

Artigo

Analise da influência da vibração no corpo de pilotos de carros do tipo mini baja da Equipe Cactus Baja

João Eufrazio da Silva Neto ^[1] e Rômulo Pierre Batista dos Reis ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi Árido, Bacharelado em Engenharia Mecânica; João Eufrazio da Silva Neto; e-mail@e-mail.com

^[2] Universidade, Federal Rural do Semi Árido; Rômulo Pierre Batista dos Reis; e-mail@e-mail.com

Data da defesa: 17/06/2022;

Resumo: A cactus baja é uma equipe composta por discentes de graduação de engenharia, vinculado a Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade, que tem como objetivo o desenvolvimento de veículos a nível de protótipos do tipo mini baja. Este veículo tem como fonte propulsora de potência um motor a combustão interna. O motor além de ser responsável pelo movimento do veículo, ele também é responsável por grande parte da transmissibilidade de vibração para os componentes do veículo. Essa vibração além de causar danos estruturais, causam também danos a saúde e conforto do piloto. Assim, este artigo, foi realizado afim de verificar os efeitos das vibrações transmitidas ao corpo humano ao estar pilotando o veículo, como também mapear os locais estratégicos para desenvolvimento de projeto de coxinzado. Em relação a vibrações do corpo inteiro, constatou-se no trabalho, que é considerado muito desconfortável, e que a frequência de vibração é próxima a frequência natural de algumas partes do corpo, o que é preocupante, pois pode agravar os efeitos das vibrações em tais partes. Já para as partes localizadas do corpo humano, em todas as partes analisadas está em nível inaceitável, e medidas corretivas e preventivas devem ser adotadas.

Palavras-chave: Veículo, Baja, Frequência, Corpo, Transmissibilidade.

1. INTRODUÇÃO

Regulamentado pela Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (Society of Automotive Engineers) - SAE, o veículo baja é o resultado de um projeto desenvolvido por graduandos e pós-graduandos de instituições de ensino superior do país e do mundo, no qual tem como objetivo proporcionar a aplicação do conhecimento teórico adquirido ao longo dos cursos de engenharia, tais como, metodologia de estudo de projeto e manufatura, diretamente na prática com a fabricação de um veículo protótipo para competição SAE.

Por se tratar de um veículo, necessita-se de um mecanismo que proporcione movimento, o motor. Entende-se por motores como dispositivos que transformam outras formas de energia em energia mecânica. Há motores de diversos tipos, dimensões e capacidade possibilitando aplicações diversas, desde sistemas simples (pouco complexo) até grandes sistemas (muito complexo). No Baja, um motor Briggs&Straton, 4 tempos, 10 HP, 305 cilindradas, fica responsável pelo fornecimento de potência ao veículo.

Tendo o motor como a principal fonte para início do movimento, observa-se que seu funcionamento tanto possui benefícios – locomoção – bem como malefícios – ruído e vibração. Restringindo-se aos malefícios, sabe-se que níveis de vibrações elevados podem não só causar problemas estruturais e mecânicos, como também causar danos à saúde do operador, e por isto a vibração deve ser controlada e/ou isolada.

Diversas literaturas mostram os efeitos nocivos ao corpo humano para diferentes faixas de frequência em função do tempo de exposição. As principais normas que regulam a metodologia para captação de dados é a ISO 2631 para o corpo inteiro que também define critérios para julgamento e tomadas de decisões e a ISO 5349 para as partes individuais do corpo, essa portanto, define apenas metodologia para coleta de dados e não define critérios para julgamento qualitativo ou quantitativo, com isso, para as partes localizadas foi usada a norma de higiene ocupacional NHO 09. O limite de vibração suportado pelo corpo humano é de fundamental importância para projetos de componentes de automóveis para de reduzir as vibrações transmitida ao piloto.

Em relação transmissibilidade de vibração para a estrutura como um todo, foi realizado um estudo onde se definiu um coxim elastômetro, atenuando assim uma grande parte das vibrações que eram transmitidas a gaiola e consequentemente ao corpo do piloto. Contudo ainda se ouvia vários *feedback negativos* de pessoas que operavam o veículo em um determinado intervalo de tempo, as maiores reclamações eram do tipo de dormência nas mãos, dores na coluna lombar, dores de cabeça e até mesmo mal estar dependendo do tipo e tempo de exposição a vibração.

O presente trabalho, tem como objetivo mapear os níveis de vibrações transmitidas ao corpo do piloto como também definir locais estratégicos para iniciar um estudo de coxinização. O tempo limite de exposição aos níveis atuais de vibrações também devem ser determinados, afim de sugerir limite de tempo de operação a fim de evitar danos a saúde dos ocupantes, como também definir caminhos para um estudo e projeto de coxinização do veículo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma vibração pode ser definida como o histórico de vibração de um determinado corpo ou basicamente como um movimento oscilatorio de um corpo em relação a um ponto fixo de referência. Vibração é qualquer movimento que se repita durante um intervalo de tempo. O número de ciclos desse movimento durante um segundo é determinado pela frequência, em que sua unidade é em Hz [1]. As vibrações, se apresentam em amplitude de aceleração no domínio do tempo, com o auxílio da ferramenta matemática da transformada de Fourier (FFT), é possível se obter a amplitude de aceleração no domínio da frequência, em que na maioria dos casos facilita a compreensão dos dados.

Para amplitude de aceleração o valor mais usual, que é utilizado é a raiz da aceleração quadrática média o RMS (root mean square) como mostra a Equação 2.1, onde a_i é a aceleração medida, a_{rms} é a aceleração média quadrática, e N é o número de medições, por definição é a verdadeira potência energética abaixo da curva [2].

$$a_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 \right)^{0,5} \quad (2.1)$$

2.1. Avaliação e tomada de decisão para vibração no corpo inteiro (VCI).

2.1.1 Metodologia para coleta de análise de dados – Norma ISO 2631.

Por padrão de metodologia de estudo, julgamento e tomada de decisão para os efeitos das vibrações no corpo inteiro, a norma que é tomada como referência para o assunto é a ISO 2631-1 (1997) – *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements* que estabelece a ponderação de frequências em função da sensibilidade do corpo humano a vibrações.

As vibrações no corpo inteiro devem ser medidas nas direções das coordenadas de um sistema ortogonal tendo a sua origem no coração, como mostra a Figura 01.

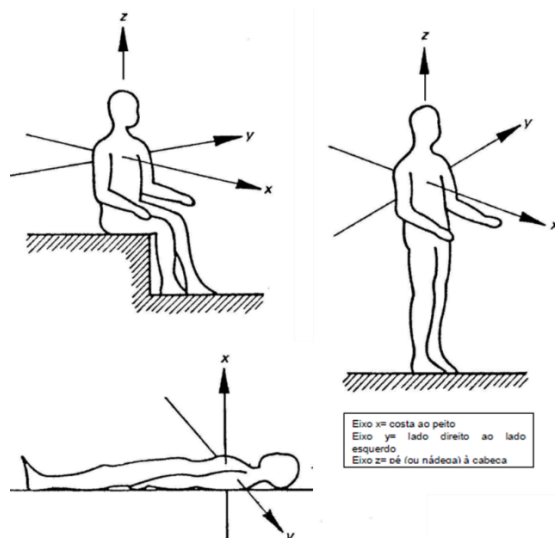


Figura 01 – Sistema de coordenadas de medição. Fonte ISO 2631-1

As formas diretas de quantificar o movimento oscilatório baseado apenas no valor *rms*, não leva em conta os possíveis efeitos da frequência [3]. Para contornar esse problema, foram construídas curvas de ponderação, ou mais comumente se referindo como curva de compensação para medições de movimentos oscilatório do corpo inteiro (VCI), representado na Figura 2. Essa curva é em função da frequência e é utilizada como um fator que atribui pesos diferentes para movimentos com frequências diferentes. Tendo como objetivo qualificar as vibrações nas frequências em que o corpo humano apresenta maior sensibilidade a efeitos do movimento oscilatório. O resultado desta aceleração ponderada pela frequência a_w está descrita na Equação 2.2.

$$a_w = \sqrt{\sum (W_i a_i)^2} \quad (2.2)$$

Onde W_i é o fator de ponderação e a_i é a aceleração *rms* para dadas frequências.

A Figura 02 mostra as curvas de ponderação por frequência W_k e W_d utilizadas em diferentes casos na avaliação da exposição a vibração transmitida ao corpo inteiro. A Tabela 01, pode-se visualizar em quais casos estas curvas são empregadas. A direção longitudinal (cabeça- tornozelos) constitui o eixo dos Z. Nesta direção o corpo é mais sensível às vibrações na gama dos 4 Hz-8 Hz. A resposta humana na direção X (frente – costas) e na direção Y (esquerda – direita) não difere e a sensibilidade é maior na gama 1 Hz-2 Hz [3].

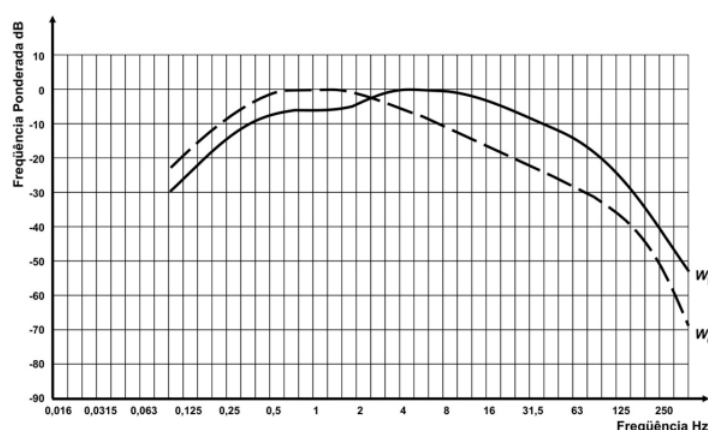


Figura 02 – Curvas de ponderação por frequência W_k e W_d para vibração do corpo inteiro. Fonte ISO 2631 (1997)

Devido ao fato da medição da vibração ser realizada seguindo um sistema de coordenadas triaxial, deve ser obtido para cada componente dos eixos x, y e z, um valor de aceleração a_{rms} ponderada pela frequência, representada na Equação 2.2, que para os sistema triaxial se torna a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} , dados em m/s^2 . Além disso, são utilizados fatores de multiplicação k_i , os quais tem como objetivo atribuir pesos para os diferentes eixos de coordenadas de acordo com a medição e propósito idealizado.

		Mão-braço (volante)			Corpo int. (assento)			Corpo int. (encosto)		
		eixo x	eixo y	eixo z	eixo x	eixo y	eixo z	eixo x	eixo y	eixo z
Curva de ponderação	Saúde	W_h	W_h	W_h	W_d	W_d	W_k	W_d	W_d	W_k
	Conforto	W_h	W_h	W_h	W_d	W_d	W_k	W_c	W_d	W_d
Fator multiplicador (k)	Saúde	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,0	1,4	1,4	1,0
	Conforto	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,5	0,4

Tabela 01 –Fatores de multiplicação utilizados nas medições. Fonte ISO 2631 (1997)

A vibração em diferentes frequências ou em diferentes eixos, podem produzir diferente sensações e diversas partes do corpo [3]. Ainda vale ressaltar que pela grande quantidade de dados experimentais da direção z, utiliza-se um fator de multiplicação de 1,0 para os casos de análise a saúde. Para outras direções, por falta de dados experimentais e informações, utiliza-se o fator 1,4 por questão de segurança.

Com valores a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} , e fatores de multiplicação escolhidos através da Tabela 01 em função da necessidade de análise, podemos calcular, através da soma dos quadrados das acelerações de cada componente, obtendo-se vibração total a_{mr} em m/s^2 , conforme descrito a Equação 2.3.

$$a_{mr} = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (2.3)$$

onde k_x , k_y e k_z são fatores de multiplicação aplicados á seus respectivos eixos.

2.1.2 Critério para julgamento e tomada de decisão para vibrações do corpo inteiro..

Há quatro fatores físicos de importância primordial para determinar a resposta humana a vibração, que é a intensidade, frequência, direção e duração (tempo de exposição) da vibração. Em geral, os limites de conforto ou desconforto em um passageiro ou motorista de um veículo são difíceis de determinar devido a variação da sensibilidade de cada um para com a vibração [5]. Porém a norma ISO 2631 de 1997 estabelece alguns critérios para avaliação do tempo de exposição e conforto devido a vibração.

Para o tempo de exposição, pode-se calcular o valor a_{rms} para cada um dos eixos recomendados pela norma ISO 2631, obtida através da Equação 2.1, e considerado as faixas de frequências que mais causam danos ao corpo humano, que são na faixa de 4 a 8Hz para o eixo z e de 1 a 2Hz para o eixo x e eixo y. Com essas considerações podemos obter o tempo de exposição com base no Gráfico A1 no apêndice, limita o tempo de exposição á vibração para determinadas frequências relacionadas a fadiga direção z. Já o Gráfico A2 no apêndice determina o tempo limite a exposição ao movimento oscilatório para direções x e y.

Os níveis de conforto, pode ser encontrado seguindo a Tabela 02 recomendada pela ISO 2631-1 1997, que fornece escala de desconforto em função da aceleração média resultante a_{mr} descrita pela Equação 2.3, considerando seus respectivos fatores de multiplicação recomendado pela Tabela 01.

<i>Índice de Conforto</i>	<i>Escala</i>
Menor do que 0,315 m/s ²	Confortável
0,315 – 0,63 m/s ²	Levemente confortável
0,5 – 1 m/s ²	Pouco confortável
0,8 – 1,6 m/s ²	Desconfortável
1,25 – 2,5 m/s ²	Muito desconfortável
Maior do que 2,0 m/s ²	Extremamente desconfortável

Tabela 02 – Escala de desconforto em função da aceleração média resultante. Fonte ISO 2631 (1997)

2.1.3 Efeitos da VCI sobre o corpo humano.

O corpo humano quando exposto a um determinado nível de vibração, sofre diversos efeitos colaterais. A exposição recorrente á vibração do corpo inteiro pode causar danos na região da coluna, e podendo até afetar o sistema circulatório e/ou urológico. Sintomas do distúrbio com odor de cabeça, insônia, e tremor se manifestam durante ou após a exposição ao sistema oscilatório [6].

2.2. Avaliação e tomada de decisão para vibração localizadas no corpo humano.

2.2.1 Metodologia para coleta de análise de dados – Norma ISO 2631 – Norma ISO 5349.

A seguir será apresentada a metodologia para avaliação da exposição humana a vibrações localizadas. A ISO 5349 não define limites seguros exposição humana a vibração, ela estabelece apenas a metodologia para medição e interpretações dos resultados. Vibrações localizadas são geralmente transmitidas nas parte em contato com a superfície vibratórias, em veículos são transmitidas através do banco, volante, pedais de aceleração e pedais de freio e aceleração.

Como mostra a Figura 03, a norma ISO 5349 especifica que as medições devem ser feitas em três eixos, seguindo um sistema de coordenadas biodinâmico e coordenadas basicêntrico. Entretanto, por recomendação e adaptação, para a coleta de dados do presente trabalho, as coordenadas basicêntricas foram usadas para medir a vibração em partes localizadas do corpo humano.

A variavel primaria para caracterização da vibração é a aceleração a_{rms} , que está representada na Equação 2.1. Como para o corpo inteiro, essa aceleração a_{rms} também deve sofrer uma ponderação em relação a sua frequencia vibracional W_h (mostrada na Tabela 01) para as partes localizadas do corpo humano. Para esse caso, onde as partes do corpo são avaliadas localmente, vamos usar o gráfico presente na Figura 04, que indica o fator de ponderação em função de frequência vibracional.

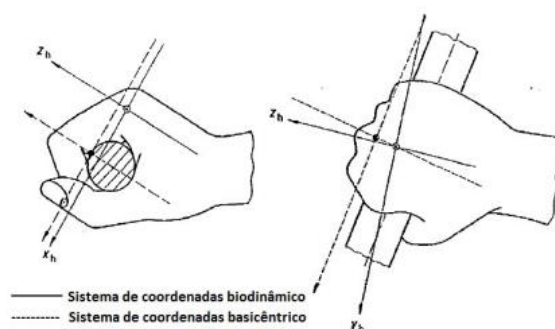


Figura 03 – Sistema de coordenadas biodinâmico e basicêntrico para vibração mão e braço. Fonte ISO 5349

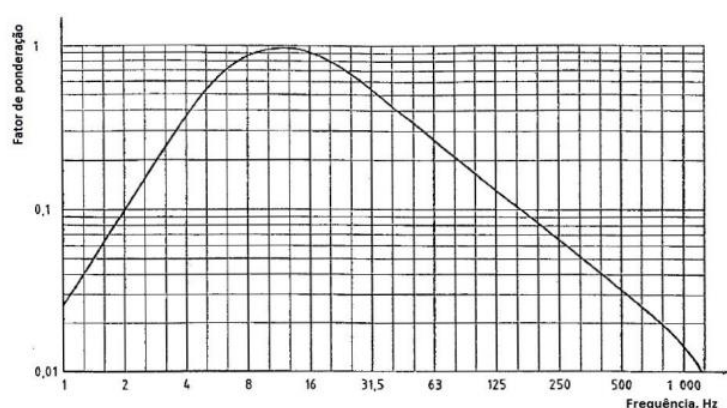


Figura 04 – Curva de ponderação por frequência W_h (para vibração de mão-braço. Fonte ISO 5349-1

Como se pode notar ao avaliar a Figura 04, um maior fator de ponderação está para faixas de frequência entre 4 e 31,5 Hz, no qual é o intervalo de frequência onde os danos a saúde são maiores. Logo, por segurança nesse estudo vamos considerar o fator de ponderação na frequência que causa mais dano a saúde, portanto devemos tomar o valor $W_h = 1$. Com essas considerações, a Equação 2.2 deve-se resumir em:

$$a_{hv} = \sqrt{\sum (W_i a_i)^2} = \sqrt{\sum (a_i)^2} = a_i \quad (2.4)$$

E para julgamento devemos tomar como base a equação média resultante, calculado a partir da Equação 2.3.

2.2.2. Critérios para tomada de decisão para vibrações localizadas.

Como a ISO 5349 não oferece suporte para julgamento e tomada de decisão para efeitos da vibração localizada no corpo humano, por o presente estudo, a referência para julgamento dos valores e tomada de decisão foi usada NHO 09 (Norma de exposição ocupacional a vibrações do corpo inteiro), ela apresenta critérios e considerações técnicas a serem tomadas de acordo com a aceleração média resultante a_{mr} , calculada através dos resultados obtidos com o uso do sistema de aquisição de dados do presente trabalho. A Tabela 03, recomenda e classifica faixas de vibrações médias resultante.

a_{ren} (m/s^2)	VDVR ($m/s^{1,75}$)	Consideração técnica	Atuação recomendada
0 a 0,5	0 a 9,1	aceitável	No mínimo manutenção da condição existente.
> 0,5 a < 0,9	> 9,1 a < 16,4	acima do nível de ação	No mínimo adoção de medidas preventivas.
0,9 a 1,1	16,4 a 21	região de incerteza	Adoção de medidas preventivas e corretivas visando à redução da exposição diária.
acima de 1,1	acima de 21	acima do limite de exposição	Adoção imediata de medidas corretivas.

Tabela 03 – Critério de julgamento e tomada de decisão. Fonte NHO09 (2013)

2.2.3. Critérios para tomada de decisão para vibrações localizadas.

Um estudo realizado em 1862 chamado de *Local asphyxia and symmetrical ganfrene of the extremities*, e conduzido por Maurice Raynaud foi o primeiro a iniciar as descrições dos efeitos patológicos da vibração localizada nas mãos e braços, onde era observado as variações vasculares e musculoesqueléticos que ocorriam em indivíduos expostos a determinados níveis de vibração. Raynaud, notou que através da contração intermitente de vasos sanguíneos periféricos, ocorre uma alteração da cor das extremidades dos dedos, sendo mais tarde nomeada como a síndrome dos dedos brancos ou síndrome de Reynaud. Esse problema, assim como outros relacionados a problemas de próstata e tendões já foram expostos por outros autores, e é muito observado em como em ciclistas [8].



Figura 05 – Fenômeno de Reynaud.

2.3. Fenômeno da ressonância e transmissibilidade.

Em diversos segmentos da engenharia, a ressonância deve ser evitada para que não ocorra colapso na estrutura. Sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincide com a frequência da força externa atuante, ocorre o fenômeno de ressonância em questão, ocasionando grandes deformações ou falhas mecânicas [1].

Transmissibilidade é quando uma base que estar vibrando para o sistema, também conhecido como fator de amplificação. A Equação 2.5, representa matematicamente o fenômeno, onde $r = \frac{\omega}{\omega_n}$, ω é a frequência de excitação, ω_n é a frequência natural e ζ é a razão de amortecimento.

$$\text{Transmissibilidade} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.5)$$

Todo material possui frequência própria, o corpo humano da mesma maneira que os outros matérias, ao entrar em contato com sistemas que emitem vibrações com frequência semelhante à sua frequência natural acaba por entrar em ressonância. Sempre que possível essas faixas de frequências devem ser evitadas, afim de evitar efeitos desconfortáveis, fadiga e até mesmo patologias irreversíveis. A Tabela 04 mostra a frequência natural para cada parte do corpo humano [9]

Parte do Corpo	Frequência Natural
Globo ocular	20-80 Hz
Ombro	4-5 Hz
Parede torácica	60 Hz
Mão e punho	50-200 Hz
Braço	16-30 Hz
Perna em pé	20 Hz
Cabeça axial	25 Hz
Antebraço	16-30 Hz
Mão e Braço	5-50 Hz
Massa abdominal	4-8 Hz
Coluna Vertebral	10-12 Hz
Perna dobrada	2 Hz

Tabela 04 – Relação entre parte do corpo e frequência natural. Fonte Adaptação de B & K (1988)

2.4. Análise da frequência e transformada de Fourier.

Entendendo que enquanto trafega, um veículo fica exposto a uma ampla faixa de frequência devido à constante variação de velocidade e da natureza das pistas e que estas vibrações são sentidas pelos usuários, o estudo do conforto devido aos movimentos vibratórios em veículos é realizado em uma faixa de frequência que vai de 1Hz até 100Hz. Dentro dessa faixa, é comum na indústria automobilística a subdivisão do fenômeno de “ride” em “ride” primário que compreende as frequências entre 1Hz a 7Hz e “ride” secundário compreendendo

as frequências entre 7Hz e 100Hz. Nesta última faixa de frequência atuam às vibrações originárias do motor, sistema de trem de força, modos de vibração da carroceria e movimentação da suspensão do veículo [10].

O movimento vertical é a resposta do veículo às mudanças do perfil da pista em que trafega, ocorrendo em baixas frequências e nas faixas dos modos de vibração da suspensão. Atualmente considera-se aceitável a frequência de “ride” pela indústria automobilística valores entre 1,2Hz a 1,6Hz [10]. Para veículo *off-road*, toma-se o valor máximo de 1,6Hz para análise. No que se refere ao espectro das vibrações elas podem ser divididas de acordo com a frequência sendo “ride” de 0 a 25Hz e ruído variando de 25Hz a 20.000Hz. As vibrações induzidas pelo trem de força *powertrain shake* ocorrem em uma faixa de frequência entre 7Hz a 25Hz, sendo subdividido em vibrações induzidas de baixa frequência, compreendidas entre 7Hz e 12Hz, e vibrações induzidas de alta frequência, aquelas entre 12Hz e 25Hz [10].

Estas faixas de frequências foram analisadas a partir da transformada de Fourier, processo de análise espectral se inicia com a aquisição do sinal a ser avaliado, no domínio do tempo, sendo este transformado para o domínio da frequência aplicando-se a Transformada de Fourier [11].

A Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) é um algoritmo eficiente para se calcular a transformada discreta de Fourier e a sua inversa. Os resultados da aplicação da FFT informam sobre a composição média das frequências, calculadas considerando todo o tempo de duração do sinal [11]. A Equação 2.6 define a transformada de Fourier, onde com ajuda de um algoritmo construído com a linguagem Python usado na IDE do software Power BI, se automatizou o processo de cálculos, o script em Python usado na transformada de Fourier está presente no apêndice, representado na Figura A1.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(x)e^{-ixt} dx \quad (2.6)$$

2.5. Captação de dados.

A metodologia para captar o sinal da vibração mecânica foi realizada em três etapas. Na primeira foram definidos a placa e sensor que seriam utilizados. Para coletar a vibração do corpo inteiro, existem no mercado diferentes equipamento, onde é possível calibra o ruído facilmente para diferentes para diversas situações. No presente estudo foi utilizado o equipamento fornecido pela Universidade Federal Rural do Semi Árido. Já para a coleta das vibrações localizadas, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados usando o Arduino.

O software usado para realizar o tratamento e ajudar na interpretação dos resultados foi o Power BI, onde é possível desenvolver algoritmos de tratamento e limpeza dos dados em grande escala.

2.5.1. Captação do sinal para o corpo inteiro.

O equipamento utilizado para captação dos sinais de vibração para o corpo inteiro, foi o medidor de vibração ocupacional do corpo humano MV 100, fornecido pela Universidade Federal Rural do Semi Árido. O equipamento consiste em um analisador de vibração portátil. Além de medir as vibrações o aparelho é capaz de armazenar os dados em uma memória interna com capacidade de 32 Mb. O aparelho é capaz de medir quatro canais de entrada simultaneamente, sendo três, utilizada para medir a vibração nos três eixos de coordenadas. Pode-se visualizar na imagem abaixo uma evidencia do equipamento utilizado nessa medição.

Para captação do sinal ele foi colocado no acento do banco, e o piloto sentado sobre o sensor. Para a situação do carro estático e em movimento foi coletado o sinal durante 1 minuto. Repetido isso por 5 vezes para validação dos resultados



Figura 06 – Representação da instalação do sensor para aquisição do sinal de vibração para o corpo inteiro. (a) Senso a ser usado na coleta de dados. (b) Instalação do senso no banco do veículo.

<i>Tempo de coleta</i>	<i>Velocidade do veículo</i>
1 min	0 km/h
1 min	40 km/h

Tabela 05 – Variações na captação dos dados. Autoria própria

2.5.1. Captação do sinal para as partes localizadas do corpo do piloto.

Para coleta dos dados em partes localizadas do corpo humano, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados usando o Arduino. A escolha da placa Arduino correta está associada a diversos fatores, como a quantidade de sensores que serão conectados à placa, a corrente que esses dispositivos consomem, a quantidade de memória disponível para armazenar o código, os protocolos de comunicação disponíveis e a velocidade de transmissão e recepção dos dados [13].

Para este projeto, a placa escolhida foi o *Arduino Uno*, pois apresenta uma melhor relação custo benefício compara a outros modelos do mercado. Com a placa selecionada, o passo seguinte foi a escolha do sensor para a captura dos valores de aceleração. O sensor escolhido foi o MMA 7455, desenvolvido e produzido pela NXP.

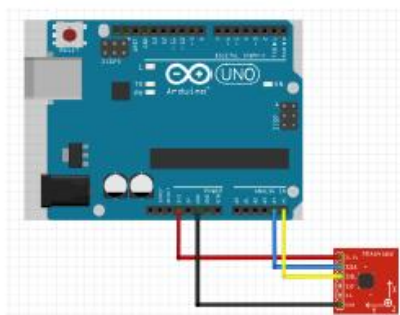


Figura 07 – Esquema de ligação entre a placa e o sensor. Autoria própria

O sensor foi instalado em diferentes partes do corpo e coletado o sinal durante um intervalo de tempo de 1 minuto. Para conferência e validação dos dados, esse procedimento foi repetido 5 vezes. Abaixo uma representação do local onde o acelerômetro foi instalado para a coleta de dados em várias partes individuais do corpo do piloto.



Figura 08 – Amostra de locais onde o sinal da vibração foi captado para as partes localizadas. Autoria própria.

3. RESULTADOS

Através da captação de dados referente a aceleração de vibração no corpo todo e em partes localizadas, primeiramente foi aplicado a transformada de Fourier para assim conseguimos analisar a amplitude de vibração no domínio da frequência e verificar se tal frequência de vibração poderia entrar em ressonância com outras partes do corpo, caso fosse próxima da frequência natural dos membros do corpo humano, ocasionando assim, prejuízo a saúde e conforto do piloto. Após analisar a aceleração no domínio da frequência podemos iniciar o desenvolvimento de soluções de amortecimento em pontos estratégicos, a fim de impedir que o fenômeno oscilatório chegue até o corpo do motorista.

Todas as ações e estudos desenvolvidos durante cada fase do projeto, foi com o objetivo principal de analisar se a frequência de vibração transmitida ao corpo inteiro com o veículo estático e em movimento sob piso asfáltico estava na frequência natural de partes do corpo humano, como também ter embasamento sobre quais efeitos a vibrações teriam no corpo humano.

3.1. Frequência de vibração no corpo inteiro(VCI)

3.1.1. Da avaliação estática.

Como mostra a Figura 09, a variação da aceleração no domínio do tempo(s) e no domínio da frequência, podemos notar que para a análise de VCI, ocorre maior amplitude de vibração em baixas frequências, portanto os dados de entrada para seleção do coxim deve levar em consideração materiais que tenham uma baixa rigidez em frequências maiores, assim grande parte das ondas mecânicas serão absorvidas pelos conxins.

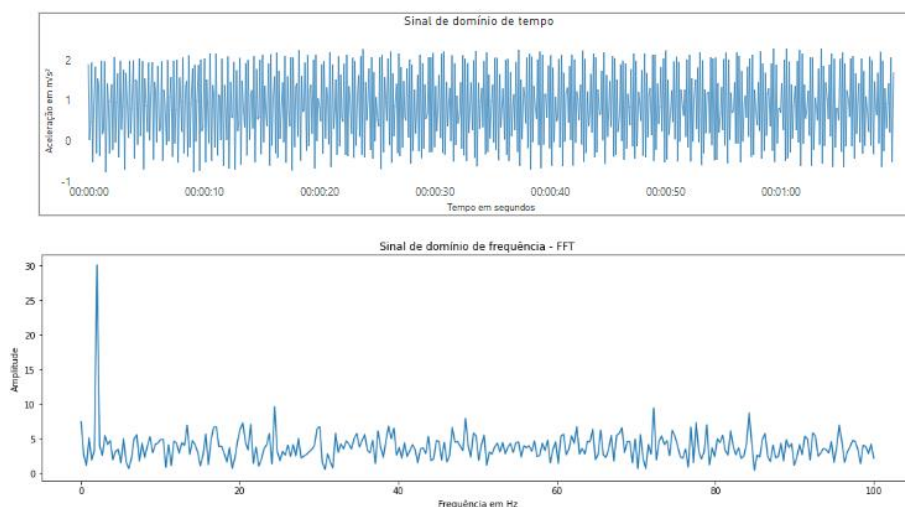


Figura 09 – Comparação entre sinal de vibração no domínio do tempo e domínio da frequência com o protótipo estático. Autoria própria.

3.1.1. Avaliação VCI dinâmica.

A Figura 10 representa o sinal da vibração em relação ao domínio do tempo e domínio da frequência. Em relação ao espectro da frequência, cujo objetivo é coletar informações para seleção dos coxins, podemos observar que o comportamento oscilatório da frequência é semelhante aos dados coletados com o veículo estático, portanto os critérios para seleção dos coxins podem permanecer os mesmos, onde deverão ser matérias com baixa rigidez em frequências menores.

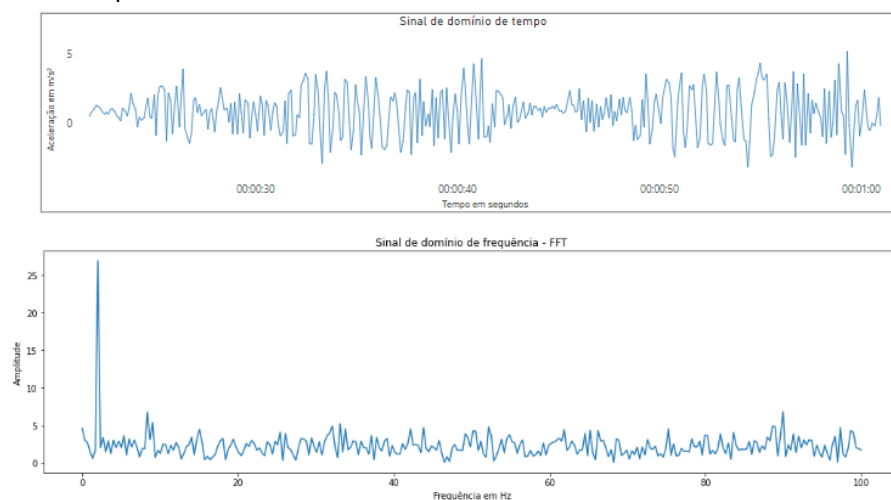


Figura 10 – Comparação entre sinal de vibração no domínio do tempo e domínio da frequência com o protótipo em velocidade de 40km/h. Autoria própria.

3.2. Análise do tempo de exposição e nível de desconforto para vibração do corpo inteiro(VCI).

Usando a Equação 2.1 para calcular a aceleração rms em cada componente axial, com isso podemos consultado o Gráfico A2 para as componentes a_x e a_y , e para a componente vertical a_z podemos consultar o Gráfico A1. A frequência analisada foi considerada a banda de frequência que mais se aproxima do limite prejudicial ao corpo humano, que para o corpo inteiro é frequência de 4 a 8Hz para o eixo z e de 1 a 2Hz para o eixo x e eixo y. A Tabela 06, apresenta o tempo máximo de exposição a aceleração rms para cada eixo, por segurança podemos considerar o menor tempo de exposição, pois assim garantimos que não ultrapassara nenhum tempo a mais do que o permitido com os níveis atuais de vibrações.

Para avaliação do conforto foi calculado a aceleração média resultante a_{mr} , seguindo a Equação 2.3. De acordo com a Tabela 02 podemos considerar para o fator de multiplicação $k = 1$, logo a aceleração média resultante para a condição em questão é $1,46 \text{ m/s}^2$. Ainda, de acordo com a escala de desconforto da norma ISO 2631-1:1997 pode considerar que para essa intensidade de vibração o protótipo e considerado muito desconfortável.

	<i>Aceleração RMS (m/s^2)</i>	<i>Faixa de Frequência analisada</i>	<i>Tempo limite de exposição</i>
Eixo x	0,63	2,5 – 3,15 Hz	2,5 horas
Eixo y	0,34	2 – 2,5 Hz	4,5 horas
Eixo z	1,27	8 – 10 Hz	1 hora

Tabela 06 –Tempo de exposição máximo a vibrações no veículo. Autoria própria

3.3. Avaliação da vibração em partes localizadas do corpo.

Para a avaliação localizada foi realizado uma adaptação, pois a norma ISO 4749 estabelece ponderações de frequência para a análise de exposição para mão e braço, para esse trabalho será feito uma generalização dessa metodologia para as partes individuais do corpo do piloto.

3.3.1. Da avaliação localizada com o protótipo estático.

	<i>Vibração MR (m/s^2)</i>	<i>Recomendação Técnica</i>	<i>Atenuação técnica</i>
Ante Braço	1,11	Acima do limite de exposição	Medidas corretivas imediatas
Abdomen	0,99	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas
Cabeça	1,01	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas
Canela	0,97	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas
Coluna	1,47	Acima do limite de exposição	Medidas corretivas imediatas
Ombro	0,96	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas
Torax	1,00	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas

Tabela 07 – Desconforto para partes localizadas do corpo com veículo estático. Autoria própria

3.3.2. Da avaliação localizada com o protótipo em velocidade de 40km/h.

	<i>Vibração MR (m/s^2)</i>	<i>Recomendação Técnica</i>	<i>Atenuação técnica</i>
Ante Braço	1,89	Acima do limite de exposição	Medidas corretivas imediatas
Abdomen	0,99	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas
Cabeça	1,02	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas.
Canela	1,05	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas
Coluna	1,64	Acima do limite de exposição	Medidas corretivas imediatas

Ombro	1,11	Acima do limite de exposição	Medidas corretivas imediatas
Torax	1,02	Região de incerteza	Medidas corretivas e preventivas

Tabela 08 – Desconforto para partes localizadas do corpo com veículo em movimento. Autoria própria

4. CONCLUSÃO

Para a frequência analisa no corpo inteiro com o veículo estático, foi observado que temos uma vibração de baixa frequência, por volta de 4 Hz. De acordo com a Tabela 1, essa faixa de frequência pode entrar em ressonância com o ombro, mão e braço, massa abdominal e perna dobrada, fenômeno que pode aumentar ainda mais os danos causados pela vibração no corpo. Com essa frequência de vibração e em acordo com a tabela 02, o usuário do carro pode apresentar alteração nos movimentos respiratórios, contrações musculares, dor abdominal e sensação geral de desconforto, o que justifica a reclamação dos pilotos da equipe de dores e fadigas em tais membros do corpo humano

Com o carro em movimento foram coletados os mesmos dados e pontos que foram analisados com ele estático. O pico de frequência continua próximo da frequência de vibração com ele estático, porém com uma frequência menos acentuado, mais para facilitar o entendimento e desconsiderar os ruídos da leitura do sinal, vamos considerar a frequência para o carro em movimento a mesma para o carro estático. Medidas devem ser tomadas para dissipar as ondas mecânicas e otimizar o conforto do piloto como um todo.

Considerando o estado atual de vibrações transmitidas ao piloto, devemos analisar o limite máximo de tempo para exposição a tal oscilação mecânica. Em acordo com a metodologia recomendada pela ISO 2631, foram coletadas as acelerações nos três eixos e julgado que para a aceleração do corpo inteiro do protótipo baja da equipe Cactus é muito desconfortável, logo medidas devem ser tomadas para atenuação dessa problemática.

Outro objetivo do trabalho era determinar e examinar os efeitos das vibrações em partes localizados do corpo humano, seguido a metodologia recomendada ISO 5349 e usando referência para julgamento e tomada de decisão a norma de higiene ocupacional (NHO 09).

Com a avaliação estática, podemos observar que para as partes do corpo como o ante braço e coluna lombar a NHO 09 considera como acima do limite de exposição, logo a atenuação técnica deve ser a correção imediata da vibração. Para as demais partes do corpo a intensidade de vibração é considerada como região de incerteza e medidas preventivas e corretivas devem ser empregadas no projeto.

Para a avaliação dinâmica, os resultados foram como o esperado, pois tiveram aumento da aceleração em partes que os pilotos reclamavam frequentemente, que eram no ante braço, coluna lombar e ombro, ambos estão acima do limite de exposição e medidas corretivas devem ser empregadas com uma certa urgência.

A título de conhecimento, foi realizado uma comparação entre a intensidade de aceleração com o baja estático e em movimento, os resultados estão apresentados na Tabela 08. Essa informação é de fundamental importância, pois podemos realizar a coxinzização em partes estratégicas do carro.

% de aumento de vibração (VCI) com veículo andando e parado	
Ante Braço	70 %
Abdomen	0 %
Cabeça	1 %
Canela	8 %
Coluna	12 %
Ombro	16 %
Torax	2 %

Tabela 08 – Comparação entre resposta de vibração com o carro estático e em movimento. Autoria própria

5. REFERÊNCIAS

- [1] Rao, S., *Vibrações Mecânicas*. 4ª edição, São Paulo: Prentice Hall, 2008.
- [2] Taylor, J., **The Vibration Analysis Handbook**. 2ª edição, Londres: Vibration Consultants, 2003.
- [3] XIMENES, G. M., **Gestão ocupacional da vibração no corpo humano**, aspectos técnicos e legais relacionados à saúde e segurança, 2006, Dissertação, Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense, disponível em <http://www.inmetro.gov.br/producao intelectual/obras_intelectuais/179_obraIntelectual.pdf>, acesso em Maio 2022.
- [4] ISO 2631, **Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration**, International Standard Organization, 1978.
- [5] WONG, J. Y. **Theory of Ground Vehicles**. 3 ed. USA: John Wiley and Sons, 2001.
- [6] SALIBA, T. M. **Curso Básico de Higiene Ocupacional**, 3. Ed. São Paulo: LTr, 2010.
- [7] Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR 09**, redação dada pela portaria nº 26 de 1994. Disponível em <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR9.pdf>>, acesso em maio 2022.
- [8] WILBER, C. A. et al. An Epidemiological analysis of overuse injuries among recreational cyclists. **Journal of Sports and Medicine**, v. 16, n. 3, p. 201-206, 1995.
- [9] BRUEL & KJAER, **Human Vibration**, 1988. Disponível em <<http://www.bksv.com>>, acesso em maio de 2022.
- [10] DUARTE, M. D. R. **Simulação de Ride Primário e Secundário Através do Uso de Carregamento de Pista**. São Paulo, 2010. 127f. Dissertação (Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP. 2010.
- [11] SENA, A.P.C. **Diagnóstico de Avarias em Transmissão por Engrenagens Baseado na Corrente do Motor de Indução e Entropia Wavelet**. 114f. Tese (Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, Brasil, 2015.
- [12] MATHIAS, M.H.; DA COSTA, C. 2008. **Análise de Vibrações Mecânica com FPGA**. Revista Saber Eletrônica, Vol. 429. Outubro 2008. il. color.
- [13] SILVA, B. T. V. DA. **Bancada Para Análise De Vibração: Análise de falhas em máquinas rotativas**. Taubaté, SP: [s.n], 2012.

7. Apêndice A1 (Não Obrigatório)

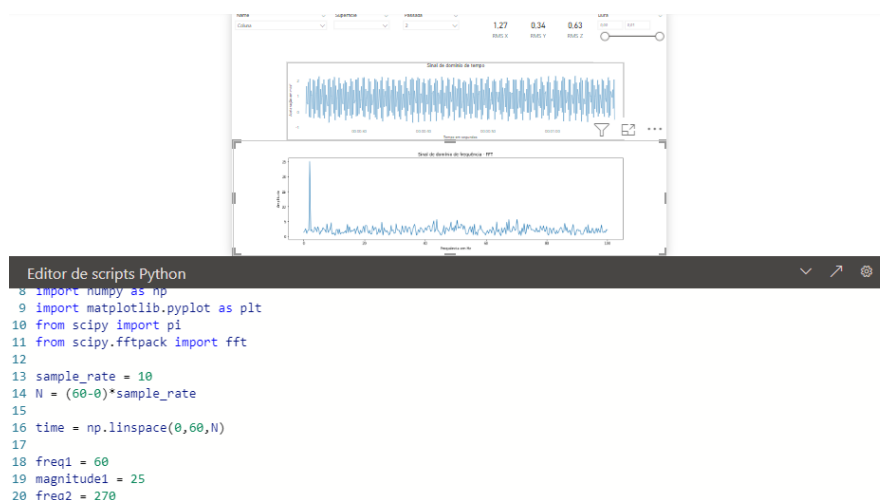


Figura A1 – Código em Python usado para transformar o sinal de vibração do domínio do tempo para o domínio da frequência. Autoria própria.