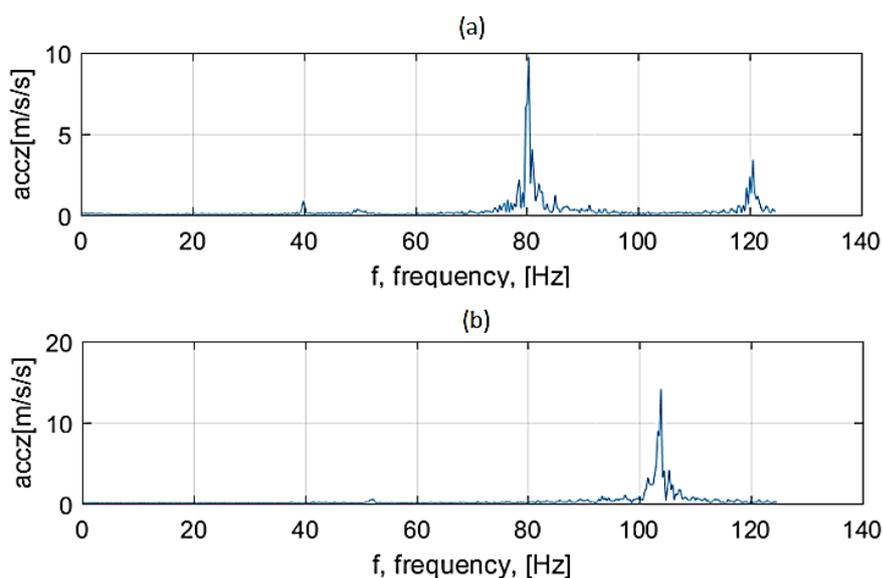


A partir dos resultados gerados, nota-se que o primeiro pico de aceleração que se destaca está no estágio de 54% de *throttle*, onde a frequência lida é de 80,4 Hz e a aceleração é de 9,8 m/s<sup>2</sup> ou 1 g. Assim, foi definido que o primeiro pico de aceleração que ultrapassou o valor de 1 g configura o limite inferior da faixa crítica. Os picos de maior intensidade ocorrem nos estágios de 64%, 68%, 76% e 78% de *throttle*, sendo que as frequências relacionadas são 90 Hz, 94 Hz, 102 Hz e 104 Hz respectivamente. Esses são considerados os pontos mais críticos da operação, onde há maior possibilidade de ocorrer problemas com os componentes.

As figuras 9(a) e 9(b) ilustram os gráficos de aceleração-frequência gerados pelo acelerômetro no estágio de 54% e 78% de *throttle*, que indicam o primeiro pico de aceleração elevada e o maior pico observado, respectivamente. Os demais gráficos gerados em todo o ensaio encontram-se no Apêndice A.

Figura 9 – a) Frequência x Aceleração em 54% de *throttle*; (b) Aceleração x Frequência em 78% de *throttle*.

Fonte: Próprio Autor.



Para 54% do *throttle* nota-se, na frequência de 80,4 Hz, uma aceleração de 9,8 m/s<sup>2</sup>, já para 78% de *throttle* observa-se uma frequência de 104 Hz com aceleração de 14,3 m/s<sup>2</sup>.

A Tabela 1 demonstra os resultados que indicam o valor de rigidez ideal do sistema de isolamento encontrado para os limites inferior e superior da faixa de frequências a ser isolada, bem como as variáveis calculadas no processo.

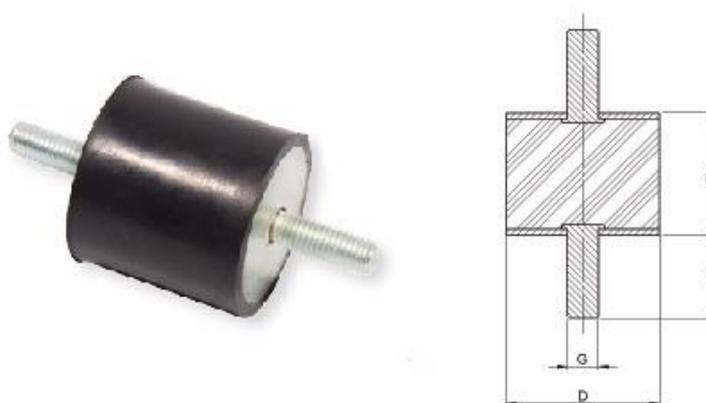
Tabela 1 – Resultados para seleção de isolador ideal. Fonte: Próprio Autor.

	Dados no limite inferior de frequência.	Dados no limite superior de frequência.
$\omega$ (Hz)	80,40	106
$\omega_n$ (Hz)	24,24	24,24
r (-)	3,32	4,37
$k$ (kN/m)	39,44	39,44
$k_{ind}$ (kN/m)	9,86	9,86
$Tr$ (-)	0,10	0,05

Observa-se que na menor frequência da faixa, 80,4 Hz, para que apenas 10% de vibração seja transmitida ao conjunto a ser isolado, uma rigidez de 39,44 kN/m deve ser empregada entre a fonte de transmissão e o elemento a ser isolado. Sabendo-se que o projeto necessita de 4 elementos de fixação, cada um deles deverá possuir uma rigidez de 9,86 kN/m. Valores de frequência acima da menor frequência da faixa terão isolamento mais efetivo, tendo o máximo isolamento no valor de maior frequência do intervalo, ou seja, em 106 Hz, sendo o isolamento de 95%.

Com os dados de rigidez ideal, procura-se no mercado um elemento atenuador de vibrações com características que satisfaçam o objetivo do projeto. A Figura 10 ilustra o modelo de atenuador selecionado.

Figura 10 – Elemento isolante selecionado. Fonte: Trelleborg Antivibration Solutions.



Onde  $D=10$  mm,  $H=10$  mm,  $G=M4$  e  $L=10$  mm. Trata-se da peça Bobbin - Type A10/15 fabricada pela multinacional Trelleborg, feita em borracha natural com insertos de fixação em ambas as extremidades, com rigidez de 32,70 kN/m, sendo o de rigidez mais baixa encontrado. As características e os resultados encontrados com a implementação de 4 isoladores deste tipo para os limites inferior e superior da faixa de frequências estudada são observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados calculados utilizando Bobbin - Type A10/15 Trelleborg. Fonte: Próprio Autor.

	Dados no limite inferior de frequência.	Dados no limite superior de frequência.
$\omega$ (Hz)	80,40	106
$\omega_n$ (Hz)	44,15	44,15
$r$ (-)	1,82	2,40
$k$ (kN/m)	130,80	130,80
$k_{ind}$ (kN/m)	32,70	32,70
$Tr$ (-)	0,43	0,20

Nota-se que para a menor frequência da faixa, o isolamento é de 57% da vibração transmitida e de 80% para a maior frequência. O resultado não está no nível considerado como ideal, porém tem pontencial de amenizar os picos encontrados no ensaio de forma que passem a ser consideravelmente menos prejudiciais aos componentes presentes na caixa de eletrônicos, na faixa crítica.

## 6. CONCLUSÃO

Foi definida e aplicada a metodologia de teste para desenvolvimento de um sistema de isolamento vibracional de uma caixa de eletrônicos de um drone de alta capacidade. O estudo indica as características que o sistema de isolamento deve possuir, indicando uma rigidez equivalente de 39,44 kN/m para que a transmissibilidade seja menor do que 0,1 em toda a faixa de frequências críticas. O componente encontrado no mercado possui rigidez de 32,70 kN/m e, devido à necessidade física da instalação de 4 componentes, a rigidez equivalente é de 130,80 kN/m. Com tais características o estudo prevê que, para a frequência mais baixa da faixa de vibração acentuada, haverá uma redução de 57% das forças transmitidas ao conjunto e, conforme a frequência aumenta, o isolamento também aumenta, chegando em seu máximo na mais alta frequência do intervalo, onde reduz em 80% a transmissão de vibração. Os termos do fator de amortecimento foram suprimidos do cálculo, portanto os resultados apresentados de isolamento são levemente superiores aos valores que seriam lidos em um projeto implementado na prática.

Para trabalhos futuros, sugere-se que, caso não seja encontrado um atenuador mais adequado, projete-se um componente isolante de forma que a rigidez seja mais próxima do ideal, a fim de otimizar a atenuação das forças de vibração. Tendo os componentes em mãos, devem ser instalados entre o chassi do drone e a caixa de eletrônicos, substituindo os parafusos de fixação. Com os atenuadores instalados, a metodologia apresentada deve ser aplicada novamente, obtendo-se os gráficos de aceleração-frequência a fim de comprovar a eficiência do sistema atenuante utilizado.

A realização do presente trabalho foi possibilitada através de disciplinas estudadas na graduação de engenharia mecânica. A principal disciplina contribuinte foi a de vibrações, porém foram utilizadas técnicas e conhecimentos adquiridos nas cadeiras de medições mecânicas e de componentes mecânicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAC. **Classes de Drones.** ANAC, 2019. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones/classes-de-drones>.

ANAC. **O que são drones?** ANAC, 2019. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/drones/aeronaves/o-que-sao-drones>

BEKTASH, O; LA COUR-HARBO, A. **Vibration Analysis for Anomaly Detection in Unmanned Aircraft.** Annual conference of the prognostics and health management Society, 2020.

GERGES, S. N. Y., et al. **Ruídos e vibrações veiculares.** Florianópolis: S. N. Y. Gerges, 2005.

ITARC. **Aprenda sobre o uso de drones.** ITARC, 2019. Disponível em: <https://itarc.org/uso-de-drones-na-agricultura/>.

JORDAN, R. **Ruídos e vibrações veiculares.** In Gerges, p.131-154. S. N. Y. Florianópolis: S. N. Y. Gerges, 2005.

LOEWEN, H. **Isolating Components from UAV Vibration.** MicroPilot, 2013.

RADKOWSKI, S; SZULIM, P. **Analysis of vibration of rotors in unmanned aircraft.** Faculty of Automotive, Warsaw University of Technology Warsaw, Poland, 2014.

RAO, S. **Vibrações mecânicas.** 4 a edição. 420p. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SAUTER, E; AZEVEDO, F.S. **Análise de Fourier.** Porto Alegre, 2020.

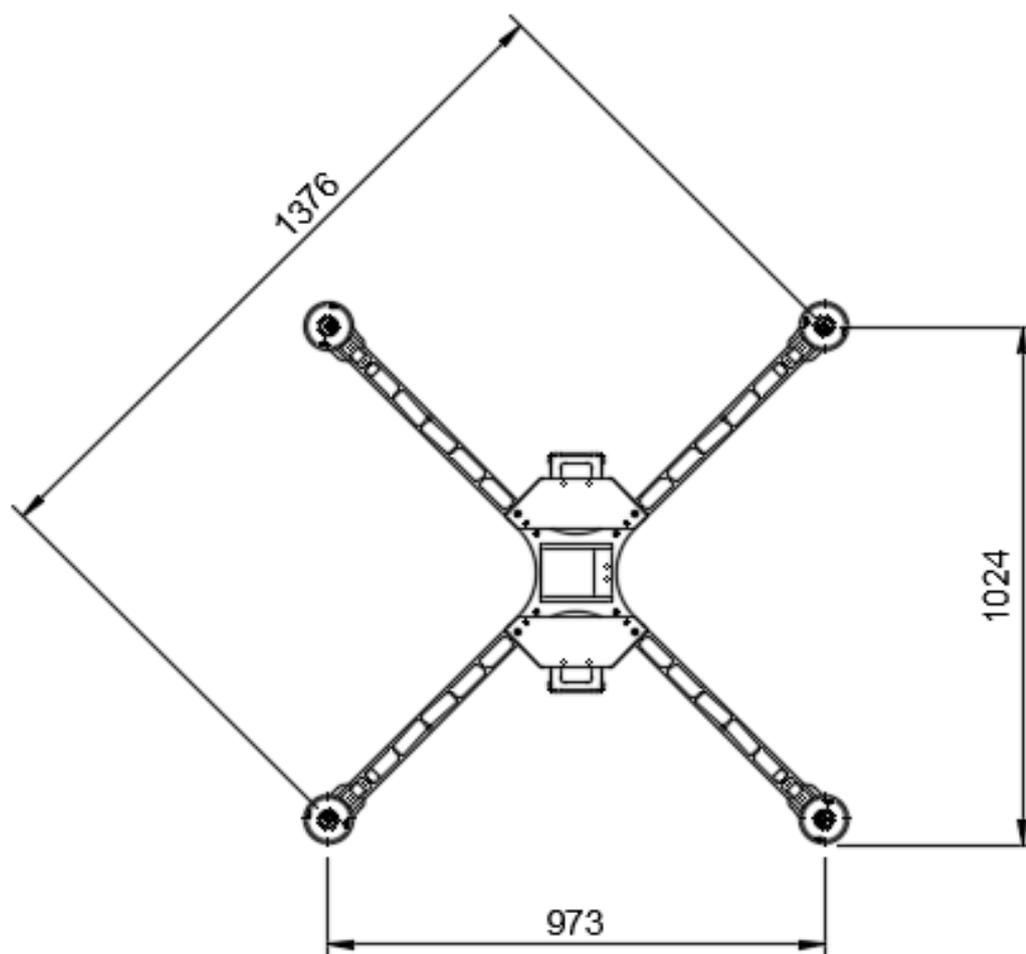
TDK. **ICM-20689 Datasheet.** Disponível em: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/icm-20689-datasheet/>

TRELLEBORG. **Trelleborg IAVS product catalogue.** Trelleborg Industrial AVS, 2016. Disponível em: <https://www.trelleborg.com/en/anti-vibration-solutions/products-and-solutions>.

VERBEKE, J; DEBRUYNE, S. **Vibration analysis of a UAV multirotor frame.** Faculty of Engineering Technology, Oostende, Belgium, 2016.

**ANEXO A**

Este capítulo traz o desenho técnico do chassi, detalhando as dimensões principais da aeronave em milímetros.



## APÊNDICE A

Este apêndice apresenta os gráficos obtidos no experimento, variando de 30% a 80% de *throttle*, com incremento de 2 em 2%.

