

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Mateus Cassol Cella

**DESEMPENHO DE SMARTPHONE NA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM UMA  
MOTORROÇADORA LATERAL**

Santa Maria, RS  
2021

**Mateus Cassol Cella**

**DESEMPENHO DE SMARTPHONE NA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM UMA  
MOTORROÇADORA LATERAL**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo de Souza

Santa Maria, RS

2021

**Mateus Cassol Cella**

**DESEMPENHO DE SMARTPHONE NA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM UMA  
MOTORROÇADORA LATERAL**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

**Aprovado em 10 de julho de 2021**

---

**Carlos Eduardo de Souza (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Marcos Daniel de Freitas Awruch (UFSM)**

---

**Charles Rech (UFSM - CS)**

Santa Maria, RS

2021

## RESUMO

### DESEMPENHO DE SMARTPHONE NA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM UMA MOTORROÇADORA LATERAL

AUTOR: Mateus Cassol Cella

ORIENTADOR: Carlos Eduardo de Souza

As motorroçadoras são máquinas bastante difundidas no mundo inteiro. São utilizadas tanto em serviços domésticos ou jardinagem amadora, quanto em serviços profissionais de jardinagem ou colheitas semi-mecanizadas. Seu uso torna estas tarefas mais fáceis de serem executadas, porém, o operador fica sujeito aos agentes físicos, vibração e ruído, emitidos pela máquina. Quando esta vibração for excessiva, é responsável por causar muitos prejuízos a saúde do operador, como a Síndrome de Raynaud. Desta forma, é necessário ter um controle e monitoramento deste fenômeno, de forma a prevenir esses danos. Para tanto, são feitos ensaios de vibração de mãos e braços, regrados por normas técnicas nacionais e internacionais. Porém, os equipamentos necessários para estes testes possuem custo econômico elevados. Por outro lado, existem os *smartphones*, mais baratos, bastante difundidos, e possuem a capacidade de medir inúmeras grandezas físicas, dentre elas, a vibração. Desta forma, este trabalho tem como objetivo testar *smartphones*, como um meio alternativo para a medição de vibração de mãos e braços em uma motorroçadora. Para isso, foi avaliada a vibração em uma motorroçadora, com dois modelos de *smartphones*, e um equipamento profissional, e comparados os resultados. Como resultado, os valores de vibração equivalente em RMS, medidos com o, *smartphones*, se distanciaram dos valores obtidos com o equipamento profissional. Porém, com um dos *smartphones*, foi possível identificar frequências muito importantes presentes no equipamento, como a do motor e do mecanismo de corte. Desta forma, tornando o uso de *smartphones* para medição de vibração de mãos e braços promissor.

**Palavras chaves:** motorroçadoras; *smartphones*; vibrações mecânicas; vibração de mãos e braços.

## **ABSTRACT**

### **SMARTPHONE PERFORMANCE IN THE VIBRATION EVALUATION ON A BRUSH CUTTER**

AUTHOR: Mateus Cassol Cella

ADVISOR: Carlos Eduardo de Souza

The brush cutters are very common tools in the entire world. They are used both in domestic services or amateur gardening, as well as in professional gardening services or semi-mechanized harvests. These tasks are easier to be performed, when using a brush cutter, however, the operator is subject to physical agents, vibration and noise, emitted by it. When this vibration is excessive, it is responsible for causing many injuries to the operator's health, such as Raynaud's Syndrome. Thus, in order to prevent these injuries, it is necessary to control and monitor this phenomenon. For this, are performed evaluations of hand-arm vibrations, governed by national and international technical standards. However, the equipment needed for these tests has high acquisition values. On the other hand, there are smartphones, that are cheaper, and have the ability to measure numerous physical quantities, among them, the vibration. In this way, this work aims to test smartphones, as an alternative method to measure the hand-arm vibration in a brush cutter. For that, the vibration was evaluated in a brush cutter, with two models of smartphones, and a professional equipment, and the results were compared. As a result, the equivalent vibration values, in RMS, measured with the smartphones, differed from the values obtained with the professional equipment. However, with one of the smartphones, it was possible to identify very important frequencies present in the equipment, such as that of the engine and the cutting attachment. In this way, making the use of smartphones for measuring hand-arm vibration promising.

**Keywords:** brush cutters; smartphones; mechanical vibrations; hand-arm vibration.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Componentes de motorroçadora lateral. ....   | 11 |
| Figura 2 - Diferentes mecanismos de corte utilizados em motorroçadoras. (a) Lâmina de 3 pontas; (b) Lâmina de 2 pontas; (c) Serra Woodcut; (d) Fio de nylon; (f) Disco Serra; (g) Facas plásticas. .... | 12 |
| Figura 3 - Função de deslocamento para um oscilador amortecido. ....  | 15 |
| Figura 4 – Utilização de um martelo demolidor (b) e uma furadeira elétrica (d), exemplos de situações em que pode haver exposição a vibração de mãos e braços. ....                                     | 17 |
| Figura 5 - Mãos de indivíduo afetado pela Síndrome dos Dedos brancos, causada por vibração. ....  | 18 |
| Figura 6 - Curva da ponderação de frequência indicada pela ISO 5349 - 1 de 2001. ....   | 18 |
| Figura 7 - Exemplo de sinal de vibração no tempo, obtido por celular e processado por meio do <i>software</i> Matlab®. ....   | 19 |
| Figura 8 - Sinal visto na figura 3, com ampliação para uma janela de 5 segundos, onde já é possível observar padrões se repetindo ao longo do tempo. ....   | 19 |
| Figura 9 - Tipo de transformada de Laplace e sua respectiva aplicação. ....   | 21 |
| Figura 10 - Transformada rápida de Fourier aplicada ao sinal de vibração no tempo visualizado na figura 3. ....   | 22 |
| Figura 11 - Espectro de potência para diferentes tamanhos de janela. ....   | 23 |
| Figura 12 - Esquema representando a ocorrência do fenômeno de Aliasing. ....  | 24 |
| Figura 13 - Fluxograma do procedimento realizado para avaliação de vibração na motorroçadeira. ....   | 28 |
| Figura 14 - Roçadora Stihl FS 350. ....   | 29 |
| Figura 15 - Carretel de nylon, mecanismo de corte utilizado no trabalho. ....   | 29 |
| Figura 16 - Especificações fornecidas pelo fabricante, para o analisador de vibração Type 4447, da Brüel&Kjær. ....   | 30 |
| Figura 17 - Analisador de aceleração Brüel&Kjær Type 4447 (a) e acelerômetro Type 4524-B-001 (b). ....  | 30 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 18 - Posicionamento do acelerômetro para avaliação da vibração mão-braço. ....  | 31 |
| Figura 19 - Posicionamento dos acelerômetros na estrutura da motorroçadora.....  | 32 |
| Figura 20 - Posicionamento do acelerometro e dos celulares na mão direita para a coleta de dados de vibração. ....                                       | 32 |
| Figura 21 - Esquema de coleta de dados com o aparelho Type 4447. (1 - Acelerômetro; 2 - Type 4447; 3 - Motorroçadora; 4 - Computador). ....              | 33 |
| Figura 22 - Esquema de coleta de dados com smartphone. (1 - Celular; 2 - Motorroçadora; 3 - Computador). ....  | 33 |
| Figura 23 - Dados de aceleração no tempo, em plena rotação, para o Celular 1 (a) e Celular 2 (b). ....   | 37 |
| Figura 24 - Dados de aceleração no tempo, marcha lenta, para o Celular 1 (a) e Celular 2 (b). ....   | 37 |
| Figura 25 - Dados de aceleração no tempo, com escala limitada, na operação de plena rotação, para o Celular 1 (a) e Celular 2 (b). ....                  | 38 |
| Figura 26 - Espectros de potência do sinal de vibração da mão direita em plena rotação, medidos com o Celular 1, com diferentes tamanhos de janela. .... | 39 |
| Figura 27 – Espectros de potência, para os dois celulares, no mesmo intervalo de exibição. .   | 40 |
| Figura 28 – Espectros de potência, na mão direita, Celular 2. ....   | 41 |
| Figura 29 - Espectros de potência para mão esquerda, dados coletados com Celular 2. ....   | 42 |

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....  | 9  |
| 1.1 OBJETIVOS .....  | 10 |
| 2 REVISÃO TEÓRICA .....  | 11 |
| 2.1 MOTORROÇADORAS .....   | 11 |
| 2.2 VIBRAÇÕES MECÂNICAS .....  | 13 |
| 2.2.1 Classificação das vibrações.....   | 13 |
| 2.2.2 Equação do movimento para sistemas vibratórios .....   | 14 |
| 2.3 VIBRAÇÕES E O CORPO HUMANO .....   | 16 |
| 2.3.1 Vibração de corpo inteiro.....   | 16 |
| 2.3.2 Vibração de mãos e braços.....   | 16 |
| 2.4 PROCESSAMENTO DE SINAL.....  | 19 |
| 2.3.1 Transformada de Fourier e Séries de Fourier.....   | 20 |
| 2.3.2 Transformada Rápida de Fourier.....  | 21 |
| 2.3.3 Janelamento de sinal e Densidade espectral de potência ( <i>Power Spectral Density</i> - PSD)..... | 22 |
| 2.3.4 Teorema de Nyquist .....   | 23 |
| 2.3.5 Vibração RMS.....  | 24 |
| 2.3.6 Vibração equivalente.....  | 25 |
| 2.5 NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS .....  | 25 |
| 2.6 ESTUDOS SEMELHANTES.....   | 26 |
| 3 PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO .....  | 28 |
| 3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....   | 29 |
| 3.2 POSICIONAMENTO DOS ACELERÔMETROS .....   | 31 |
| 3.3 MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA .....   | 34 |
| 3.4 MÉTODO DE MEDIÇÃO .....  | 34 |



|   |    |
|---|----|
| 4 RESULTADOS .....                        | 35 |
| 4.1 VALORES EM RMS.....                   | 35 |
| 4.2 VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO.....     | 36 |
| 4.3 JANELAMENTO .....                     | 38 |
| 4.4 ESPECTROS DE POTÊNCIA .....           | 39 |
| 5 CONCLUSÕES .....                        | 44 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 45 |
| 6 REFERÊNCIAS .....                       | 46 |

## 1 INTRODUÇÃO

A motorroçadora lateral é uma ferramenta muito difundida, e seu uso vem aumentando nos últimos anos. As principais utilizações para esta máquina são em operações urbanas de jardinagem ou operações agrícolas, em colheitas semimecanizadas e manutenção de terrenos, por exemplo. Um dos principais motivos da utilização deste tipo de equipamento é seu baixo custo, e a facilidade que ele oferece na operação (Bernardi, et al., 2017).

Apesar da facilidade em operar uma motorroçadora, o uso destes equipamentos pode trazer sérios riscos à saúde do operador. Além da presença da vibração e o ruído do equipamento, a associação de fatores como o mal uso do equipamento, com postura incorreta por exemplo, potencializam os riscos ao utilizá-lo (BERNARDI et al. 2017). Além disso, há a possibilidade da ocorrência de defeitos mecânicos na máquina, potencializando ainda mais as vibrações e ruídos que são emitidos pela máquina.

No Brasil, a legislação percebe a importância em controlar e avaliar o nível de exposição às vibrações. A Norma Regulamentadora Nº 15 (BRASIL, 2018), trata de atividade e operações insalubres, caracteriza a exposição às vibrações de mãos e braços como operação insalubre, caso ultrapasse o valor limite diário de exposição. Já a Norma Regulamentadora Nº 9 (BRASIL, 2020), em conjunto com a NR-15, estabelece a necessidade da elaboração e implementação de programas para reduzir e prevenir riscos ocasionados pelas vibrações.

Deste modo, quando são realizadas atividades com máquinas manuais, como as motorroçadoras, muitas vezes é necessário a realização de ensaios, para avaliar o nível de vibração a qual o operador está exposto. Para a avaliação da vibração em corpo humano, deve-se utilizar equipamentos que atendem as especificações exigidas pela norma internacional ISO 8041 de 2005.

Por se tratarem de equipamentos de alto padrão, os equipamentos que atendem as normas da ISO 8141 de 2005, possuem um custo econômico bastante elevado. Este fato impossibilita a aquisição destes equipamentos por parte de pequenas empresas ou profissionais autônomos. Por outro lado, atualmente existem os *smartphones*, que possuem um valor de aquisição muito menor e, como relata Vieira (2013), possuem sensores que os tornam capazes de mensurar diversas grandezas físicas, e dentre elas, destacamos a aceleração.

Tendo isso em vista, é válido o teste para avaliar o desempenho de *smartphones* para mensurar o nível de vibração a que está exposto um operador de motorroçadeira. Desta forma, com os resultados obtidos neste trabalho, é possível dizer que o uso de smartphones para a

avaliação de vibração em motorroçadoras é promissor, e pode se tornar possível com mais estudos sobre o tema. E caso haja avanços, o valor investido para se fazer uma análise de vibração será drasticamente reduzido. O que pode tornar possível até mesmo que uma pessoa que possui uma motorroçadora para serviços domésticos, possa avaliar os riscos que sua máquina proporciona, em relação às vibrações.

### 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é avaliar o desempenho de um *smartphone* quanto a sua capacidade em coletar dados de vibração de mãos e braços em uma motorroçadeira lateral.

Desta forma, para atingir o objetivo principal do trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar revisão bibliográfica sobre vibração e seus efeitos no corpo humano;
- Realizar medições de vibração com diferentes *smartphones* e com equipamento profissional, para avaliar o desempenho dos *smartphones* em comparação ao equipamento;
- Comparar resultados de vibração obtidos com *smartphone* com trabalhos científicos;
- Avaliar o desempenho dos *smartphones* quanto a capacidade de captar a vibração de uma motorroçadora;
- Concluir se os *smartphones* são aptos para avaliar a vibração em motorroçadora laterais.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

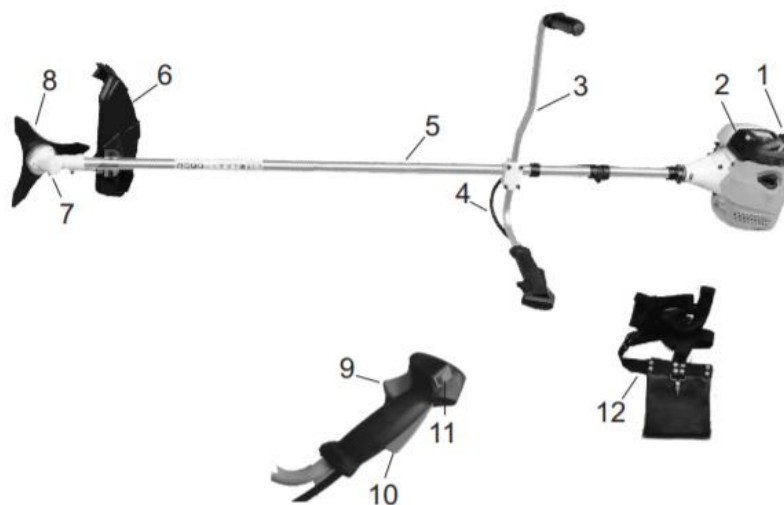
Neste capítulo foi feita uma revisão teórica sobre os principais tópicos abordados no trabalho. Inicialmente com uma breve revisão sobre motorroçadoras, falando sobre sua construção e funcionamento. O fenômeno da vibração, bem como a sua interação com o corpo humano, também foi abordado neste capítulo. Foi feita também, uma revisão sobre o processamento de dados. Por fim, realizou-se uma breve revisão de alguns trabalhos que já utilizaram *smartphones*.

### 2.1 MOTORROÇADORAS

As motorroçadoras laterais são equipamentos motorizados, utilizados para roçadas e colheitas semimecanizadas, de trigo e aveia, por exemplo. Essas máquinas são constituídas por: punho de arranque, motor ciclo Otto 2 tempos ou 4 tempos, guidão, cabo do acelerador, haste de alumínio, protetor do mecanismo de corte, mecanismo de corte, caixa de engrenagens, gatilho do acelerador e trava do gatilho, chave liga/desliga e o cinto de sustentação (Buffalo, 2013). A Figura 1 apresenta um modelo típico de motorroçadora.

Figura 1 - Componentes de motorroçadora lateral.

- |  |   |
|--|---|
| 1. Punho de Arranque.                            | 7. Caixa de engrenagens.                        |
| 2. Motor 2 Tempos.                               | 8. Lâmina de corte / Disco de nylon automático. |
| 3. Guidão.                                       | 9. Gatilho do Acelerador.                       |
| 4. Cabo do Acelerador.                           | 10. Trava do gatilho do acelerador..            |
| 5. Haste em alumínio 28mm.                       | 11. Chave de Comando (liga/desliga).            |
| 6. Protetor da lâmina/disco de nylon automático. | 12. Cinto de Sustentação confortável.           |

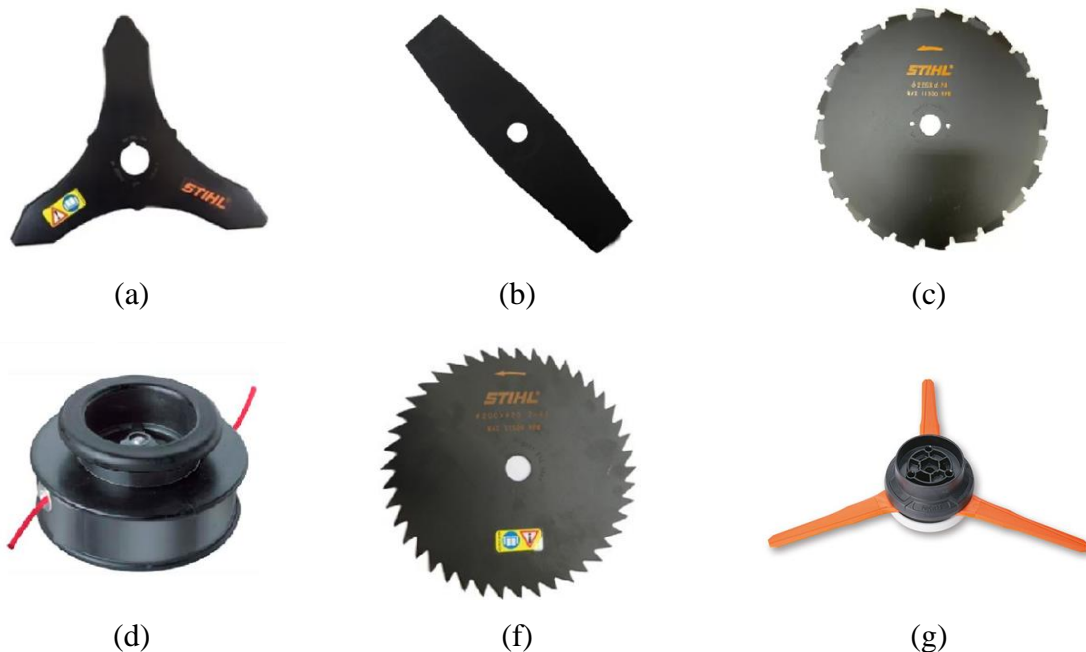


Uma das principais partes de uma motorroçadora é mecanismo de corte. É esta parte a responsável para que a máquina execute sua função. Ele é acionado por meio de um eixo conectado à caixa de engrenagens, que transferem o movimento rotatório do motor. Esse movimento da ferramenta de corte é o responsável por cortar o material a ser roçado.

Os tipos de mecanismos de corte utilizados são variados, podendo ser de materiais e formas diferentes. As principais variações nas características deste mecanismo se dão em virtude das características do material a ser roçado e a intensidade de uso do equipamento. O mecanismo usado para roçadas de grama em jardins, por exemplo, é diferente do usado para roçar áreas que possuem uma vegetação mais densa.

Os mecanismos de corte mais comuns são os de fio, de facas, lâmina circular, de pontas e trituradoras (COTF, 2013). Na Figura 2 é possível visualizar alguns destes mecanismos. Vale observar a grande diferença na geometria dos mecanismos, para se adaptar ao serviço proposto. Exemplo disso, é a Serra Woodcut, Figura 2 (c), usada para corte de pequenos troncos, ou da Lâmina de 3 e 2 pontas, Figura 2 (a) e (b), respectivamente, normalmente utilizados para corte de gramíneas. O mecanismo avaliado neste trabalho foi apenas o fio de nylon, que pode ser observado na Figura 2 (d).

Figura 2 - Diferentes mecanismos de corte utilizados em motorroçadoras. (a) Lâmina de 3 pontas; (b) Lâmina de 2 pontas; (c) Serra Woodcut; (d) Fio de nylon; (f) Disco Serra; (g) Facas plásticas.



Fonte: Site do fabricante (<https://www.stihl.com.br/conjuntos-de-corte-para-rocadeiras.aspx>).

## 2.2 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

As vibrações, podem ser descritas por movimentos que se repetem em uma certa frequência ao longo intervalo de tempo. Um sistema vibratório pode ser modelado em três componentes: massa, mola e amortecedor, que tem como função, respectivamente, armazenar energia cinética, armazenar energia potencial e dissipar energia (Rao, 2008).

A explicação física para o fenômeno de vibração, se dá pela interação das energias potencial e cinética. A mola, que pode ser qualquer componente que armazena energia potencial elástica, como exemplo o cabo de uma motorroçadora, irá armazenar energia e transferir para a massa, gerando energia cinética e vice-versa (Inman, 2014). No caso de o sistema ser amortecido, também haverá uma parcela de energia que será dissipada a cada ciclo do sistema, como em casos de motorroçadeiras que utilizam sistemas de amortecimento.

### 2.2.1 Classificação das vibrações

Levando em consideração o que é dito por Kelly (2000) e Rao (2008), existem inúmeras maneiras para se classificar as vibrações. Quando classificadas quanto a forma que são excitadas, podem ser livres, forçadas ou forçadas harmonicamente. Podem também ser classificadas quanto a presença ou não de amortecimento, que são as vibrações amortecidas e não amortecidas. Além disso, ainda podem ser classificadas como lineares ou não lineares, e também determinísticas e aleatórias.

Segundo Rao (2008), uma vibração forçada, é definida por um sistema que é submetido a uma força externa repetitiva, como em motores diesel. Em casos de vibrações forçadas em que ocorra a coincidência na frequência desta força cíclica com a frequência natural do sistema, ocorrerá o fenômeno de ressonância, que pode ocasionar uma falha da estrutura, devido às grandes amplitudes dos deslocamentos resultantes.

Em motores 4 tempos, por exemplo, pode-se assumir que a vibração que ocorre é uma vibração forçada harmonicamente, já que, a cada duas voltas do virabrequim ( $720^\circ$ ), uma força irá agir sob a cabeça do pistão ciclicamente (Martins, 2017). Porém, se pensarmos no caso de um motor 2 tempos ciclo Otto, utilizados em motorroçadoras, essa força cíclica irá agir a cada  $360^\circ$ , ou seja, a cada revolução do virabrequim.

As vibrações são amortecidas quando durante a oscilação há algum tipo de perda de energia, seja por atrito ou outra forma de resistência. Quando não há a presença dessas perdas

de energia, ou quando a quantidade de energia dissipada for tão pequena que seja possível desprezá-la, o sistema é chamado de não amortecido (Rao, 2008).

Chamamos de vibração linear quando os componentes básicos do sistema, a massa, mola e amortecedor, se comportam linearmente. Nesse caso a equação diferencial que comanda o sistema vibratório é também linear. Caso contrário, o sistema é chamado de não linear, e a equação que a comanda será também não linear (Rao, 2008).

Por fim, Rao (2008), classifica as vibrações como determinísticas e aleatórias. Quando se tem conhecimento da força ou movimento que interage com o sistema, essa força é conhecida como determinística, e a vibração resultante será também determinística. Já em casos em que a excitação é aleatória, não é possível prever o valor da mesma em dado instante, e neste caso é chamada de vibração aleatória.

### 2.2.2 Equação do movimento para sistemas vibratórios

Sabendo então que a energia em sistema vibratório é composta parte por energia cinética (T) e parte energia potencial (U), e que, pelo princípio de conservação de energia, a soma delas será constante, logo:

$$\frac{d}{dt}(T + U) = 0, \quad (1)$$

e sabendo que:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2, \quad (2)$$

e,

$$U = \frac{1}{2}kx^2, \quad (3)$$

com  $x$ , sendo a variável dependente do sistema, a qual depende de  $t$ , e representa o deslocamento do sistema,  $m$  a massa do sistema e  $k$  a constante de mola. Desta forma, a equação do movimento, para um sistema vibratório livre e não amortecido, é:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (4)$$

caso o sistema seja amortecido, é adicionada mais uma componente à equação, relacionada ao amortecimento, a qual é uma força a velocidade do deslocamento e à constante de amortecimento do sistema. Logo, a equação do movimento é dada por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0. \quad (5)$$

A solução para equação (4) de um sistema vibratório sem amortecimento é dada por:

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi), \quad (6)$$

onde,  $x_m$  é a amplitude do movimento,  $\omega t + \phi$  é a fase do movimento, que é dependente do tempo ( $t$ ). O ângulo  $\phi$  é a constante de fase, o qual depende do deslocamento e velocidade em  $t = 0$ , e o  $\omega$ , é a frequência angular, que é dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

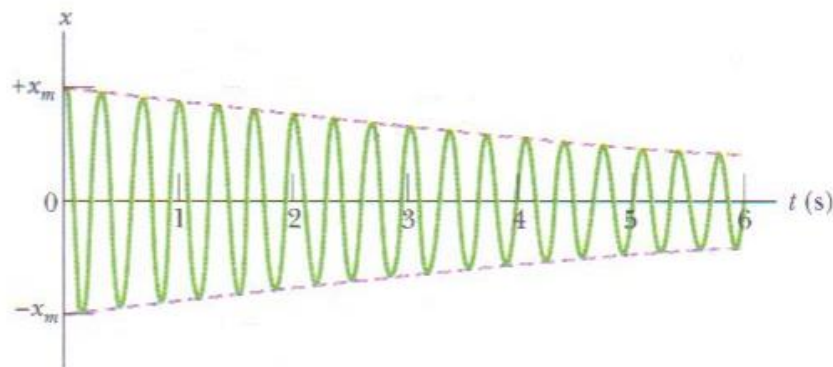
onde,  $k$  é a constante de mola do sistema, e  $m$  é a massa do sistema (Rao, 2008). É possível notar que a solução da Equação 4, é equação de deslocamento de um oscilador harmônico simples.

No caso de o sistema ser amortecido, Equação 5, a solução pode ser descrita como:

$$x(t) = C_1 e^{\left\{-\frac{c}{2m} + \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right\}t} + C_2 e^{\left\{-\frac{c}{2m} - \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right\}t} \quad (8)$$

onde,  $c$  é a constante de amortecimento do sistema, e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes determinadas pelas condições iniciais do sistema, a solução passo a passo para a equação pode ser encontrada no livro *Vibrações Mecânicas*, Rao, 2008.

Figura 3 - Função de deslocamento para um oscilador amortecido.



Fonte: Halliday; vol 2, 2010.



Em sistemas de vibrações forçadas, considerando que a força que interage com o sistema seja  $F(t)$ , a equação do movimento obtida para um sistema excitado harmonicamente é:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (9)$$

## 2.3 VIBRAÇÕES E O CORPO HUMANO

As vibrações que interagem com o corpo humano são classificadas quanto à forma que são transmitidas. Quando transmitidas ao corpo por meio de uma superfície ao qual o mesmo está apoiado, como a vibração que é sentida quando estamos sentados no banco de um automóvel em movimento, por exemplo, são chamadas de vibrações de corpo inteiro. Quando a vibração interage diretamente com as mãos e braços, é chamada de vibração mão-braço.

### 2.3.1 Vibração de corpo inteiro

Griffin (1990) define que a vibração de corpo inteiro (VCI - em inglês *Whole Body Vibration, WBV*) ocorre quando o corpo está apoiado em uma superfície que está vibrando, como por exemplo um operador de um trator, que está se apoiando no banco e direção da máquina, neste caso há vibração advinda do motor, transmissão e interação do trator com o terreno sendo transmitida ao corpo. Segundo Braga (2007), essa vibração é de baixa frequência, entre 0,5 a 80Hz, e grande amplitude.

Seidel e Heide (1986), relatam que indivíduos expostos à valores próximos do limite máximo recomendados pelas normas internacionais, para este tipo de vibração, há uma maior probabilidade de que ocorram distúrbios no sistema nervoso e sistema musculoesquelético. A exposição prolongada a este tipo de vibração pode causar ainda, distúrbios em outros sistemas do corpo como o sistema digestivo e órgãos do sistema reprodutivo feminino.

### 2.3.2 Vibração de mãos e braços

A vibração de mãos e braços (VMB – em inglês *hand arm vibration*), ou ainda *hand transmitted vibration*, atinge, como o próprio nome sugere, as mãos e braços. Ela ocorre sempre que se está segurando um dispositivo ou ferramenta que emite vibração, como uma motorroçadora lateral (MANSFIELD, 2005). Outros exemplos de dispositivos que podem causar exposição as vibrações de mãos e braços são parafusadeiras, martelos demolidores, motosserras, furadeiras.

Esse tipo de vibração pode causar inúmeros prejuízos à saúde de uma pessoa, podendo causar distúrbios nos sistemas nervoso, vascular e musculoesquelético (NILSSON et al. 2017;

GOMES & SAVIONEK, 2014; HARADA & MAHBUB, 2007). Além disso, esses distúrbios podem ainda serem agravados, dependendo do tempo e do nível, em que o indivíduo foi exposto à vibração.

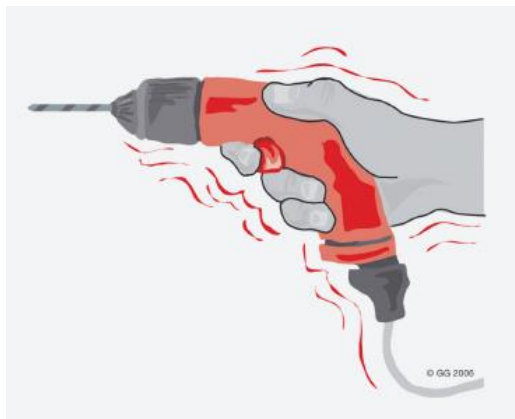
Figura 4 – Utilização de um martelo demolidor (b) e uma furadeira elétrica (d), exemplos de situações em que pode haver exposição a vibração de mãos e braços.



(a)



(b)



(c)

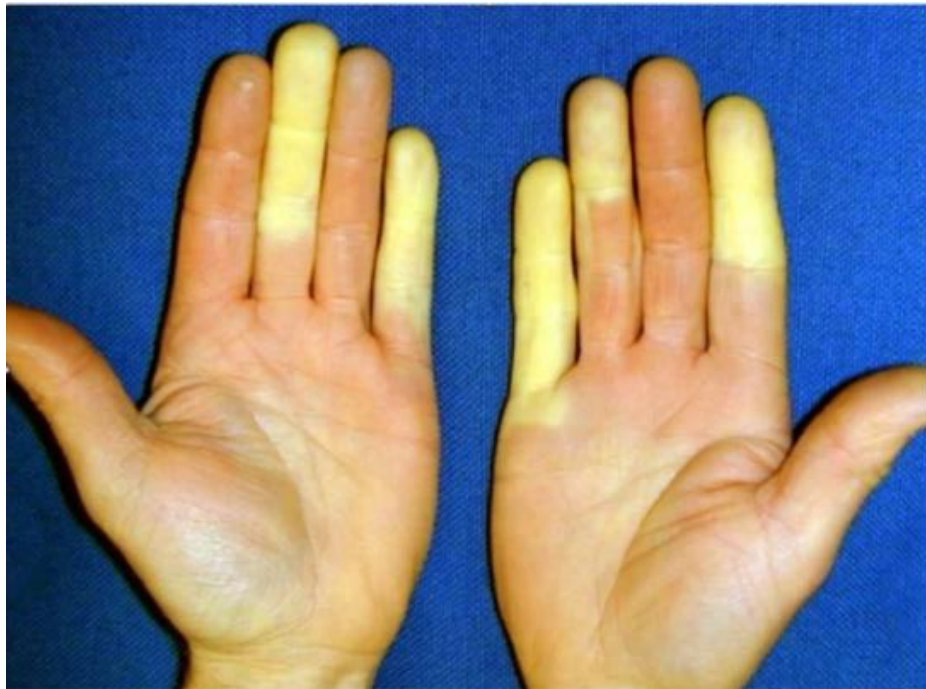


(d)

Fonte: (a) e (c) World Health Organization (2009); (b) <http://www.robertgerrard.com/2018/01/hand-arm-vibration-syndrome-managing-the-risk/>; (c) <https://apaixonadosporferramentas.com.br/guia-completo-sobre-as-furadeiras/>

Uma das doenças mais conhecidas, a qual se origina da exposição a vibração de mãos e braços, é a síndrome dos dedos brancos, também conhecido por Fenômeno de Raynaud. Trata-se de um distúrbio vascular que reduz o fluxo sanguíneo nas mãos e, em casos mais graves, pode causar a necrose dos dedos (MANSFIELD, 2005). A principal característica desta síndrome é a aparência das mãos, onde a pele se torna pálida, principalmente na região dos dedos, como pode ser visto na Figura 5.

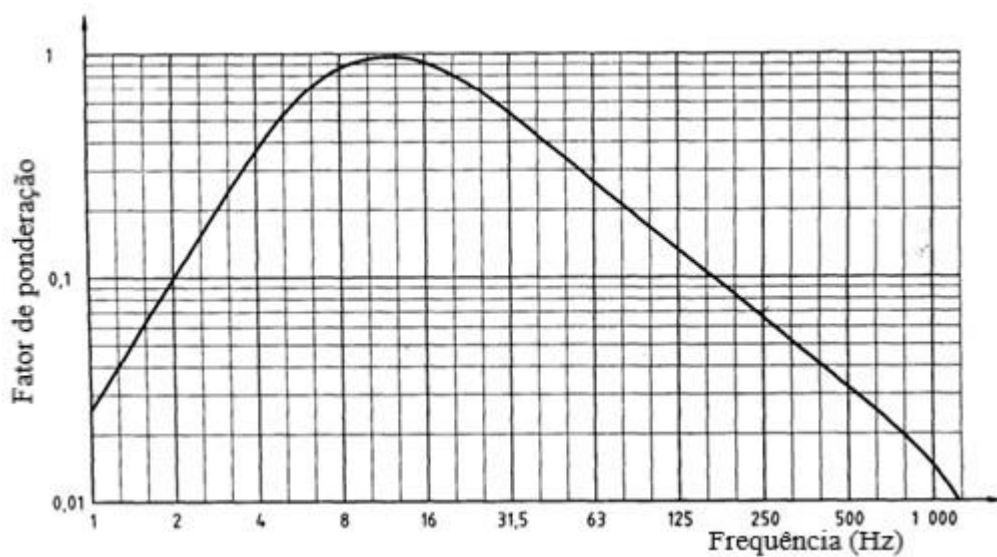
Figura 5 - Mãos de indivíduo afetado pela Síndrome dos Dedos brancos, causada por vibração.



Fonte: Voelter-Mahlknecht, S. et al. (2012).

Segundo a ISO 5349 – 1 (2001), as frequências que devem ser consideradas para a vibração estão entre 8 e 1000 Hz. Desta forma, ao analisar um sinal desta vibração deve-se utilizar um limitador de banda. A norma ainda declara a necessidade de utilização de um filtro de ponderação de frequência para o cálculo da vibração, a curva do filtro de ponderação de frequência da norma pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6 - Curva da ponderação de frequência indicada pela ISO 5349 - 1 de 2001.

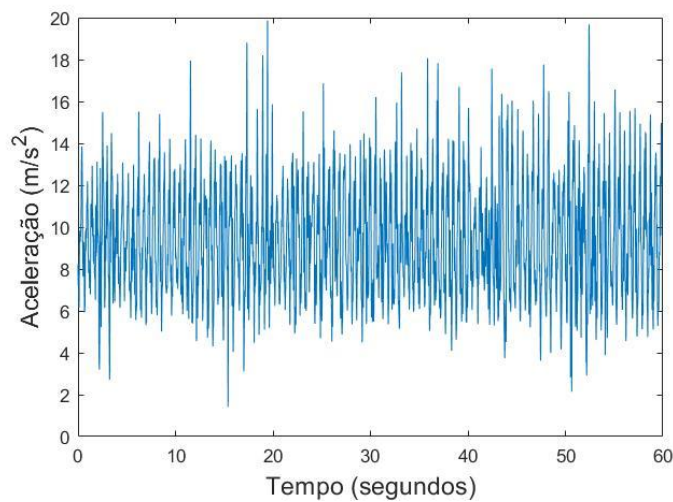


Fonte: ISO 5349-1 (2001), adaptada.

## 2.4 PROCESSAMENTO DE SINAL

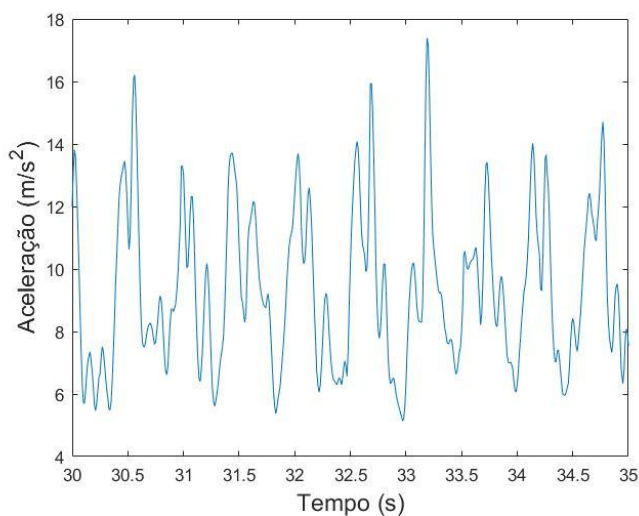
Ao medir o sinal de vibração, é obtido o valor da aceleração no tempo, Figura 7 e Figura 8. Para uma melhor visualização dos dados é possível fazer o tratamento de sinal por *softwares* através do cálculo de RMS (*Root Mean Square*) e através da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*), Densidade espectral de potência (*Power spectral density – PSD*), entre outras técnicas computacionais e matemáticas. Para a realização deste processamento de sinal foi utilizado o *software* Matlab®.

Figura 7 - Exemplo de sinal de vibração no tempo, obtido por celular e processado por meio do *software* Matlab®.



Fonte: Autor.

Figura 8 - Sinal visto na figura 3, com ampliação para uma janela de 5 segundos, onde já é possível observar padrões se repetindo ao longo do tempo.



Fonte: Autor.

### 2.3.1 Transformada de Fourier e Séries de Fourier

Muitos dos fenômenos que nos voltam, podem ser descritos por uma equação, ou sinal, em formato de onda. Por isso a grande utilidade da Transformada de Fourier, que demonstra que qualquer forma de onda pode ser reescrita pela soma de uma função senoidal (BEVELACQUA, 2010).

Portanto, a Transformada de Fourier é, basicamente, um procedimento matemático que decompõe uma função ou sinal, em uma representação de senos e cosseno. Deste modo, ela faz com que o sinal seja mais fácil de ser trabalhado e interpretado (SMITH, 1997, BRIGHAM & MORROW, 1967). Assim, basicamente um sinal de aceleração no tempo, por exemplo, é decomposto em função de suas frequências. A transformada de Fourier de uma função  $x(t)$  contínua é dada por:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

Já para sinais periódicos e contínuos, é possível calcular sua forma senoidal, através das Séries de Fourier. A Série de Fourier pode ser descrita por:





$$g(t) = a_0 + \sum_{m=0}^{\infty} a_m \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \quad (11)$$

onde  $a_m$  e  $b_n$  são os coeficientes da Série Fourier.

Apesar da praticidade oferecida pela Transformada de Fourier ao avaliar uma função, a sua utilização em algumas aplicações práticas, como em cálculos com computadores, acaba não sendo possível. Isso acontece, pois, computadores só conseguem trabalhar com sinais discretos e finitos, e a transformada, pelas Equações 10 e 11, se dá para sinais contínuos, ou seja, com um número infinito de amostras no tempo (SMITH, 1997).

Desta forma, ao avaliar um sinal não contínuo, como dados de aceleração em função do tempo coletados por um equipamento, existem outras técnicas para calcular a Transformada de Fourier da Função, como Transformada Discreta de Fourier. A Figura 9 apresenta o tipo de sinal e a versão de transformada de Fourier que é aplicada a este sinal.

Figura 9 - Tipo de transformada de Laplace e sua respectiva aplicação.

| Tipo de Transformada  | Exemplo de Sinal   |
|---|--|
| Transformada de Fourier<br>Sinais que são contínuos e aperiódicos         |  |
| Séries de Fourier<br>Sinais que são contínuos e periódicos                |  |
| T. de Fourier de Tempo Discreto<br>Sinais que são discretos e aperiódicos |  |
| Transformada Discreta de Fourier<br>Sinais que são discretos e periódicos |  |

Fonte: W. Smith, S. (1997), adaptada.

Desta forma, como pode ser visto na Figura 9, para avaliar um sinal não contínuo e periódico deve-se utilizar a Transformada Discreta de Fourier (TDF) ou *Discrete Fourier Transform* (DFT). A equação em forma para encontrar a DFT de um sinal é dada pela equação:

$$S(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-j2\pi(nk)/N} \quad (12)$$

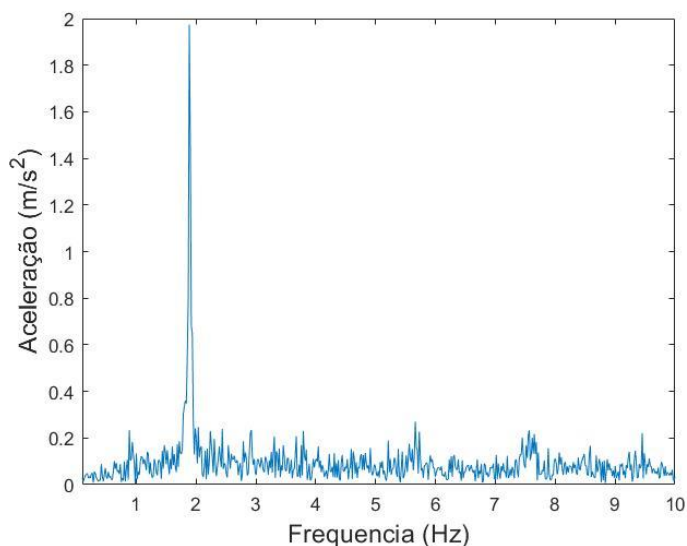
onde,  $N$  é número de pontos. A explicação completa é feita por Brigham e Morrow (1967), em “The fast Fourier Transform”.

### 2.3.2 Transformada Rápida de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier, ou *Fast Fourier Transform* (FFT), trata-se de uma família de algoritmos para a otimização do tempo computacional necessário para avaliar os coeficientes de uma DFT. Portanto, esse método nos dá os mesmos resultados de uma DFT, porém, reduz o tempo para o cálculo drasticamente, podendo ser até 100 vezes mais rápido que o método direto (BRIGHAM e MORROW, 1967). Smith (1997) compara a criação desse algoritmo, como uma evolução de andar a pé para voar em um avião a jato.

Essa rapidez se dá pelo fato de que o algoritmo por trás da FFT requer um sinal com comprimento em potência de base 2. Desta forma, o algoritmo se aproveita de semelhanças existentes em uma função senoidal para otimizar o cálculo computacional requerido para calcular uma DFT.

Figura 10 - Transformada rápida de Fourier aplicada ao sinal de vibração no tempo visualizado na Figura 7.



Fonte: Autor

### 2.3.3 Janelamento de sinal e Densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* - PSD)

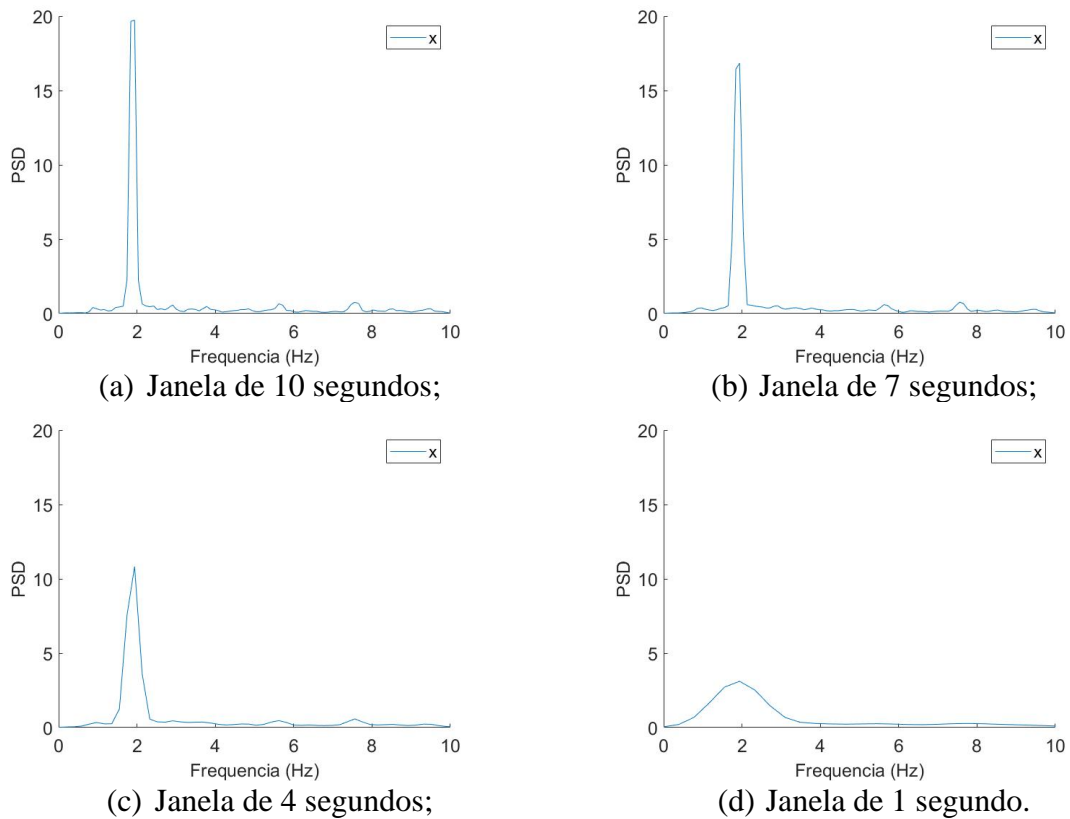
Autores como Griffin (1996) e Mansfield (2005), concordam que a FFT é um ótimo método para analisar frequências em um sinal de vibração periódico. Porém, os mesmos autores relatam que não é a forma ideal para se analisar a vibração no corpo humano. Isso se dá pelo fato de que vibrações reais possui fortes características randômicas, o que pode tornar certos sinais muito difíceis de serem interpretados.

O janelamento de sinal é uma técnica que auxilia na avaliação de um sinal de vibração real. Ele elimina ruídos e sinais aleatórios, deixando uma FFT, por exemplo, mais clara e limpa. Existem muitas funções de janelamento, cada uma com características próprias, e aplicações apropriadas para diferentes casos.

Para avaliar a vibração no corpo humano, existe a PSD, que fornece a energia presente em cada banda de frequência (MANSFIELD, 2005). O cálculo da PSD se dá através da FFT de um sinal, onde cada frequência presente nesta é multiplicada por seu conjugado complexo, resultando em um espectro com amplitude em  $g^2$ . Neste trabalho, foi usado o método de Welch para estimar a densidade de potência, em conjunto com a janela Hann. Para mais detalhes,

acessar: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>. Na Figura 11 é possível visualizar o espectro de potência, com diferentes tamanhos de janela, do mesmo sinal da FFT apresentada na Figura 10.

Figura 11 - Espectro de potência para diferentes tamanhos de janela.



Fonte: Autor.

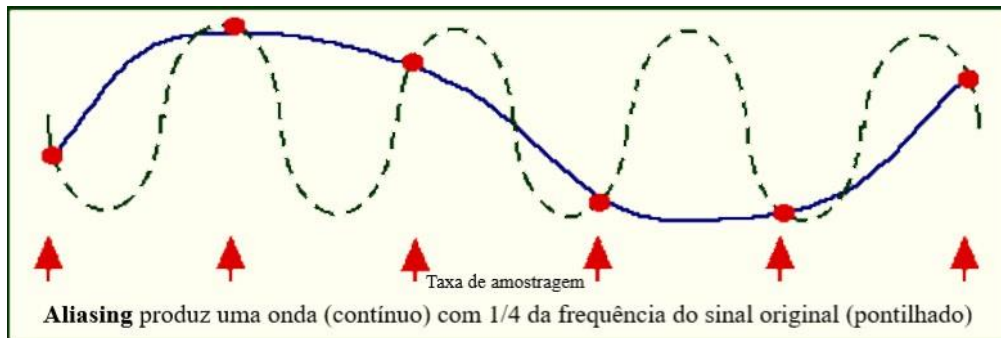
É possível notar que há uma grande redução no ruído do sinal, eliminando frequências que não possuem uma energia significativa. Porém, ao reduzir o tamanho de janela, há uma atenuação demasiada no sinal, o que pode causar perda de algumas informações que podem ser importantes para avaliação. Portanto, o tamanho de janela mais adequada a ser usada deve ser estudada com cuidado, para que assim não haja perda de informações importantes.

#### 2.3.4 Teorema de Nyquist

Outro ponto muito importante para o processamento de sinal é o Teorema de Nyquist. Este teorema nos diz que para uma medida correta do sinal, a frequência de amostragem do equipamento deve ser, pelo menos, duas vezes maior que a frequência mais alta do sistema avaliado. Caso isso não seja atendido, ocorre um efeito chamado Aliasing, onde uma frequência mais alta é interpretada como sendo um sinal de menor frequência. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 12.



Figura 12 - Esquema representando a ocorrência do fenômeno de Aliasing.



Fonte: <https://www.themusictelegraph.com/268>, adaptado.

É possível observar, na Figura 12, duas curvas, uma em linha tracejada e outra em linha contínua. A curva em linha tracejada representa a forma real de um sinal, já a que está representada em linha contínua, mostra um sinal de menor frequência. Ambas as curvas podem ser extraídas de um mesmo fenômeno, porém, é visível que possuem frequências diferentes.

Isso acontece devido ao efeito Aliasing, já que, no caso da figura, a curva em linha contínua, representa a medição do sinal por um equipamento que não atenda ao Teorema de Nyquist. Deste modo, é formado uma curva com frequência menor do que a do sinal que está sendo medido, que neste caso é quatro vezes menor, devido a sobreposição das curvas do sinal medido (linha contínua), com o sinal real (linha tracejada), em certos pontos.

### 2.3.5 Vibração RMS

Se, ao analisar um sinal senoidal comum, fizermos uma simples média aritmética, o valor médio da vibração estará centrado em zero, já que a vibração é o movimento repetitivo em torno de um referencial. Desta forma, para saber o potencial de uma vibração, calcula-se o valor RMS, que indica o nível de energia presente nesta. Para encontrar o valor médio quadrático da vibração utiliza-se a equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (13)$$

onde  $n$  é o número total de pontos da medição,  $x_i$  é o valor da aceleração, em  $m \cdot s^{-2}$ , medida no ponto  $i$ . A raiz quadrada média pode também ser calculada no Matlab® por meio do comando:

$$A_{rms} = rms(x) \quad (14)$$

onde o comando retorna o valor em RMS de um vetor  $x$ .

### 2.3.6 Vibração equivalente

Para calcular a vibração equivalente para os três eixos ortogonais, ou seja, o vetor resultante da vibração, deve-se inicialmente calcular a soma das acelerações ponderadas nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A forma de calcular essa média é descrita em norma, e dada pela equação:

$$a_{hv} = \sqrt{k_x^2 \cdot a_{\omega x}^2 + k_y^2 \cdot a_{\omega y}^2 + k_z^2 a_{\omega z}^2}, \quad (15)$$

onde  $a_{hv}$  é a aceleração equivalente para o modo de operação (marcha lenta ou plena rotação),  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  são fatores multiplicadores para cada eixo, que para este caso é 1,  $a_{\omega x}$  é a aceleração ponderada no eixo  $x$ ,  $a_{\omega y}$  é a aceleração ponderada no eixo  $y$  e  $a_{\omega z}$  é a aceleração ponderada no eixo  $z$ .

Conforme a NBR ISO 22867 (2011), os valores de vibração equivalente são baseados em um ciclo que é composto por marcha lenta e plena rotação, com tempos iguais para cada um, o valor de vibração equivalente é dado pela equação:

$$a_{hv,eq} = \sqrt{\frac{1}{2}(a_{hv,ld}^2 + a_{hv,ra}^2)}, \quad (14)$$

onde  $a_{hv,ld}$  representa a aceleração equivalente em marcha lenta, onde a máquina é mantida apenas com o motor ligado, sem acelerar a máquina e  $a_{hv,ra}$  é a aceleração equivalente em plena rotação.

## 2.5 NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

De forma a padronizar as medições de vibração, existem normas técnicas. Essas normas indicam como devem ser feitas as medições e os equipamentos corretos para tal. A maior parte das normas nacionais são baseadas na ISO 5349, que possui muitas informações sobre como devem ser feitos os testes, e também informações a respeito da vibração de mãos e braços.

A norma brasileira NBR ISO 22867, é uma norma que trata sobre as vibrações oriundas de máquinas florestais, como a motorroçadora. Ela trata principalmente da maneira que se deve fazer a medição e avaliação da vibração nestas máquinas. Ainda no Brasil, existem também as Normas Regulamentadoras N° 9 e N° 15.

A NR 9, cita a exposição a vibração como sendo um agente físico que pode causar danos à saúde humana. Já a NR 15, refere-se aos cuidados que se deve ter com as vibrações, bem como ações para reduzir os riscos trazidos pelo fenômeno. A Norma de Higiene Ocupacional Nº 10, trata também, como deve ser calculado o nível de vibração, e os limites de exposição para o corpo humano.

A Norma Regulamentadora Nº 15, Anexo 8, dispõe também de medidas que devem ser tomadas por empregadores para avaliar e reduzir os riscos à saúde de trabalhadores que são expostos às vibrações mecânicas. Onde, segundo a norma, deve-se, primeiramente, ser feita uma avaliação preliminar da exposição às vibrações, com o fim de avaliar a necessidade da implementação de medidas preventivas e corretivas.

Caso a avaliação preliminar não seja suficiente, parte-se para uma avaliação quantitativa da exposição às vibrações. Na avaliação quantitativa é necessário medir os níveis de vibrações de corpo inteiro ou mãos e braços que o indivíduo está exposto. Para vibração mãos e braços, existe o nível de ação, que é de  $2,5m \cdot s^{-2}$ , que caso seja ultrapassado, devem ser tomadas medidas preventivas para redução de riscos associados às vibrações. Também existe o limite máximo de exposição diária, que é de  $5m \cdot s^{-2}$ , que não deve ser ultrapassado, segundo a NHO 10.

Em casos que o limite máximo de exposição diária é atingido ou ultrapassado, deve ser tomada ao menos uma medida corretiva, listada pela norma, para a redução desta exposição. As medidas podem ser a modificação de processos ou operações, reformulação de bancadas e postos de trabalho, mudanças nas rotinas, adequação da ferramenta ou acessórios utilizados e a velocidade operacional, ou qualquer outra medida que se mostre necessária, mesmo que não citada na norma.

É previsto na norma a obrigatoriedade de medidas preventivas em casos que o nível de ação seja ultrapassado. Dentre as medidas a serem tomadas estão a avaliação periódica da exposição a vibração, orientação dos trabalhadores quanto aos riscos da exposição à vibração, adoção de novos procedimentos com o fim de reduzir a exposição às vibrações, e qualquer outra medida que se faça necessária para a redução dos riscos associados ao problema.

## 2.6 ESTUDOS SEMELHANTES

Estudos em que foi avaliado o desempenho de *smartphones*, ou foi utilizado este tipo de aparelho para a coleta de dados de vibrações não são incomuns. Isso se dá principalmente

pelo fato de que estes aparelhos possuem baixo custo e uma boa portabilidade. Além disso, como relata Vieira (2013), os *smartphones* já trazem de fábrica inúmeros sensores capazes de medir grandezas físicas de grande importância. Entre estes sensores, é importante destacar o acelerômetro, que é com o que conseguimos mensurar a vibração.

Rodrigues (2018), realizou um estudo, onde utilizou o acelerômetro de um smartphone com o fim de detectar falha de ignição em veículos automotivos. Nesse trabalho foi observado que o celular teve um bom desempenho, sendo possível detectar a falha de ignição no veículo estudado.

Na área da saúde, existem também experimentos semelhantes, em que são testadas as capacidades do acelerômetro presente em *smartphones*. Andrade (2017), realizou um estudo onde avaliou, utilizando um smartphone, a vibração na articulação temporomandibular, com o intuito de identificar sinais de Disfunção Temporomandibular. No estudo o smartphone se mostrou bastante capaz de avaliar a vibração na articulação, sendo possível diferenciar as articulações normais e as que possuíam irregularidades.

Cargnin (2017), avaliou o desempenho de um smartphone para a avaliação de vibração de corpo inteiro (WBV), para avaliação do conforto do motorista em veículos automotivos. No trabalho o smartphone foi comparado a um equipamento profissional. Ao final foi observado que os resultados de vibração obtidos através do smartphone são satisfatórios, diferindo em cerca de 5% dos resultados encontrados com o equipamento profissional.

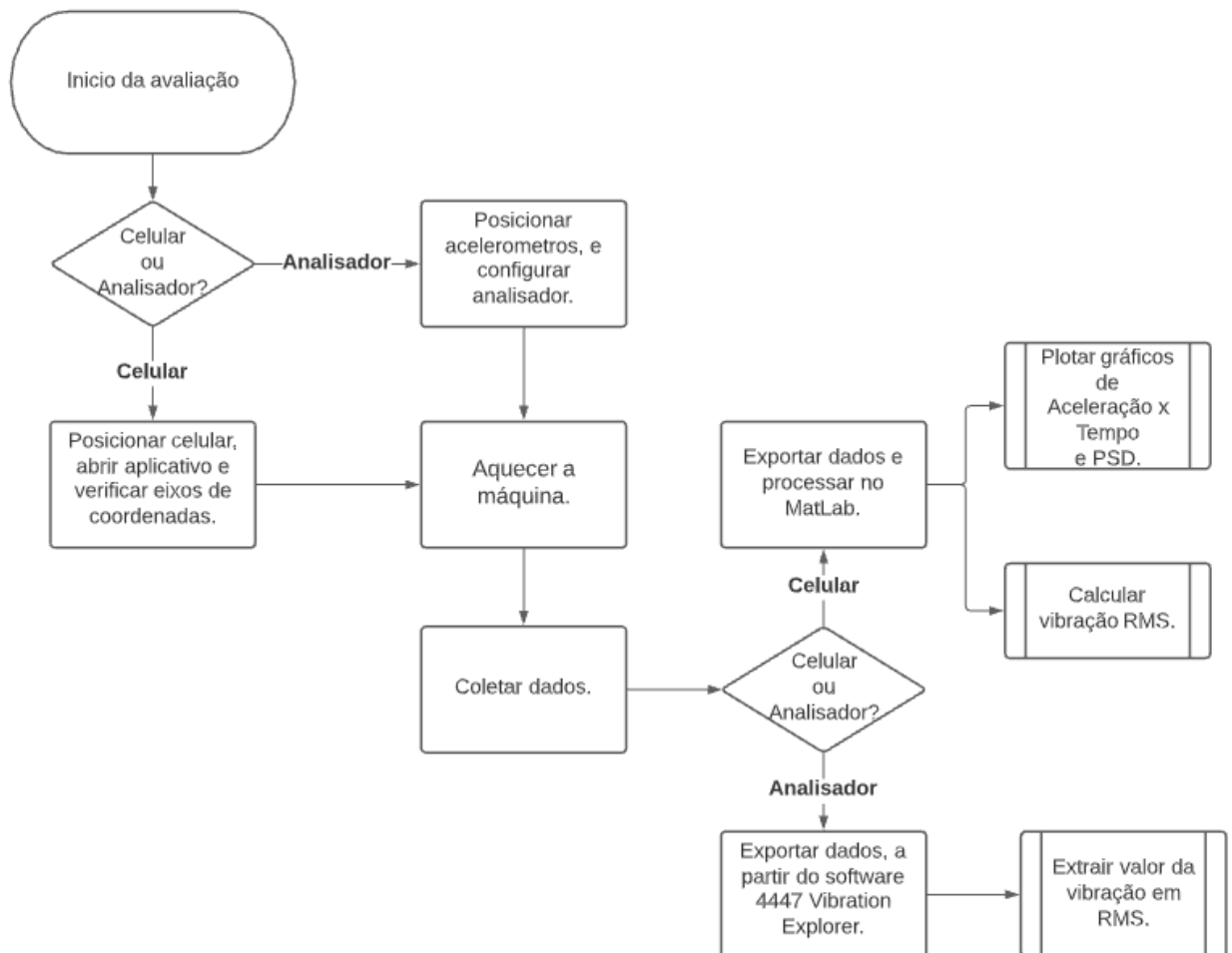
Visto isso, pode-se levantar a hipótese se é possível usar estes aparelhos para a medição de vibração. Mesmo que o objetivo principal dos *smarthphones* seja diferente disso. Como visto, muitos trabalhos já avaliaram o desempenho destes aparelhos na medição de dados, com resultados promissores. Além disso, se levarmos em conta o custo de um *smartphone*, seu uso para tal fica ainda mais interessante.

### 3 PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO

Nesta seção é abordado o procedimento para avaliar a vibração com os diferentes equipamentos. São também descritas as características técnicas dos celulares e do equipamento profissional, que foram utilizados no trabalho.

O procedimento de avaliação seguiu os padrões definidos pelas normas NBR ISO 22867 (2018), que define padrões para ensaio de vibração nas empunhaduras em máquinas manuais com motor de combustão interna, e a ISO 5349-1 (2016), que aborda as medição e avaliação de vibração transmitas às mãos. O procedimento pode ser visualizado no fluxograma na Figura 13, e cada etapa é descrita em mais detalhes nas seções a seguir.

Figura 13 - Fluxograma do procedimento realizado para avaliação de vibração na motoroçadeira.



Fonte: Autor.

### 3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A motorroçadora utilizada é de modelo profissional, e trata-se de uma Stihl FS 350, Figura 14. Essa roçadeira possui 1,6 kW de potência a 9000 rpm conforme a ISO 8893, rotação máxima limitada em 12300 rpm, 2800 rpm em marcha lenta, e uma massa total de 7,3 kg. O mecanismo de corte utilizado na roçadeira foi o fio de nylon, mecanismo bastante utilizado em roçadas de pastagens e limpeza de terrenos, este pode ser visto na Figura 15.

Figura 14 - Roçadora Stihl FS 350.



*Fonte: Site da Stihl.*

Figura 15 - Carretel de nylon, mecanismo de corte utilizado no trabalho.



Fonte: <https://blog.stihl.com.br/produtos-stihl/2020/03/como-colocar-fio-de-nylon-no-conjunto-de-corte-de-rocadeira-autocut-c-26-2/>.

O equipamento profissional, usado para a medição das vibrações foi o analisador portátil *Brüel&Kjær Human Vibration Analyzer Type 4447*, e um acelerômetro tridimensional da mesma marca, do modelo *Type 4524-B-001*, Figura 17. Os valores fornecidos pelo analisador são os valores RMS da vibração medida. Para a análise e visualização dos dados, foi utilizado o *software* do analisador, *4447 Vibration Explorer*. As especificações do equipamento *Type 4447*, quando utilizando o acelerômetro *Type 4524-B-001*, podem ser observadas na Figura 16.

Figura 16 - Especificações fornecidas pelo fabricante, para o analisador de vibração *Type 4447*, da Brüel&Kjær.

|               | Transdutor | Sensibilidade nominal     | Filtro                          | Faixa de frequência | Faixa de operação linear                     | Ruído                  |
|---------------|------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------|--|------------------------|
| Mão e braço   | 4524-B-001 | 1 mV/(m/s <sup>2</sup> )  | W <sub>h</sub>                  | 2 Hz to 7 kHz       | 1 m/s <sup>2</sup> to 3200 m/s <sup>2</sup>  | <0.1 m/s <sup>2</sup>  |
| Corpo inteiro | 4515-B-002 | 10 mV/(m/s <sup>2</sup> ) | W <sub>d</sub> , W <sub>k</sub> | 0.25 Hz to 900 Hz   | 0.1 m/s <sup>2</sup> to 320 m/s <sup>2</sup> | <0.01 m/s <sup>2</sup> |

Fonte: Manual do usuário *Brüel&Kjær*, adaptada.

Figura 17 - Analisador de aceleração Brüel&Kjær *Type 4447* (a) e acelerômetro *Type 4524-B-001* (b).



(a)



(b)

Fonte: Manual do usuário *Brüel&Kjær*.

Para comparar ao analisador profissional de vibrações, foi utilizado um *smartphone* da marca Samsung, modelo A30 que será chamado de Celular 1 e um da marca Xiaomi, modelo Redmi Note 8, que será chamado de Celular 2.

As características dos acelerômetros presentes em cada um dos celulares podem ser vistas no Quadro 1. As informações contidas no quadro foram extraídas do aplicativo Accelerometer Frequency, disponível gratuitamente, para Android, na Play Store.

Quadro 1 - Quadro comparativo dos acelerômetros de cada celular.

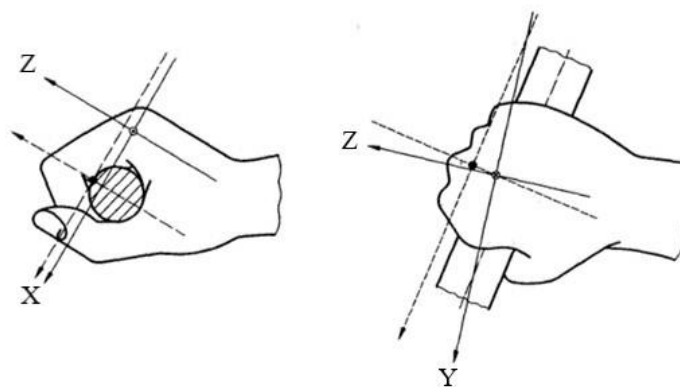
|           | Modelo celular | Marca do acelerômetro | Modelo do acelerômetro | Resolução ( $m. s^{-2}$ ) | Taxa de aquisição (Hz) | Range |
|-----------|----------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|-------|
| Celular 1 | Samsung A30    | STM                   | LSM6DSL                | 0,001197                  | 100                    | 4 g   |
| Celular 2 | Redmi Note 8   | TDK IvenSense         | icm4x6xx               | 0,004788                  | 500                    | 16 g  |

Fonte: Aplicativo Accelerometer Frequency.

### 3.2 POSICIONAMENTO DOS ACELERÔMETROS

Segundo a ISO 5349-2 (2001), para realizar a medição é importante utilizar acelerômetros tridimensionais, para que a coleta dos dados de vibração possa ser simultânea nos três eixos avaliados. O acelerômetro deve ser acoplado no local onde ocorre a pegada do equipamento, de forma que o eixo ortogonal X tenha o sentido perpendicular a palma da mão, e o eixo ortogonal Z esteja na mesma direção do braço. O esquema de posicionamento do acelerômetro pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Posicionamento do acelerômetro para avaliação da vibração mão-braço.



Fonte: ISO 5349-1(2001), adaptada.

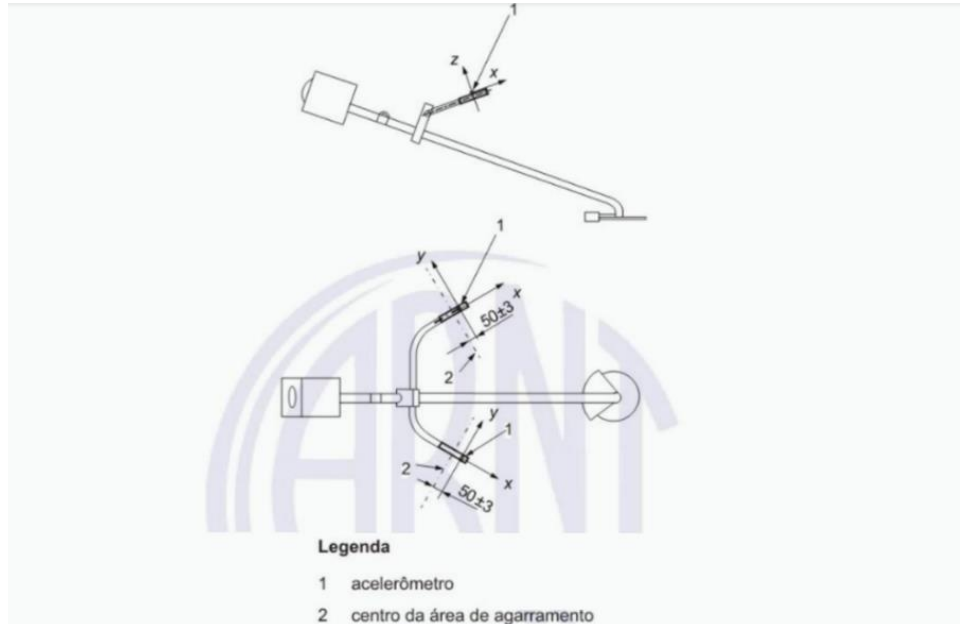
Para avaliação em motorroçadoras, deve-se medir a vibração na mão esquerda e mão direita, onde ocorre a empunhadura do equipamento. Devem ser posicionados de forma a não prejudicar a empunhadura do equipamento, e deve estar no máximo a 20mm do centro da empunhadura. A forma que o acelerômetro deve ser posicionado na motorroçadora pode ser vista na Figura 19.

Deste modo, os acelerômetros, bem como os celulares foram posicionados de tal forma que atendessem as exigências citadas. Na Figura 20 é possível observar o posicionamento do



acelerômetro, e dos celulares utilizados neste trabalho. Já na Figura 21, é possível ver o esquema de como foi feita a coleta de dados com o aparelho 4447, e na Figura 22, com o celular.

Figura 19 - Posicionamento dos acelerômetros na estrutura da motorroçadora.



Fonte: ISO 22867 (2018).

Figura 20 - Posicionamento do acelerômetro e dos celulares na mão direita para a coleta de dados de vibração.



(a) *Celular Samsung A30*



(b) *Celular Xiaomi Redmi*

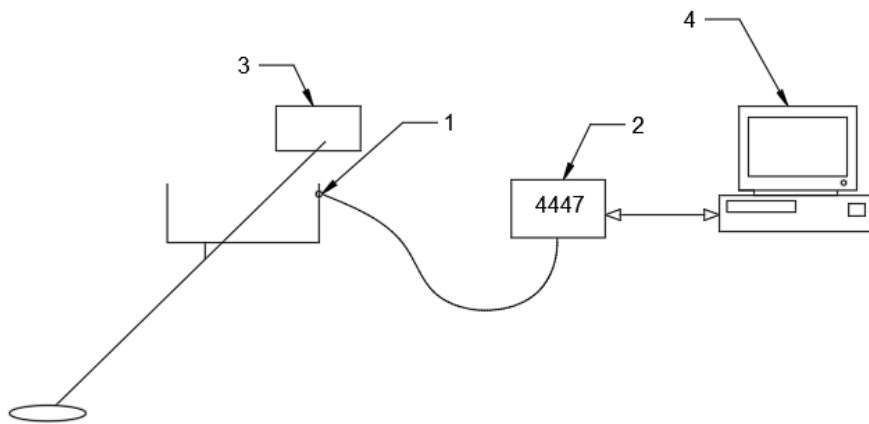


(c) *Acelerômetro 4524-b-001*

Fonte: Autor.

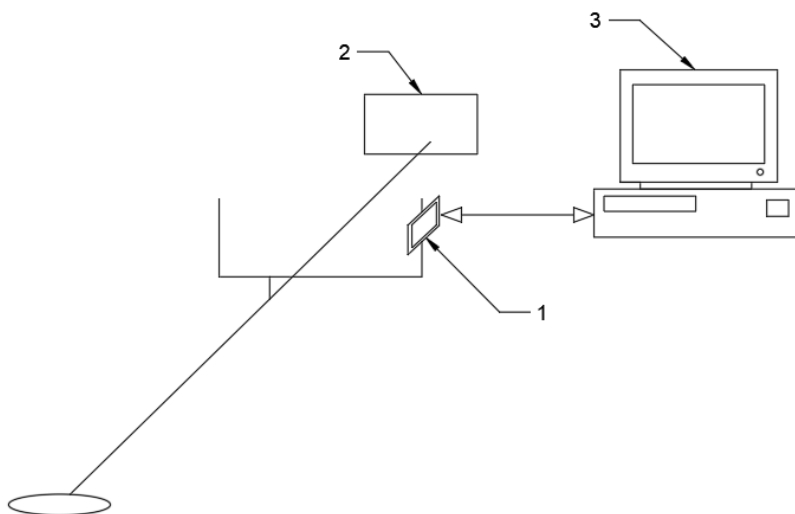
Os celulares foram fixados por meio de fita adesiva, o qual foi o melhor meio encontrado para fixar o celular, de forma que ficassem próximos do que é descrito nas normas. Outro fator também que impediu utilizar outro tipo de apoio é que os celulares não ficavam totalmente fixos na empunhadura. Como por exemplo, ao utilizar abraçadeiras de nylon, mesmo que apertadas ao máximo, uma folga entre o celular e a máquina ainda era observada, fazendo com que o celular ainda se movimentasse em torno do ponto de fixação. Já com a fita adesiva, por esta ter uma maior maleabilidade, é possível ter uma fixação mais concreta, podendo ser colada em partes com geometrias diferentes na máquina.

Figura 21 - Esquema de coleta de dados com o aparelho Type 4447. (1 - Acelerômetro; 2 - Type 4447; 3 - Motorroçadora; 4 - Computador).



Fonte: Autor.

Figura 22 - Esquema de coleta de dados com smartphone. (1 - Celular; 2 - Motorroçadora; 3 - Computador).



Fonte: Autor.

### 3.3 MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA

Os modos de operações utilizados no trabalho foram conforme preconiza a norma NBR ISO 22867 (2011), em que é descrito que um ensaio de vibração em uma motorroçadora, devem ser coletados dados em dois modos de operação, que são: marcha lenta e plena rotação. A partir disto, por meio da Equação 12, expressa no capítulo 2, é calculado um ciclo de trabalho equivalente.

O modo de marcha lenta, consiste em manter o acelerador da máquina totalmente liberado. Desta forma o motor da motorroçadora ficará livre de cargas, trabalhando em mínima rotação possível. A marcha lenta da máquina deve estar ajustada de acordo com que é instruído pelo fabricante da máquina.

Já para modo de plena rotação, é descrito na norma, como sendo 133% da rotação de potência máxima da máquina, ou caso a rotação máxima da máquina não atinja esse valor, pode-se utilizar a máxima rotação alcançada pela roçadeira. Neste caso, foi utilizado a rotação máxima da motorroçadora. Desta forma, neste trabalho foram coletados dados nesses dois modos de operação citados: marcha lenta e plena rotação.

### 3.4 MÉTODO DE MEDIÇÃO

A ISO 22867:2018 prevê que devem ser feitas pelo menos 4 medições, que totalizem 20 segundos de coleta de dados para cada modo de operação. Neste trabalho foi feita 1 coleta de 30 segundos, sem pausas, em cada modo de operação, para que deste modo o processamento de dados fosse facilitado. Os modos de operação utilizados foram: em marcha lenta e plena rotação.

## 4 RESULTADOS

Após a coleta de dados e o tratamento de sinal, foi possível obter os resultados que foram expressos nessa seção. Os três equipamentos são comparados quanto a suas capacidades de avaliar o nível de vibrações em uma motorroçadora.

São apresentados os dados obtidos, com diferentes análises para cada sinal. Inicialmente é apresentada uma comparação dos valores de vibração RMS obtidos, com todos os aparelhos testados. Após isso há um breve estudo de janelamento do sinal, e um avaliação do espectro de potência, para os sinais coletados com os *smartphones*.

### 4.1 VALORES EM RMS

Com a coleta de dados e o processamento dos mesmos, foi possível obter os resultados da aceleração em RMS, por meio da equação 11, para cada um dos equipamentos e modo de trabalho. Os resultados de vibração ponderada nos três eixos pode ser visualizado no Quadro 2.

Quadro 2 - Aceleração equivalente para cada mão e modo de operação, obtidas com os equipamentos.

| Equipamento | Média das vibrações equivalentes obtidas |                             |                         |                             |
|-------------|--|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|             | MÃO ESQUERDA                             |                             | MÃO DIREITA             |                             |
|             | LENTA<br>( $m.s^{-2}$ )                  | ACELERADO<br>( $m.s^{-2}$ ) | LENTA<br>( $m.s^{-2}$ ) | ACELERADO<br>( $m.s^{-2}$ ) |
| 4447        | 4,353                                    | 2,458                       | 5,762                   | 2,299                       |
| Celular 1   | 4,205                                    | 2,533                       | 7,241                   | 3,217                       |
| Celular 2   | 5,213                                    | 7,308                       | 6,901                   | 12,852                      |

Fonte: Autor.

É possível notar que o Celular 1, apesar da baixa frequência de aquisição do acelerômetro, apresentou valores bastante próximos dos obtidos com o equipamento profissional, nas aquisições feitas com a motorroçadora acelerada. Os valores de aceleração para o Celular 2, foram os que mais se distanciaram das médias encontradas com o equipamento profissional. Isso pode ser atribuído a forma de fixação do celular, que possuía um tamanho maior, e a dificuldade de o fixar na motorroçadora foi maior.

Outro fator que tem influência na vibração medida, é a posição do acelerômetro. Foi observado, que o acelerômetro dos *smartphones* não está posicionado no centro do celular, e sim próximo a parte superior do aparelho. Desta forma, com a posição do acelerômetro se

distanciando do ponto central do local de pegada da motorroçadora, os valores de vibração medida acabam sendo amplificados.

Outra observação importante é a de que a motorroçadora apresentou uma emissão de vibração bastante alta para o modo de marcha lenta. Levando em conta que o limite de exposição diária definido pela NR15 (2018), é de  $5 m. s^{-2}$ , a vibração na mão direita está acima deste limite.

Através da equação da Equação 14, calcula-se a vibração equivalente conforme preconiza a ISO 22867 (2018). Os resultados obtidos através deste cálculo podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3 - Vibração equivalente, considerando uma carga de trabalho com marcha lenta e plena rotação.

| Equipamento | Vibração Equivalente         |                             |
|-------------|------------------------------|-----------------------------|
|             | Mão esquerda ( $m. s^{-2}$ ) | Mão direita ( $m. s^{-2}$ ) |
| 4447        | 3,535                        | 4,987                       |
| Celular 1   | 4,909                        | 7,923                       |
| Celular 2   | 8,976                        | 14,588                      |

Fonte: Autor.

No Quadro 3, observa-se que os valores de vibração medidos através do Celular 1 e Celular 2 são maiores, comparados ao obtidos com o equipamento 4447. Isso é esperado pois o valor de vibração equivalente é calculado a partir dos valores apresentados no Quadro 2. Deste modo, a utilização dos celulares para avaliação da vibração equivalente não se mostrou eficiente, quando comparada a um equipamento profissional.

#### 4.2 VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

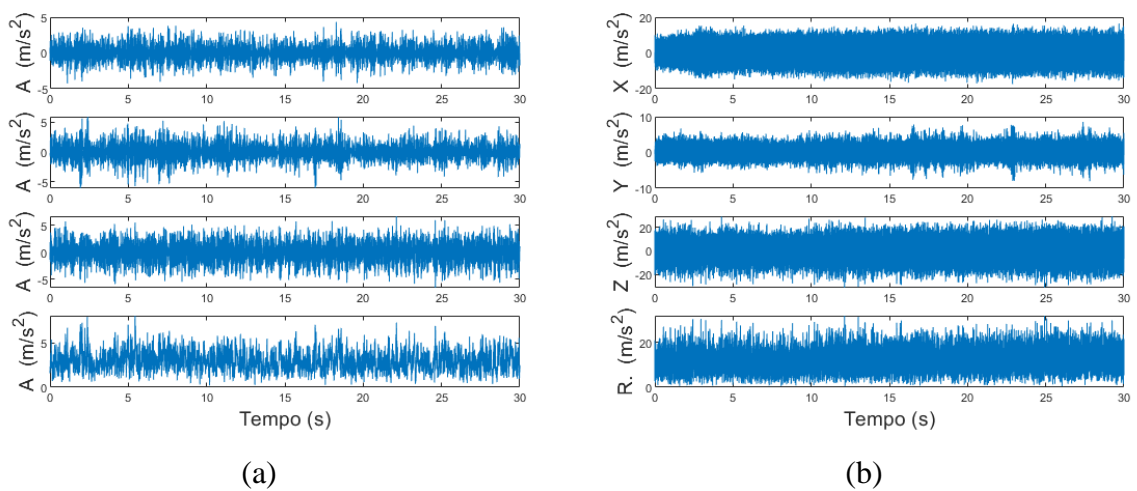
Como observado no Quadro 1, no Capítulo 3, o Celular 1 possui uma taxa de aquisição muito menor (50 Hz), comparado ao Celular 2 (500 Hz). Essa diferença é perceptível já na Figura 23, em que é possível visualizar os dados da aceleração (eixo das ordenadas) em relação ao tempo (eixo das abscissas). Os dados vistos nessa figura foram coletados em plena rotação, ambos na mão direita. Essa observação é importante, pois, mesmo que para as mesmas condições de operação, pode haver grande perda de dados.

Já na Figura 24, é possível visualizar os dados no tempo para o modo de operação de marcha lenta. Nesta figura também é possível visualizar que há uma diferença visual

significativa nos dados de aceleração no tempo, como para os dados para o modo de operação em plena rotação.

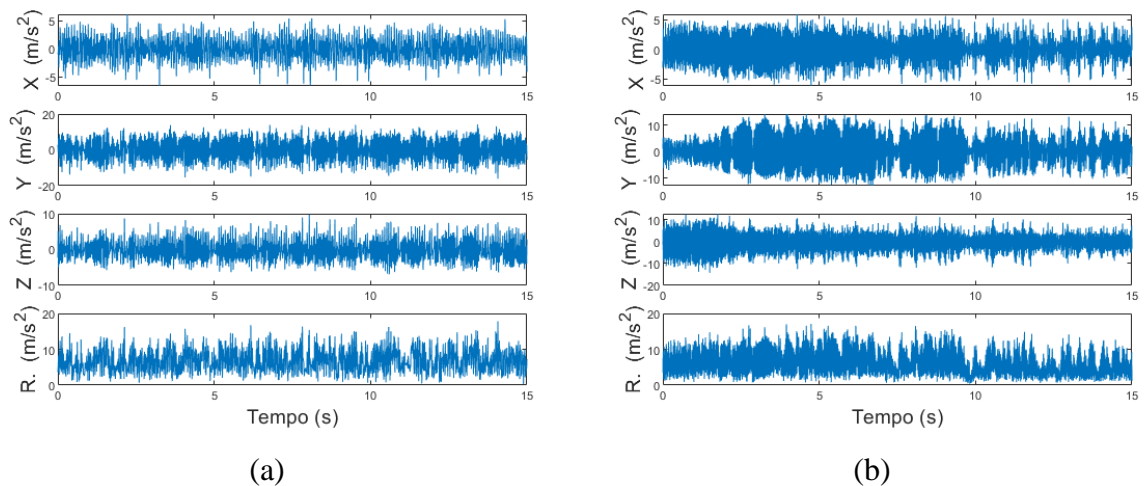
Outra observação que pode ser feita, é que em ambos os celulares é possível notar uma oscilação na amplitude da aceleração no tempo. Isso ocorreu devido à instabilidade do motor da motorroçadora quando estava em marcha lenta, o que foi captado pelos smartphones. Por esse motivo, também foi necessário reduzir o tempo de coleta para o modo de operação de marcha lenta para 15 segundos, pois acima disso o motor parava seu funcionamento.

Figura 23 - Dados de aceleração x tempo, em plena rotação, com o Celular 1 (a) e Celular 2 (b).



Fonte: Autor.

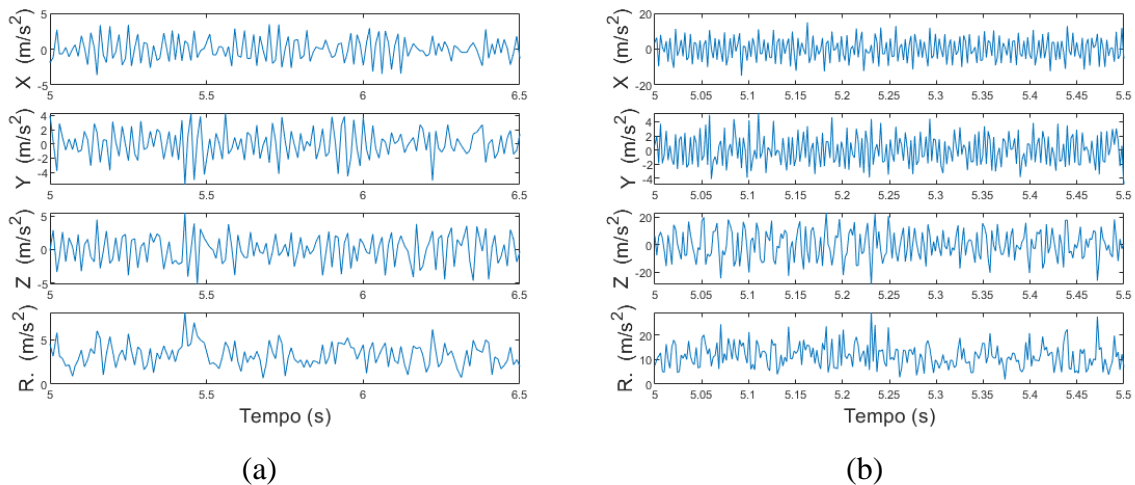
Figura 24 - Dados de aceleração x tempo, marcha lenta, para o Celular 1 (a) e Celular 2 (b).



Fonte: Autor.

Com uma redução no intervalo de exibição do sinal no tempo, é possível observar outros detalhes do sinal obtido. Na Figura 25, observa-se que o sinal possui um padrão que se repete ao longo do tempo. Deste modo é confirmado que o sinal é periódico, e é possível utilizar as técnicas de processamento de sinal vistas no Capítulo 2.

Figura 25 - Dados de aceleração no tempo, com escala limitada, na operação de plena rotação, para o Celular 1 (a) e Celular 2 (b).



Fonte: Autor.

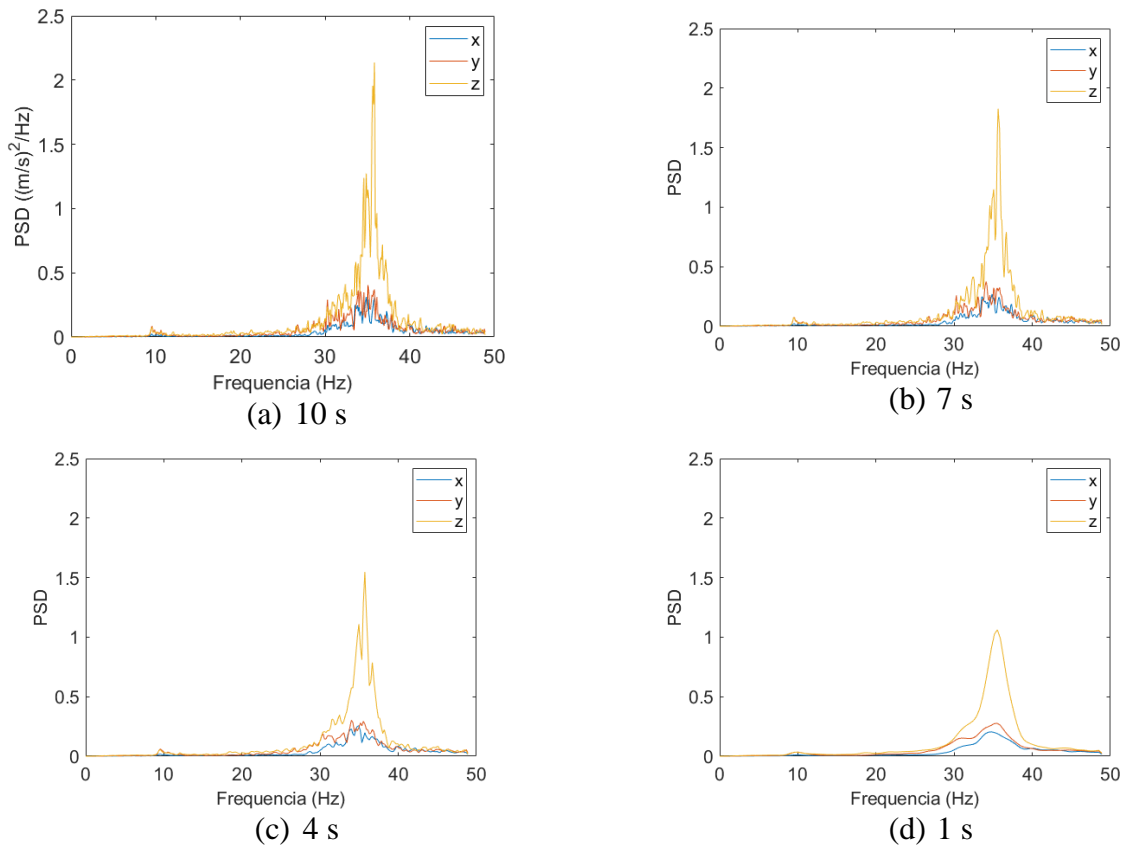
Os dados no domínio do tempo para o equipamento profissional não são apresentados, pois o equipamento não fornece os dados neste formato.

### 4.3 JANELAMENTO

Como visto no Capítulo 2, é pertinente utilizar métodos de processamento de sinal que utilizem o janelamento, como a PSD, para avaliar um sinal real de vibração. Nesta seção é feito um breve estudo de janelamento, aplicado ao sinal obtido com os *smartphones*. A seguir na Figura 26 é possível visualizar o espectro de potência para diferentes tamanhos de janelas. Foram usadas janelas de 10, 5, 4 e 3 segundos, com tamanho de respectivamente 968, 488, 395 e 196 pontos.

É possível notar, nos dados medidos com o Celular 1, que para uma janela temporal menor, há uma redução significativa dos dados, o que pode causar perda de informações importantes, Figura 26 (d). Já nas janelas maiores, é possível identificar mais informação, o que deixa a análise dos dados confusa, Figura 26 (a). Deste modo, para uma melhor visualização, sem que se percam informações, se torna interessante escolher um tamanho de janela temporal intermediário para avaliar o sinal, como visto na Figura 26 (c).

Figura 26 - Espectros de potência do sinal de vibração da mão direita em plena rotação, medidos com o Celular 1, com diferentes tamanhos de janela.



Fonte: Autor.

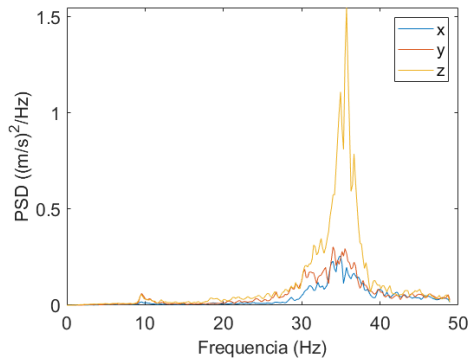
#### 4.4 ESPECTROS DE POTÊNCIA

Nos dados coletados com o Celular 1, foi possível observar apenas uma frequência em destaque, para a mão direita em plena rotação, 30 Hz. Já para a mão esquerda, em plena rotação, é possível observar um pico em 35,6 Hz e outro em 10 Hz. Em marcha lenta foram observadas, frequências de 29 Hz e 10 Hz, para a mão esquerda, e 30 Hz para mão direita. Os picos energéticos foram, em sua maioria, maiores para o eixo Y, como podemos observar na Figura 26. Bernardi et al. (2018), encontrou resultados semelhantes, com acelerações médias maiores para o eixo Y. Porém como os equipamentos utilizados são diferentes, as frequências encontradas por Bernardi não são as mesmas, bem como a amplitude da frequência.

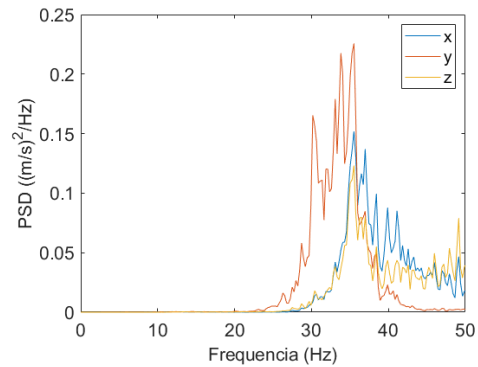
É possível observar ainda, na Figura 27, que há uma grande semelhança nos dados obtidos com ambos os *smartphones*, quando exibidos em mesma escala. Sendo assim, *smartphones* com acelerômetros que possuem menores taxas de aquisição, serão limitados apenas devido a este fator, não perdendo dados importantes na faixa em que podem atuar.



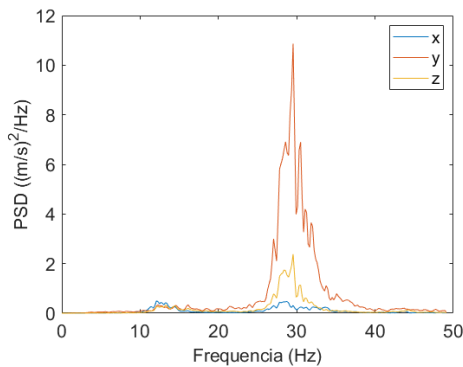
Figura 27 – Espectros de potência, para os dois celulares, no mesmo intervalo de exibição.



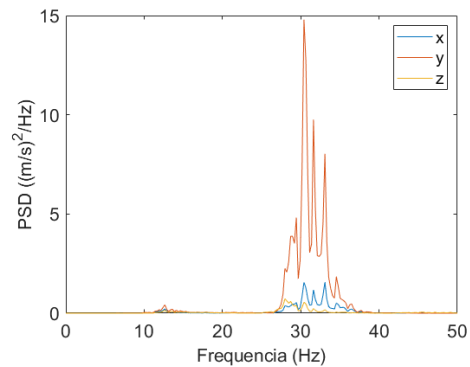
(a) Mão direita, plena rotação, Celular 1



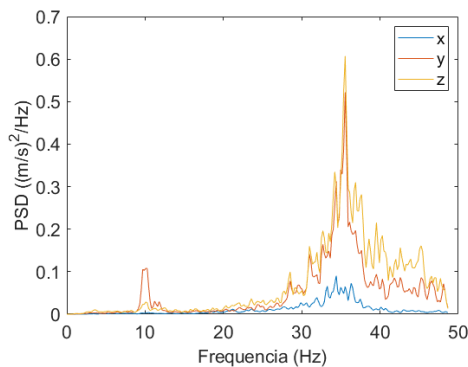
(b) Mão direita, plena rotação, Celular 2



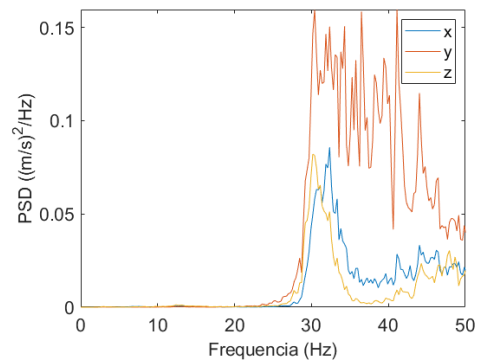
(c) Mão direita, marcha lenta, Celular 1



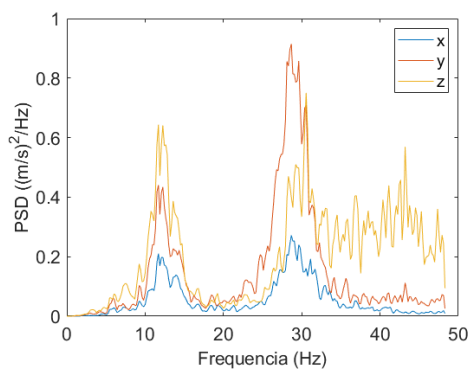
(d) Mão direita, marcha lenta, Celular 2



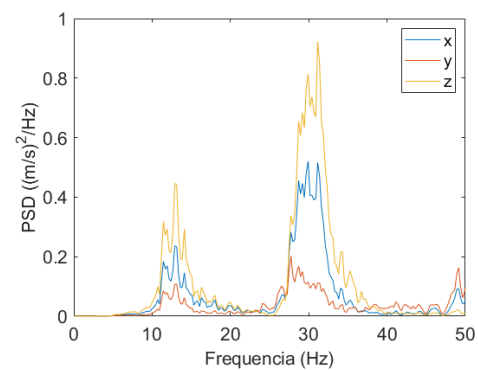
(e) Mão esquerda, plena rotação, Celular 1



(f) Mão esquerda, plena rotação, Celular 2



(g) Mão esquerda, marcha lenta, Celular 1

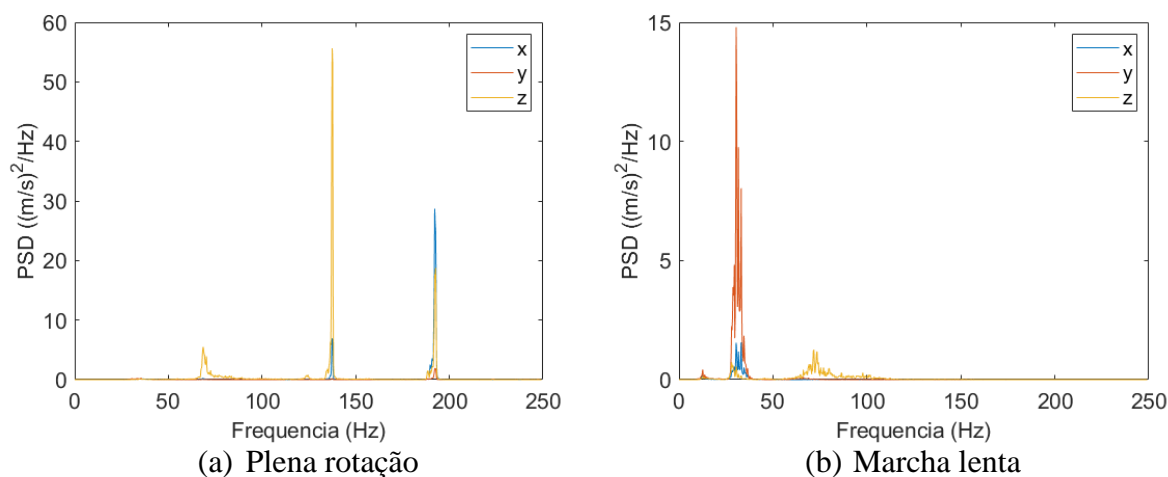


(h) Mão esquerda, marcha lenta, Celular 2

Fonte: Autor.

A Figura 28, representa o espectro de potência para os dados obtidos com o Celular 2, da marca Xiaomi, com taxa de 500Hz. Na Figura 28 (a), a qual representa o equipamento em plena rotação, é possível visualizar três picos bastante energéticos, em 192,2 Hz, 137,4 Hz e por fim um próximo a 68 Hz. Na Figura 28 (b) é possível ver um pico mais energético em 30 Hz, e outro um pouco menor em 72 Hz.

Figura 28 – Espectros de potência, na mão direita, Celular 2.



Fonte: Autor.

O pico em 192,2 Hz pode ser atribuído a frequência característica do motor da motorroçadora, que quando em plena rotação possui velocidade angular de 12300 RPM, segundo o fabricante. Por se tratar de um motor ciclo Otto 2 tempos, o qual possui uma combustão a cada ciclo, tem uma frequência característica de 205 Hz, valor muito próximo ao medido pelo *smartphone*.

Segundo o fabricante, a velocidade angular do mecanismo de corte da máquina, quando a mesma está em máxima rotação, é de 8790 RPM, ou 146,5 Hz. Isso nos leva ao outro pico de energia visto na Figura 28 (a), em 137 Hz. Desta forma, esta frequência medida é correspondente à frequência característica do mecanismo de corte da máquina.

Outro fato que corrobora que as frequências de 192 Hz e 137 Hz são características respectivamente do motor e mecanismo de corte, é que a sua relação de transmissão é fiel à informada pelo fabricante. A relação calculada com informações do fabricante é de 0,7146, enquanto que a relação feita a partir das frequências medidas é de 0,7148.

Resultados que confirmam o que foi encontrado neste trabalho foram observados também por outros autores. São exemplos, Hao et al.(2013), Stayner (2003) e Bernardi et al. (2018) que observaram 2 picos em destaque que correspondiam a frequência do motor e

mecanismo de corte. Porém, nos trabalhos citados, as amplitudes das frequências oriundas do motor são maiores das pertencentes ao mecanismo de corte.

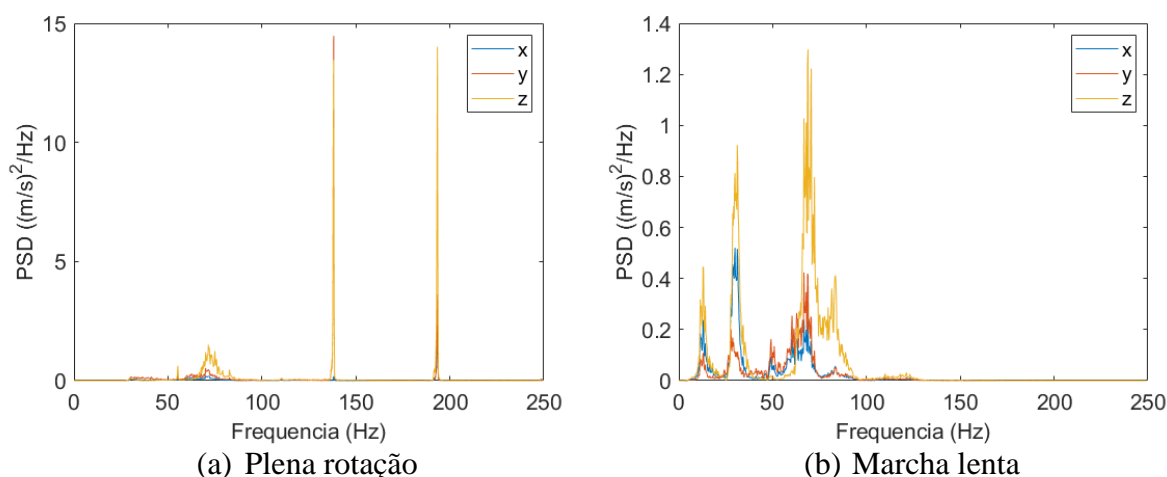
Em marcha lenta, como observado, há um pico em 30Hz. Este pico é oriundo do motor da máquina. O que confirma o fato, é que, quando não acelerada, a máquina possui uma velocidade angular, segundo fabricante, de 2300 RPM, que se equivale a 38Hz. É possível afirmar isso, devido ao fato de que quando acelerada, a máquina também apresentou rotação abaixo da informada pelo fabricante.

Em ambos os modos de operação, há uma diferença na frequência máxima associadas ao motor e ao mecanismo de corte. O fator mais aceitável para isso é o fato da motorroçadora não ser nova, e o motor da mesma estar com alterações, causando diferença na velocidade angular deste.

Os gráficos vistos na Figura 29 representam as densidades de potência medidas no apoio da mão esquerda do equipamento. Nas medições em plena rotação, Figura 29 (a), foi possível observar um pico bastante energético em 193,4, 138,2 e 72 Hz. Já na Figura 29 (b), referente ao modo de operação de marcha lenta, é possível observar quatro picos energéticos bastante visíveis, em 31, 12,9, 68,9 Hz e por fim, um de menor amplitude em 83 Hz.

É possível notar uma grande diferença na amplitude das frequências mais energéticas na mão esquerda quando comparada às da mão direita. Porém, as frequências mais energéticas mantêm um padrão. As menores amplitudes podem ser explicadas pelo fator contrutivo da máquina, que transmite menor vibração na mão esquerda, como é possível observar nos resultados do Quadro 3.

Figura 29 - Espectros de potência para mão esquerda, dados coletados com Celular 2.



Fonte: Autor.

As frequências mais energéticas na Figura 29(a) são bastante próximas das vistas Figura 28(a). Desta forma, podem ser atribuídas aos mesmas causas, onde a frequência de 193,4 Hz é advinda do motor da máquina, e a de 138,2 Hz é devido ao movimento da ferramenta de corte da máquina.

Para ambas as mãos, em plena rotação, é possível notar que há uma frequência menos energética, porém vizível em 68 Hz, para mão direita, e 72 Hz para a mão esquerda. Por possuírem valores bastante próximos, e proporções de amplitude semelhantes, devem apresentar a mesma causa. O causador não está claro, porém, é provável que seja proveniente da viga, juntamente com o sistema de amortecimento, que ligam o mecanismo de corte ao motor da motorroçadeira. Além disso, não foram encontrados trabalhos em que são observados picos tão aparentes fora das frequências do motor e mecanismo de corte.

No Quadro 4 é possível visualizar um resumo com as principais frequências encontradas no trabalho. Como as frequências que se destacam, possuem pouca diferença cada entre os eixos, o valor apresentado corresponde a uma frequência aproximada, equivalente para os 3 eixos. Para o Celular 2, há algumas frequências que aparecem quando a escala do gráfico está reduzindo, porém quando a escala é ampliada para a original, a mesma não é mais observável. Isso se dá por sua amplitude ser muito baixa, se compara às outras frequências presentes no sinal.

Quadro 4 - Principais frequências encontradas com os celulares nos ensaios.

|           | Plena Rotação     |                  | Marcha lenta      |                  |
|-----------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
|           | Mão esquerda (Hz) | Mão direita (Hz) | Mão esquerda (Hz) | Mão direita (Hz) |
| Celular 1 | 10;36             | 36               | 10; 29            | 30               |
| Celular 2 | 72; 138,2; 193,4  | 68; 137,4; 192,2 | 13; 31; 68,9      | 30               |

Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÕES

A vibração emitida por máquinas é muito prejudicial ao corpo humano, podendo ainda ser potencializada, quando aliada a outros fatores, como postura incorreta e má utilização destas máquinas. Por isso, é importante que existam equipamentos e métodos alternativos para avaliar esse fenômeno.

Trabalhos já publicados como Hao et al. (2013) ou Bernardi et al. (2018), ponderam as vibrações de baixa frequência como as mais maléficas para o corpo humano. Portanto, com certa cautela, é possível afirmar que aparelhos celulares modernos têm capacidade de avaliar a vibração de mão e braços. Apesar de muitos possuírem limitações na taxa de amostragem, alguns possuem taxas satisfatórias, como o caso do Celular 2, deste estudo. Este teve capacidade de medir a vibração na mesma faixa de frequência analisada por Bernardi (2018) em seu trabalho, que foi de 250 Hz.

Além disso, com o Celular 2, foi possível identificar frequências de vibração provenientes do motor e mecanismos de corte. Stayner (2003), relata que a ferramenta de corte pode tornar-se a principal fonte de vibração em uma motorroçadeira, caso esta esteja desbalanceada. Outro fator que corrobora com a afirmação, é que outros trabalhos, que utilizaram equipamentos profissionais para a medição, encontraram resultados semelhantes aos encontrados com um *smartphone* neste trabalho.

Hoje em dia existem muitos modelos de *smartphones*, cada um com características próprias. Essas características são os grandes limitadores quanto a usabilidade de um *smartphone* para a mediação de vibração. Como visto no trabalho, um dos *smartphones*, se saiu melhor na avaliação das frequências mais energéticas emitidas pela motorroçadora. Já o outro, se aproximou mais do equipamento profissional na avaliação da vibração RMS equivalente, transmitida ao operador.

Outro fator que teve influência nos resultados, foi a forma com que os *smartphones* foram fixados na máquina. Isso porque devido a fixação pode haver um movimento do aparelho em relação ao ponto que está fixado. Desta forma um dispositivo adequado para a fixação pode melhorar a qualidade dos dados.

Portanto, é possível dizer que a medição de vibração de mãos e braços, com um *smartphone*, em uma motorroçadeira, pode ser viável. Porém, como se trata da avaliação de um fenômeno que pode causar danos à saúde do operador, é importante que a medição seja feita

com aparelhos adequados e que atendam às normas vigentes. Uma possibilidade de uso dos *smartphones*, pode se dar na identificação de possíveis desbalanceamentos, ou problemas no motor da máquina, ou caso haja medições frequentes, identificar aumentos repentinos no nível de vibração.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi visto neste trabalho que o uso de *smartphones* para a medição de vibração de mãos e braço é promissor. Porém, devido às limitações no momento em que foram realizados os testes, não foi possível verificar alguns fatores. Desta forma, ficam sugestões para futuros trabalhos que forem realizados nesta área:

- Utilizar diferentes mecanismos de corte na motorroçadora, e diferentes modelos de motorroçadora;
- Utilizar um número maior de *smartphones* para avaliar o desempenho;
- Desenvolver um dispositivo para a fixação do *smartphone* na motorroçadora por meio de impressão 3D;
- Realizar testes não estacionários, realizando pequenas tarefas enquanto o aparelho coleta dados de vibração;
- Aplicar filtros de ponderação de frequência nos dados de vibração RMS, obtidos com os *smartphones*.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO – 22867:2011, Máquinas florestais e de jardinagem - Código de ensaio de vibração para máquinas manuais portáteis com motor de combustão interna - Vibração nas empunhaduras. 2018.

ANDRADE, E. V. de; O uso do acelerômetro de um *smartphone* para captação e análise das vibrações da articulação temporomandibular. 2017. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

BERNARDI, B.; QUENDLER, E.; BENALIA, S.; MANTELLA, A.; ZIMBALATTI, G. Occupational risks related to vibrations using a brush cutter for green area management. **Annals of Agricultural and Environmental Medicine**, ISSN 1232-1966, Vol. 25, n 2, p. 255-258, 2018.

BEVELACQUA, P. J. Fourier Transform. TheFourierTransform.com, 2010. Disponível em: <<https://www.thefouriertransform.com/>>, Acesso em: 17 de abril de 2021.

BRAGA, A. Da C., Exposição Ocupacional a Vibrações no Sistema Mão-braço no Sector da Construção. 2007. Tese para obtenção de grau Mestre em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais. Universidade do Porto, Porto, 2007.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 1297 de 13 de Agosto de 2014. Aprova o Anexo I - Vibração da Norma Regulamentadora nº 9 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA), altera o anexo 8 - Vibração da Norma Regulamentadora nº 15 - Atividades e Operações Insalubres, e da outras providencias. Diário Oficial da União. Brasília, 2014.

BRIGHAM, E. O.; MORROW, R. E.; The fast Fourier transform. **IEEE Spectrum**, ISSN: 1939-9340, v.4, n.12. Dezembro 1967. DOI: 10.1109/MSPEC.1967.5217220.

BRUEL & KJAER - PRODUCT DATA, Human Vibration Analyser – Type 4447. 2009. Disponível em: <<https://www.bksv.com/media/doc/bp2147.pdf>>. Acesso em: 15 de março de 2021.

BRUEL & KJAER, Technical Documentation, Human Vibration Analyzer Type 4447 – User Manual. 2009. Disponível em: <<https://www.bksv.com/downloads/4447/be1772.pdf>>. Acesso em: 15 de março de 2021.

BUFFALO – Manual de instruções Roçadeira BF. 2013. Disponível em: <<https://www.buffalo.com.br/upload/produtos/manuais/38dc35e48ec8455b9db797cd0ed2d2b4.pdf>>. Acesso em: 10 de março de 2021.

CARGNIN, R. M. K.; Avaliação do celular como ferramenta de medição de vibrações para análise de conforto veicular. 2017. 30 p. Artigo de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2017.

COTF. Conservação e manutenção de motorroçadora. Lousã, Portugal. **Instituto de Conservação da Natureza e Florestas**, I.P, 2013.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO - FUNDACENTRO. Norma de Higiene Ocupacional – Procedimento técnico. Avaliação da exposição ocupacional a vibrações em mãos e braços. NHO10. São Paulo, 2013. 54 p.

GOMES, M. H.; SAVIONEK, D. Measurement and evaluation of human exposure to vibration transmitted to hand-arm system during leisure cyclist activity. **Brazilian Journal of Biomedical Engineering**, v.30, n.4, p.291-300, 2014. Acesso em: 30 de março de 2021. <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-31512014000400002&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-31512014000400002&script=sci_arttext)>. doi: 10.1590/1517-3151.0546.

GRIFFIN, Michael J., Handbook of Human Vibration. Estados Unidos da América: **Elsevier**, 1996.

HAO, K. Y.; RIPIN, Z. M. Nodal control of grass trimmer handle vibration. **International Journal of Industrial Ergonomics**. ISSN 0169-8141, v. 43, n.1, p.18-30, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.10.007>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169814112000984>>. Acesso em: 30 de março de 2021.



HARADA, N.; MAHBUB, M. H. Diagnosis of vascular injuries caused by hand-transmitted vibration. **International archives of occupational and environmental health**, ISSN: 1432-1246, v.81, n.5, p.507-518, 2007. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00420-007-0246-4.pdf>>. Acesso em: 30 de março de 2021. doi: 10.1007/s00420-007-0246-4.

INMAN, Daniel J., Engineering Vibrations. 4ª Edição. Estados Unidos da América: **Pearson**, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5349-1: 2001. Mechanical vibration Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration — Part 1: General requirements. 2001.

KELLY, S. Graham, Fundamentals of Mechanical Vibration. 2ª Edição. Estados Unidos: **McGraw-Hill Science/Engineering/Math**, 200. p. 672.

MANSFIELD, Neil J., Human Response to Vibration. Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC PRESS, 2005.

MARTINS, T. Análise modal de vibrações de um motor de combustão interna: enfoque em um sistema monocilíndrico de quatro tempos. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Mecânica), Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Campus Guarapuava. p. 50. 2017.

NILSSON, T. et al. Hand-arm vibration and the risks of vascular and neurological diseases – A systematic review and meta-analysis. **PLOS ONE**, Canadá, 13 jul. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180795>>. Acesso em: 30 de março de 2021.

OLIVEIRA JUNIOR, G. G. DE; SILVA, A. B. DA; CUNHA, I. DE ÂNGELO; APARECIDO, L. E. DE O.; SABINO, P. H. DE S. Occupational exposure to localized vibrations using portable mechanical brush cutter in coffee crop. **Coffee Science** - ISSN 1984-3909, v. 14, n. 2, p. 183 - 192, 28 de junho 2019.

RAO, Singiresu S., Vibrações Mecânicas. 4ª Edição. Brasil: **Pratice Hall Brasil**, 2009.

RODRIGUES, N. F.; Diagnóstico de falha de ignição em veículos automotivos através de vibração de *smartphone*. 2018. 56 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB. 2018.

SEIDEL, H.; HEIDE, R. Long-term effects of whole-body vibration: a critical survey of the literature. **International Archives of Occupational and Environmental Health** 58, 1–26 (1986). <<https://doi.org/10.1007/BF00378536>>

SMITH, S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. 1º Edição, Estados Unidos da América: **California Technical Pub**, 1997. Disponível em: <<http://www.dspguide.com/>>. Acesso em: 17 de abril de 2021.

STAYNER, R. M. Isolation and auto-balancing techniques for portable machines. **Health and Safety Executive**. Reino Unido. 2003. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr078.htm>>. Acesso em: 2 de maio de 2021.

STIHL – Manual de instruções de serviços FS 300, 350, 380. 2014. Disponível em: <<https://www.redstihl.cl/wp-content/uploads/2019/09/MANUAL-FS-300-350-380.pdf>>. Acesso em: 10 de março de 2021.

VIEIRA, L. P. Experimentos de Física com Tablets e *Smartphones*. 2013.116 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.

VOELTER-MAHLKNECHT, S., ROSSBACH, B., SCHLEITHOFF, C. et al. Sirtuin1 single nucleotide polymorphism (A2191G) is a diagnostic marker for vibration-induced white finger disease. **Clin Epigenet** 4, 18 (2012). <https://doi.org/10.1186/1868-7083-4-18>