

Análise vibracional do banco do carro da equipe Baja SAE da EESC USP

Título em Inglês: tradução do título original

Ângela Alves Ferreira, Gabriel Gustavo Soares Santos
(santos.gabrielg@usp.br)

RESUMO

Esse projeto foi baseado nas opções fornecidas pelos docentes na matéria Laboratório de Projetos em Engenharia (1800318) fornecida pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e ministrada pelos professores Vilma Alves de Oliveira e Edson Gesualdo. A análise escolhida foi de vibrações do carro, para isso usou-se o EESC USP Baja SAE, o estudo será voltado para pensar no conforto do piloto. Para obtenção de melhores resultados, o estudo baseia-se na norma ISO 2631 que preocupa-se com o desgaste físico e mental que uma pessoa pode sofrer devido a exposição do seu corpo a determinadas frequências de vibrações, podendo causar redução de performance do piloto e até mesmo problemas de saúde. Para melhor eficiência dos resultados fizemos testes na oficina mecânica com o auxílio de acelerômetro e uma análise matemática com um software, entretanto não se chegou a resultados conclusivos.

Palavras chave: Laboratório. Vibrações. Baja. Conforto. Software.

1. INTRODUÇÃO

O Baja SAE é uma competição organizada pela Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE -Society of Automotive Engineers) que se baseia no design e construção de um pequeno veículo off road, ao qual se dá o nome de baja. Esta competição acontece entre estudantes de diferentes universidades, sendo que time representa sua própria universidade.

O sistema de pontos da competição leva em conta o projeto do veículo, incluindo projeto da dinâmica veicular, o comportamento do veículo a eventos dinâmicos, tais como aceleração, velocidade, comportamento na lama, etc., e o comportamento do carro em provas de resistência nas quais o carro pode permanecer em movimento durante várias horas.

Neste sentido, entender o comportamento dinâmico do veículo é fundamental para ganhar pontos no quesito projeto, além disso, como as provas de resistência podem durar horas é necessário que o carro forneça um bom conforto ao piloto para garantir que este consiga chegar ao final da prova em boas condições físicas.

Um dos principais fatores que influenciam no conforto do piloto são as vibrações transmitidas do veículo ao seu corpo, que podem causar até náuseas, sendo que uma das principais fontes de vibração em um veículo é o próprio motor.

Logo, este projeto tem como objetivos avaliar o conforto do piloto através da análise de vibrações oriundas do motor, e, se for o caso, propor melhorias no sistema de amortecimento de vibrações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A norma ISO 2631:78 aborda a exposição humana a vibrações e formula requisitos para a medição de vários tipos de vibração. Os resultados dessas medições são então analisados para fornecer informações para a avaliação do risco de efeitos adversos à saúde das placas vertebrais da coluna lombar para indivíduos sentados devido à compressão. Outras lesões podem se desenvolver mesmo quando não há lesão na placa final. Abaixo são apresentados os limites de vibração com amplitude e frequência para várias faixas de frequência e um tempo de exposição de 4 horas:

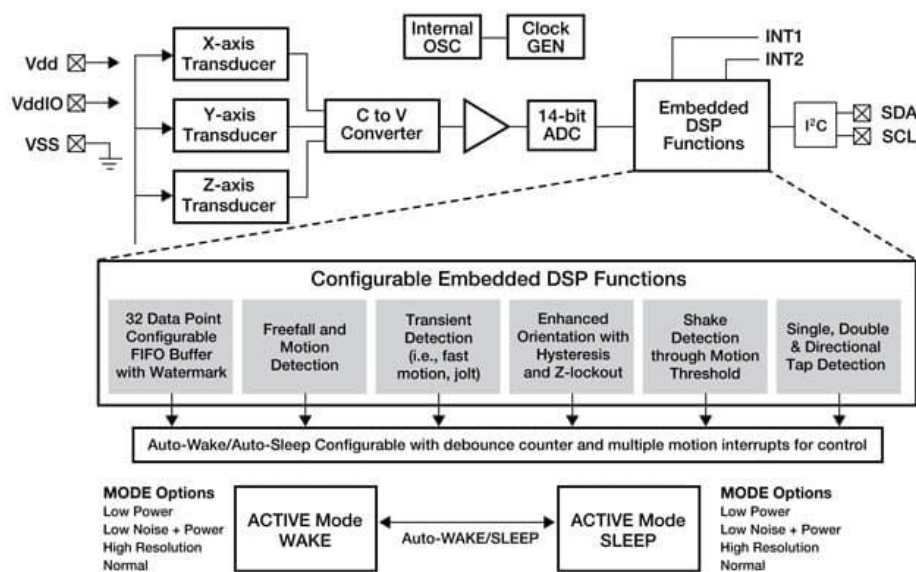
Tabela 1 – Limites de vibração definidos pela norma ISO 2631:78

| Limites de vibração longitudinal | | Limites de vibração transversal | |
|---|---------------|--|---------------|
| Frequência (Hz) | Amplitude(Gs) | Frequência (Hz) | Amplitude(Gs) |
| 1 | 0,10809 | 1 | 0,0362 |
| 2 | 0,076479 | 2 | 0,0362 |
| 4 | 0,054045 | 4 | 0,0724 |
| 5 | 0,054045 | 5 | 0,091775 |
| 8 | 0,054045 | 8 | 0,142761 |
| 10 | 0,068321 | 10 | 0,18355 |
| 16 | 0,10809 | 16 | 0,285522 |
| 25 | 0,173352 | 25 | 0,458874 |
| 40 | 0,270226 | 40 | 0,724001 |
| 50 | 0,341606 | 50 | 0,917748 |
| 63 | 0,433381 | 63 | 1,142086 |
| 80 | 0,540452 | 80 | 1,427608 |

Fonte: ISO 2631, 1978

A aquisição de dados é feita com o uso de acelerômetro multiaxial. Este tipo de dispositivo é capaz de medir forças de aceleração sendo que existem diversos modelos com diferentes princípios de funcionamento. Alguns adotam sensores piezoelétricos, outros trabalham medindo variações em valores de capacitância entre dois pequenos componentes. Abaixo é apresentado o diagrama de blocos do acelerômetro utilizado neste estudo:

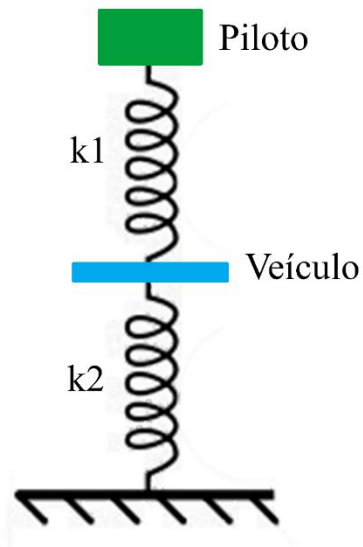
Figura 1 – Diagrama de blocos acelerômetro



A transformada rápida de Fourier é um algoritmo que calcula a transformada discreta de Fourier, que converte um sinal do seu domínio original para uma representação no domínio da frequência e vice-versa.

Existem vários modelos que descrevem o comportamento dinâmico de um veículo, como os modelos de full car, half car e quarter car, modelos muito utilizados no estudo do comportamento das suspensões automotivas. Entretanto, são modelos que não se aplicam ao objetivo deste estudo. Como o intuito deste é mensurar as vibrações oriundas do motor que chegam ao corpo do piloto foi desenvolvido um modelo próprio, que consiste em duas molas ligadas em série, sendo a inferior engastada, já que o carro se encontra parado, a interface entre estas representa o suporte do banco do piloto, e logo acima temos a mola que representa o corpo deste último com uma massa logo acima, massa que o representa. Abaixo este modelo é ilustrado:

Figura 2 – Modelo dinâmico

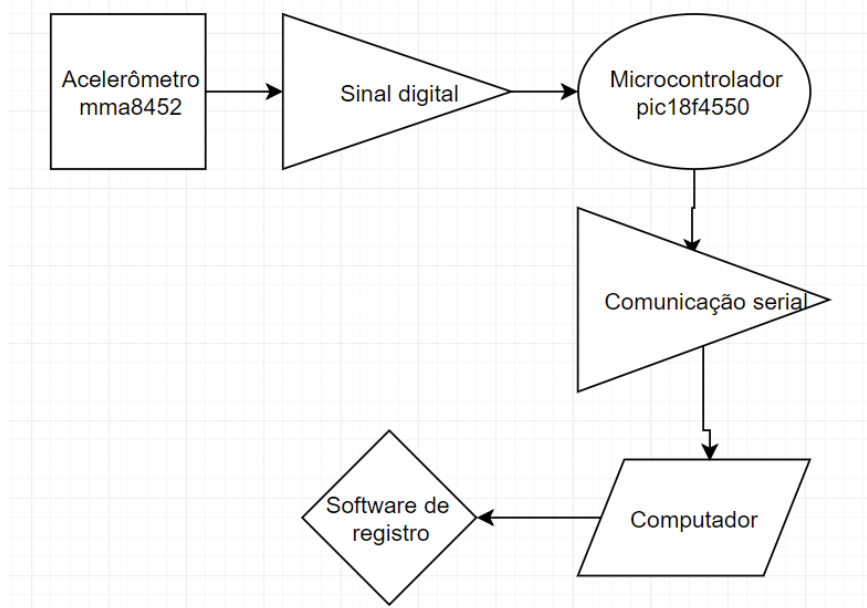


Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

3. MÉTODO

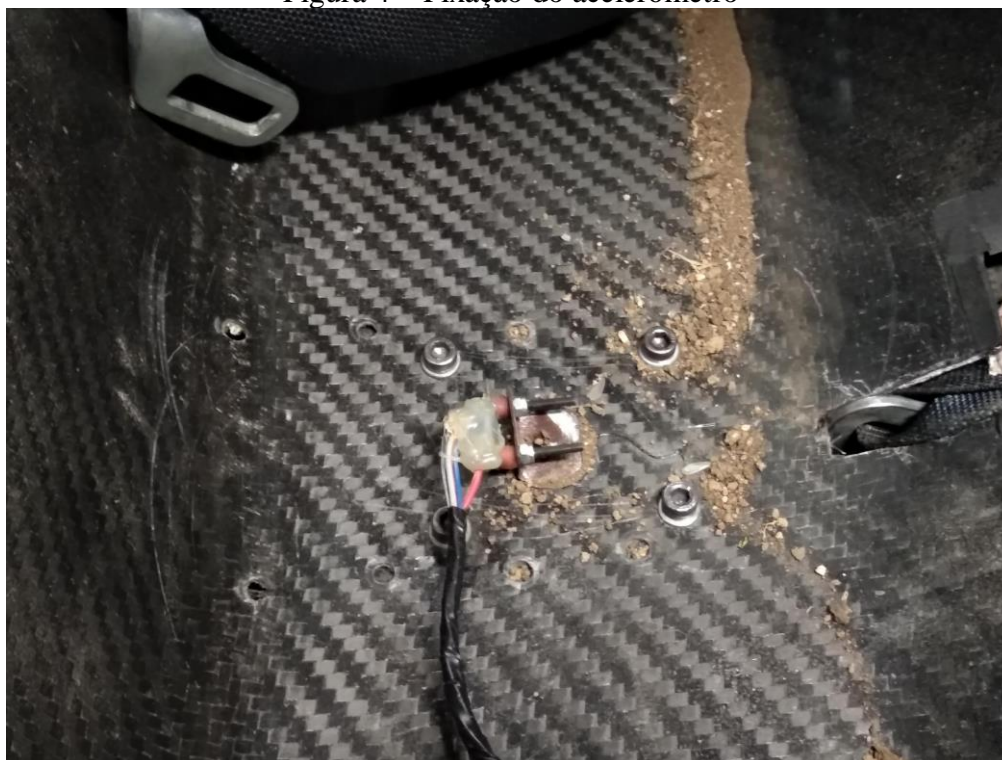
O ponto de partida deste estudo foi a aquisição de dados de aceleração que atuavam no banco do veículo. Esta aquisição foi feita por meio de equipamento construído com o acelerômetro digital mma8452, com a placa que usa o microcontrolador pic18f4550 e com o auxílio de um computador. A o microcontrolador pic18f4550 foi responsável por traduzir e transmitir os dados lidos pelo acelerômetro para o computador, este recebia os dados via porta serial e os armazenada em arquivo texto. A figura abaixo mostra um diagrama de blocos simplificado que representa o funcionamento do equipamento utilizado para a aquisição.

Figura 3 – Diagrama de blocos do equipamento de aquisição de dados



Após a preparação do equipamento o acelerômetro foi fixado no assento do piloto com o uso de cola epóxi e uma placa metálica rígida. A imagem abaixo mostra o acelerômetro fixado.

Figura 4 – Fixação do acelerômetro



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Com o equipamento pronto deu-se início a teste: o motor do veículo foi ligado e os dados foram adquiridos. Este procedimento foi feito duas vezes, sendo que na segunda usou-se uma maior largura de banda na porta serial a fim de aumentar a frequência de amostragem. A duração de ambos os testes foi cronometrada a fim de obter-se a frequência em que os dados foram adquiridos.

Após a aquisição os dados foram convertidos em uma planilha eletrônica. Criou-se um pequeno programa em linguagem Matlab para aplicar a Transformada Rápida de Fourier – FFT (Fast Fourier Transform) nos dados de aceleração e para obter a amplitude de vibração em função da frequência de vibração, bem como a frequência em que a amplitude era máxima.

Estes dados então foram comparados com os limites definidos pela norma ISO 2631

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para simplificar a importação no Matlab os dados brutos lidos através da porta serial, e armazenados em um arquivo de texto, foram convertidos em planilha eletrônica. A seguir criou-se o seguinte código em linguagem Matlab com o objetivo de obter-se os dados de amplitude e frequência de vibração. O código foi criado para já processar os dados dos dois testes que foram feitos, sendo que o primeiro teste teve uma duração de 2:16:80 minutos e o teste 2 uma duração total de 2:24:89 minutos.

O programa desenvolvido funciona da seguinte forma:

- Cálculo dos dados temporais dos testes
- Importação dos dados de aceleração relativos a cada eixo
- Aplicação da transformada rápida de Fourier
- Plotagem dos gráficos de aceleração x tempo para todos os casos
- Criação do espectro de frequência unilateral
- Plotagem dos dados de frequência e amplitude
- Busca e retorno dos picos de maior amplitude e a respectiva frequência

Abaixo é mostrado o código usado para processar os dados obtidos nos testes:

```

close all;
clear;
clc;

%aquisição de dados

%dados temporais
%Teste2:
Fs_t2 = 28393/(2*60+24.89);           % Frequência da amostra
T_t2 = 1/Fs_t2;                       % Período da amostra
L_t2 = 28393;                         % Comprimento do sinal
t_t2 = (0:L_t2-1)*T_t2;               % Vetor temporal

%Teste1:
Fs_t1 = 23420/(2*60+16.8);
T_t1 = 1/Fs_t1;
L_t1 = 23420;
t_t1 = (0:L_t1-1)*T_t1;

%importa os dados acelerômetro de uma planilha do excel
t2_x = xlsread('t2.xlsx','B1:B28393');
t1_x = xlsread('t1.xlsx','B1:B23420');

t2_y = xlsread('t2.xlsx','C1:C28393');
t1_y = xlsread('t1.xlsx','C1:C23420');

t2_z = xlsread('t2.xlsx','D1:D28393');
t1_z = xlsread('t1.xlsx','D1:D23420');

%fft
t2_x_fft = fft(t2_x);
t2_y_fft = fft(t2_y);
t2_z_fft = fft(t2_z);

t1_x_fft = fft(t1_x);
t1_y_fft = fft(t1_y);
t1_z_fft = fft(t1_z);

%Cálculo dos limites do gráfico de aceleração
maxAcel_2 = max (t2_x);
if maxAcel_2 < max (t2_y)
    maxAcel_2 = max (t2_y);
elseif maxAcel_2 < max (t2_z)
    maxAcel_2 = max (t2_z);
end

minAcel_2 = min (t2_x);
if minAcel_2 > min (t2_y)
    minAcel_2 = min (t2_y);
elseif minAcel_2 > min (t2_z)
    minAcel_2 = min (t2_z);
end

if (ceil (maxAcel_2) <= (-floor (minAcel_2)))
    limAcel_2 = -floor (minAcel_2)+0.2;
else
    limAcel_2 = ceil(maxAcel_2)+0.2;

```

```

end

%Plotagem aceleração
%teste 2
figure(1)
plot(t_t2,t2_x)
axis([50 140 -limAcel_2 limAcel_2])
title('Teste 2: Aceleração Eixo X')
xlabel('t (segundos)')
ylabel('Gs')

figure(2)
plot(t_t2,t2_y)
title('Teste 2: Aceleração Eixo Y')
axis([50 140 -limAcel_2 limAcel_2])
xlabel('t (segundos)')
ylabel('Gs')

figure(3)
plot(t_t2,t2_z)
title('Teste 2: Aceleração Eixo Z')
axis([50 140 -limAcel_2 limAcel_2])
xlabel('t (segundos)')
ylabel('Gs')

%teste 1
figure(4)
plot(t_t1,t1_x)
axis([50 140 -limAcel_2 limAcel_2])
title('Teste 1: Aceleração Eixo X')
xlabel('t (segundos)')
ylabel('Gs')

figure(5)
plot(t_t1,t1_y)
axis([50 140 -limAcel_2 limAcel_2])
title('Teste 1: Aceleração Eixo Y')
xlabel('t (segundos)')
ylabel('Gs')

figure(6)
plot(t_t1,t1_z)
axis([50 140 -limAcel_2 limAcel_2])
title('Teste 1: Aceleração Eixo Z')
xlabel('t (segundos)')
ylabel('Gs')

%Computando o espectro bilateral
%teste2
P2_t2_x = abs(t2_x_fft/L_t2);
P1_t2_x = P2_t2_x(1:L_t2/2+1);
P1_t2_x(2:end-1) = 2*P1_t2_x(2:end-1);

P2_t2_y = abs(t2_y_fft/L_t2);
P1_t2_y = P2_t2_y(1:L_t2/2+1);
P1_t2_y(2:end-1) = 2*P1_t2_y(2:end-1);

```



```

P2_t2_z = abs(t2_z_fft/L_t2);
P1_t2_z = P2_t2_z(1:L_t2/2+1);
P1_t2_z(2:end-1) = 2*P1_t2_z(2:end-1);

%teste1
P2_t1_x = abs(t1_x_fft/L_t1);
P1_t1_x = P2_t1_x(1:L_t1/2+1);
P1_t1_x(2:end-1) = 2*P1_t1_x(2:end-1);

P2_t1_y = abs(t1_y_fft/L_t1);
P1_t1_y = P2_t1_y(1:L_t1/2+1);
P1_t1_y(2:end-1) = 2*P1_t1_y(2:end-1);

P2_t1_z = abs(t1_z_fft/L_t1);
P1_t1_z = P2_t1_z(1:L_t1/2+1);
P1_t1_z(2:end-1) = 2*P1_t1_z(2:end-1);

%definindo o domínio de frequência
f_t2 = Fs_t2*(0:(L_t2/2))/L_t2;
f_t1 = Fs_t1*(0:(L_t1/2))/L_t1;

%limpando o primeiro valor das frequências (w=0)
P1_t2_x(1,1) = 0;
P1_t2_y(1,1) = 0;
P1_t2_z(1,1) = 0;

P1_t1_x(1,1) = 0;
P1_t1_y(1,1) = 0;
P1_t1_z(1,1) = 0;

%Calculo dos limites do gráfico do espectro de amplitude
maxEsp_2 = max(P1_t2_x);
if maxEsp_2 < max(P1_t2_y)
    maxEsp_2 = max(P1_t2_y);
elseif maxEsp_2 < max(P1_t2_z)
    maxEsp_2 = max(P1_t2_z);
end

minEsp_2 = min(P1_t2_x);
if minEsp_2 > min(P1_t2_y)
    minEsp_2 = min(P1_t2_y);
elseif minEsp_2 > min(P1_t2_z)
    minEsp_2 = min(P1_t2_z);
end

if (maxEsp_2 <= -minEsp_2)
    limEsp_2 = minEsp_2+0.02;
else
    limEsp_2 = maxEsp_2+0.02;
end

mFreq_2 = max(f_t2);

```

```

%plotando o espectro de amplitude unilateral
%teste2
figure(7)
plot(f_t2,P1_t2_x)
axis([0 mFreq_2 0 limEsp_2])
title('Teste 2: Espectro de Amplitude unilateral - Eixo X')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|Gs|')

figure(8)
plot(f_t2,P1_t2_y)
axis([0 mFreq_2 0 limEsp_2])
title('Teste 2: Espectro de Amplitude unilateral - Eixo Y')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|Gs|')

figure(9)
plot(f_t2,P1_t2_z)
axis([0 mFreq_2 0 limEsp_2])
title('Teste 2: Espectro de Amplitude unilateral - Eixo Z')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|Gs|')

%testel,
figure(10)
plot(f_t1,P1_t1_x)
axis([0 mFreq_2 0 limEsp_2])
title('Teste 1: Espectro de Amplitude unilateral - Eixo X')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|Gs|')

figure(11)
plot(f_t1,P1_t1_y)
axis([0 mFreq_2 0 limEsp_2])
title('Teste 1: Espectro de Amplitude unilateral - Eixo Y')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|Gs|')

figure(12)
plot(f_t1,P1_t1_z)
axis([0 mFreq_2 0 limEsp_2])
title('Teste 1: Espectro de Amplitude unilateral - Eixo Z')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|Gs|')

%Obtenção da frequência e amplitude máximas

%Teste2:
%Eixo X
[ampl,M] = max(P1_t2_x);
ampl_2X = ampl;
freqMax_2X = f_t2(1,M);

%Eixo Y
[ampl,M] = max(P1_t2_y);
ampl_2Y = ampl;

```

```

freqMax_2Y = f_t2(1,M);

%Eixo Z
[ampl,M] = max(P1_t2_z);
ampl_2Z = ampl;
freqMax_2Z = f_t2(1,M);

%Teste1:
%Eixo X
[ampl,M] = max(P1_t1_x);
ampl_1X = ampl;
freqMax_1X = f_t1(1,M);

%Eixo Y
[ampl,M] = max(P1_t1_y);
ampl_1Y = ampl;
freqMax_1Y = f_t1(1,M);

%Eixo Z
[ampl,M] = max(P1_t1_z);
ampl_1Z = ampl;
freqMax_1Z = f_t1(1,M);

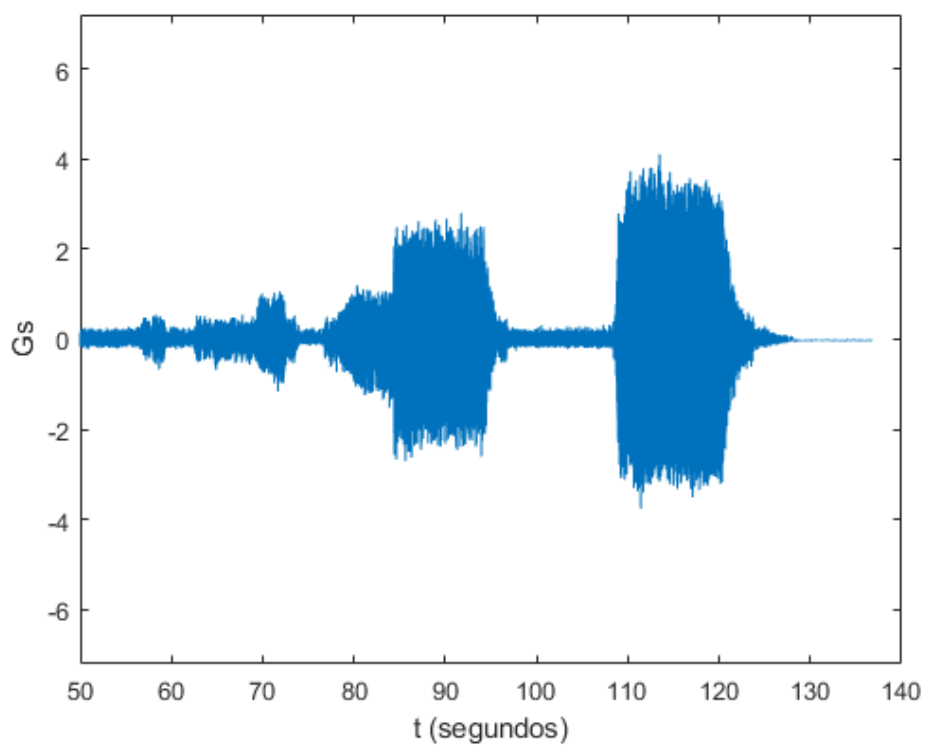
%Condensa os dados em um array para facilitar a leitura
AmplFreq = ["Eixo" "Frequencia" "Amplitude"; " " "Teste 2" " " ;
            "X2" freqMax_2X ampl_2X ; "Y2" freqMax_2Y ampl_2Y ; "Z2" freqMax_2Z
            ampl_2Z;
            " " "Teste 1" " " ;
            "X1" freqMax_1X ampl_1X ; "Y1" freqMax_1Y ampl_1Y ; "Z1" freqMax_1Z
            ampl_1Z];

```

Após executar o programa pudemos visualizar graficamente dados de aceleração lidos, e de frequência e amplitude de vibração. Abaixo são apresentados os gráficos de aceleração lida em função do tempo, posteriormente são apresentados os de frequência de vibração e amplitude.

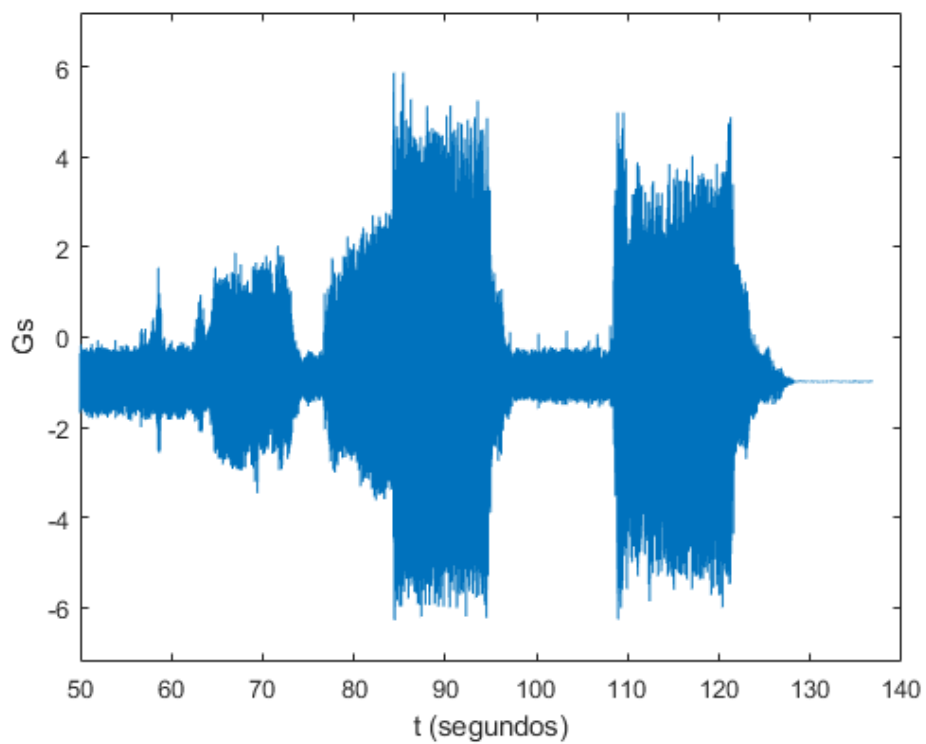
Quanto a aceleração tivemos no teste 1:

Gráfico 1 - Teste 1: Aceleração no eixo longitudinal



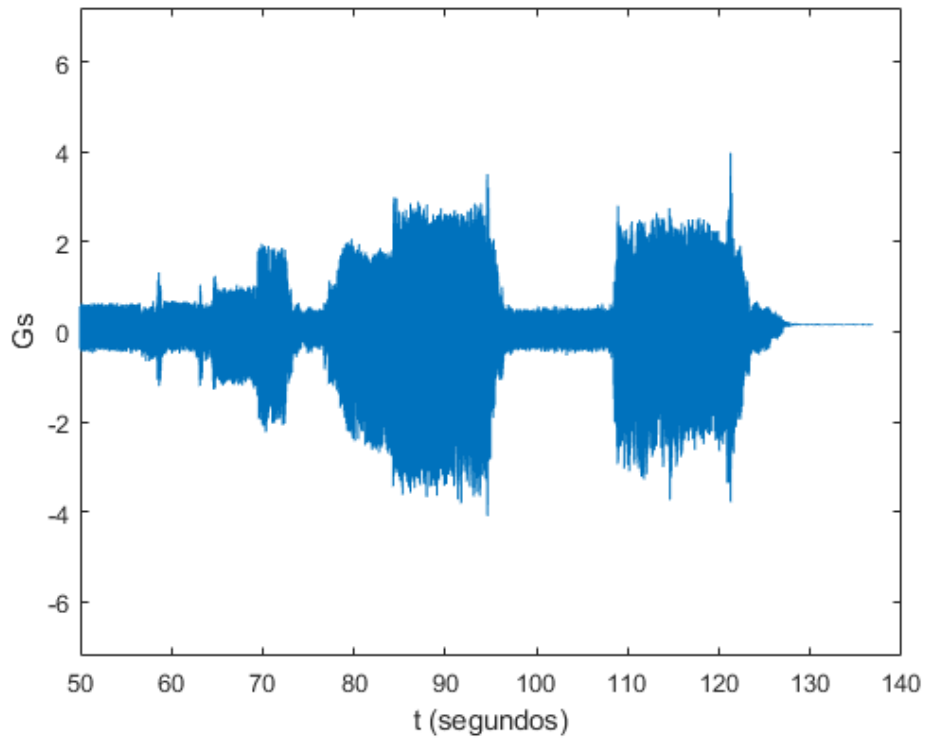
Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Gráfico 2 - Teste 1: Aceleração no eixo transversal



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

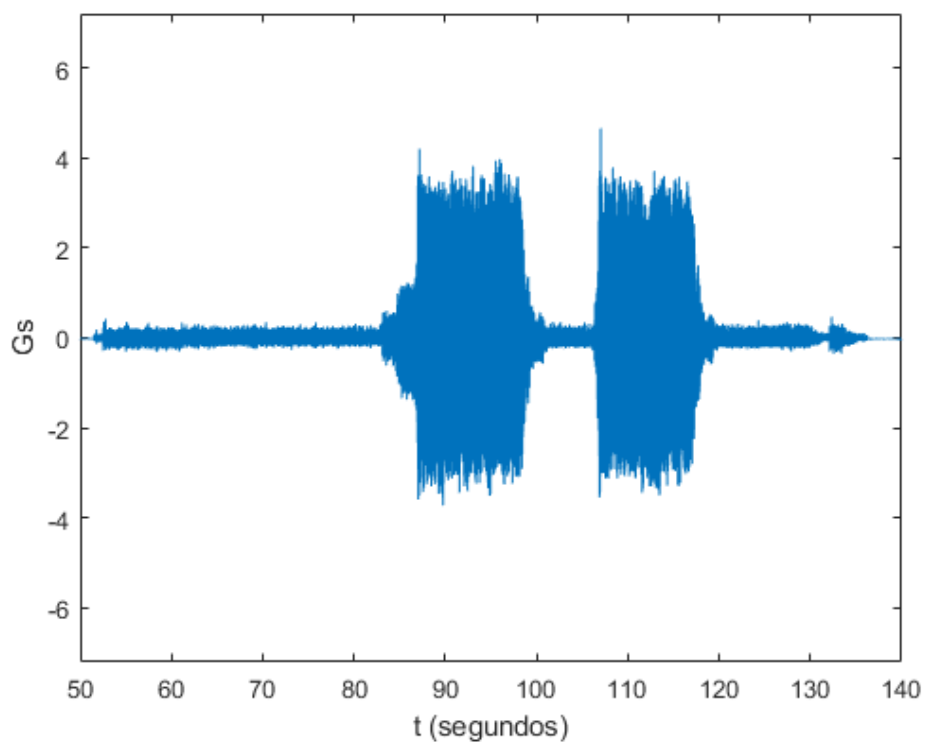
Gráfico 3 - Teste 1: Aceleração no eixo vertical



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

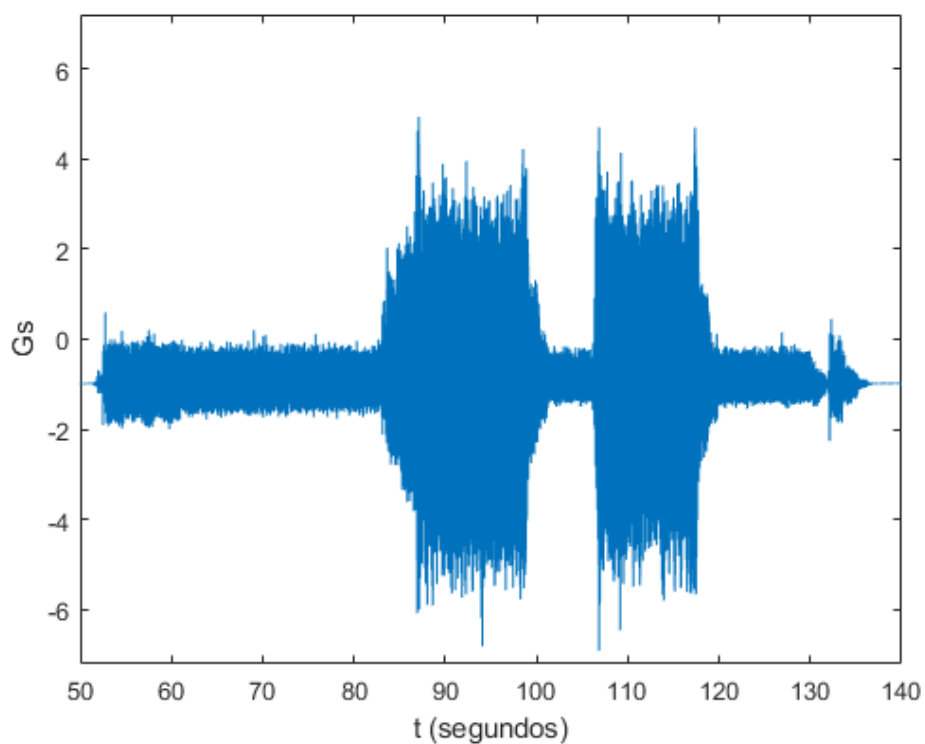
Vemos que dentre a aceleração se mostrou mais crítica no eixo transversal, chegando a quase 6 Gs. O teste 2 apresentou algo semelhante, como pode ser visto nos gráficos abaixo:

Gráfico 4 - Teste 2: Aceleração no eixo longitudinal



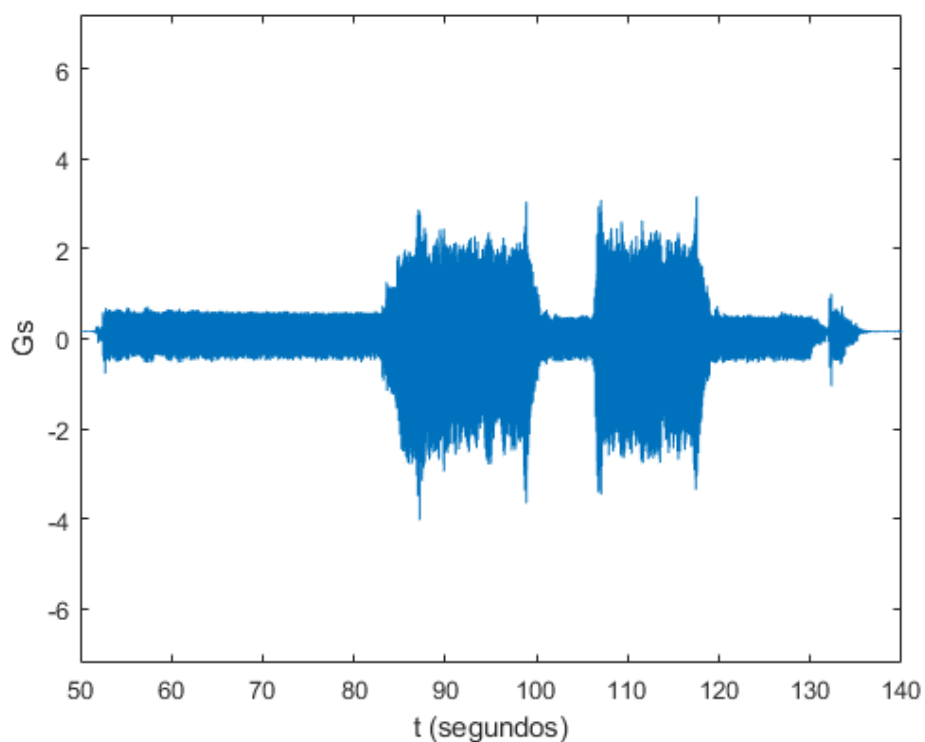
Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Gráfico 5 - Teste 2: Aceleração no eixo transversal



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

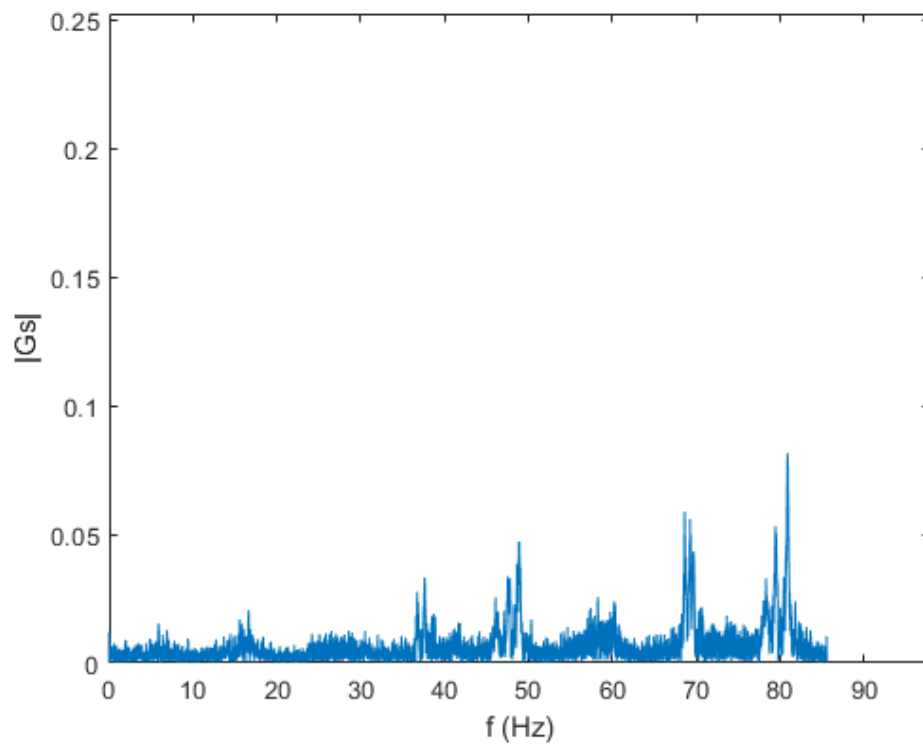
Gráfico 6 - Teste 2: Aceleração no eixo vertical



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

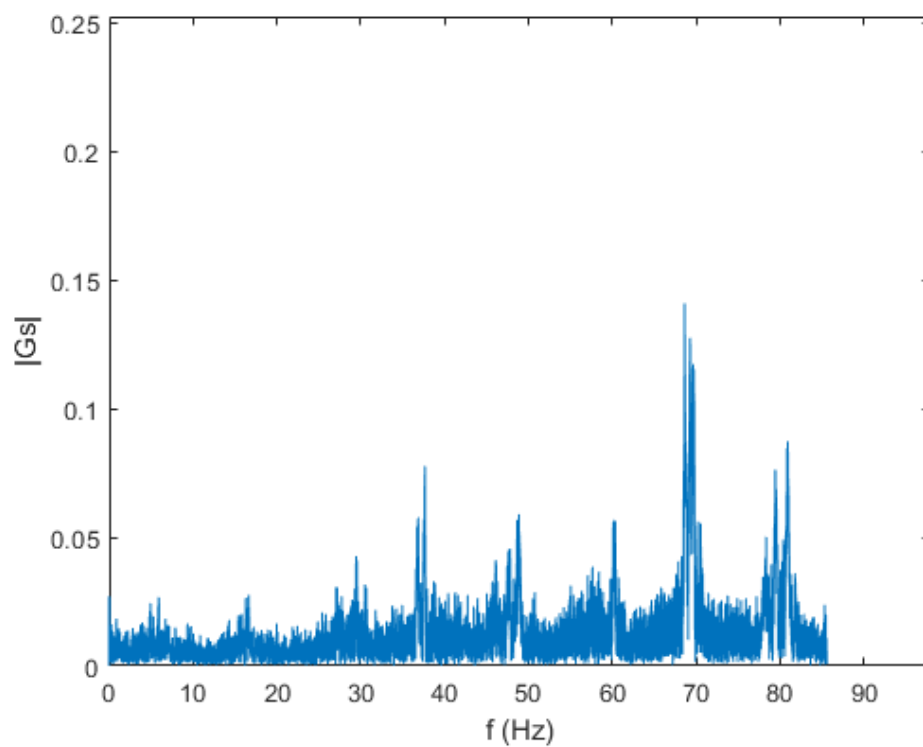
Vemos que tivemos picos de aceleração no eixo transversal, além disso, o eixo vertical foi o que apresentou menores acelerações. Isto já permite pressupor que as maiores amplitudes ocorrerão no eixo Y, suposição que se confirmou, conforme pode ser verificado nos gráficos de amplitude x frequência apresentados abaixo, primeiro para o teste 1 e depois para o teste 2:

Gráfico 7 – Teste 1: Espectro de frequência unilateral – Eixo longitudinal



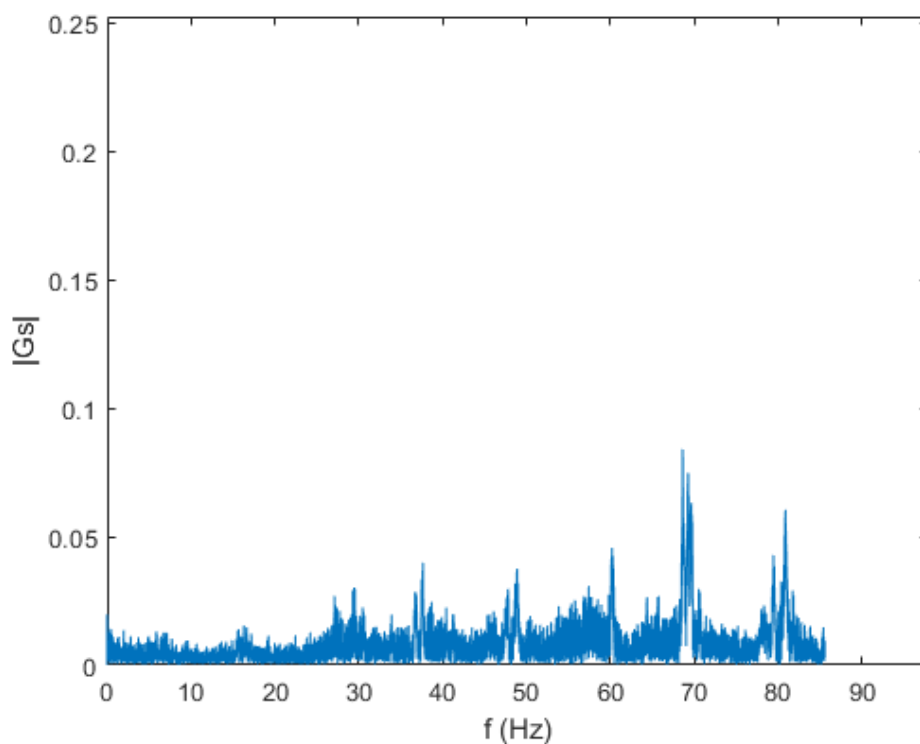
Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Gráfico 8 - Teste 1: Espectro de frequência unilateral – Eixo transversal



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Gráfico 9 - Teste 1: Espectro de frequência unilateral – Eixo vertical

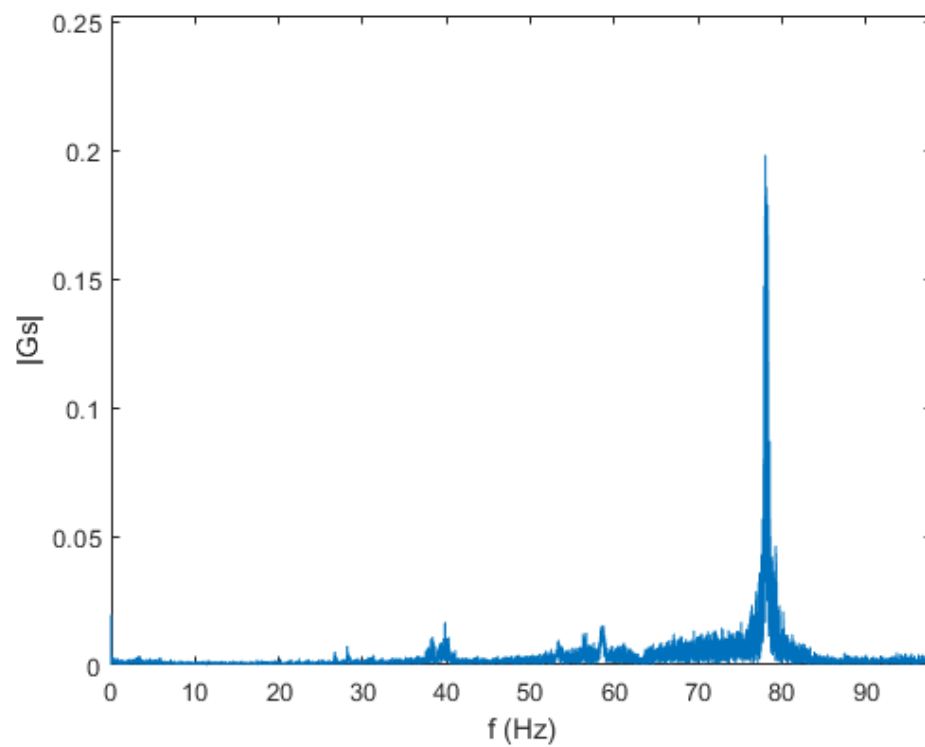


Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Como foi previsto a amplitude no eixo transversal foi a maior, sendo que nos eixos vertical e Y tivemos um pico em uma frequência próxima a 70 Hz, já no eixo longitudinal o maior pico ficou próximo aos 80 Hz.

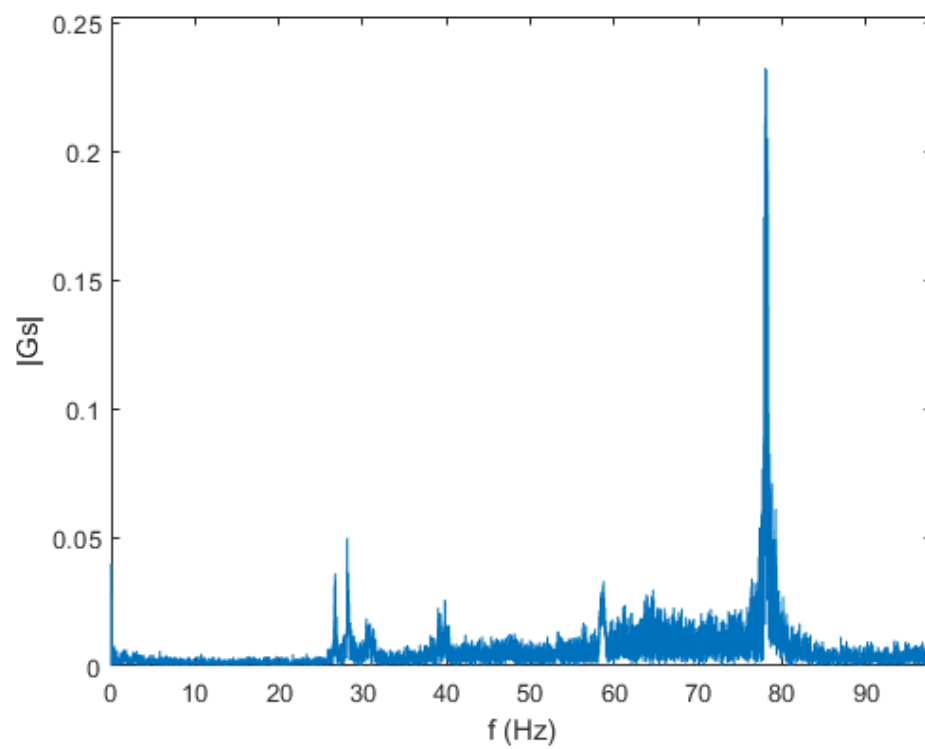
Já no segundo teste tivemos picos de maior amplitude, e todos próximos um pouco menores que 80 Hz, conforme pode ser visto abaixo:

Gráfico 10 - Teste 2: Espectro de frequência unilateral – Eixo longitudinal



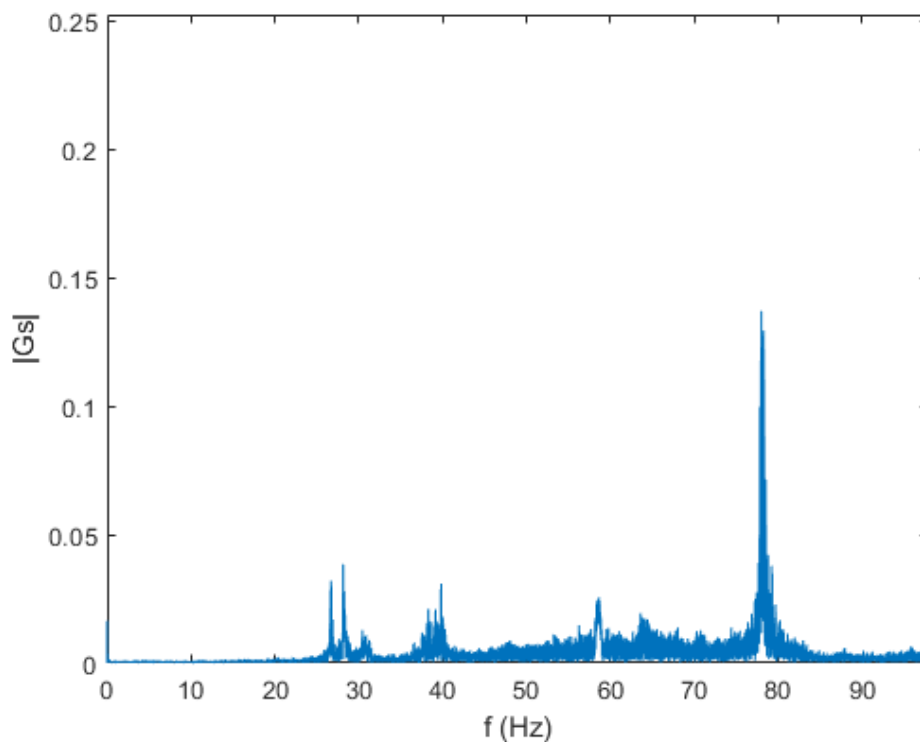
Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Gráfico 11 - Teste 2: Espectro de frequência unilateral – Eixo transversal



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Gráfico 12 - Teste 2: Espectro de frequência unilateral – Eixo vertical



Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

Percebe-se também que o sinal possui menos ruído, apresentando picos mais claros. Acredita-se que isto tenha acontecido por termos aumentado a taxa de transmissão de dados do teste 1 para o teste 2, o que possibilitou uma leitura de um espectro de frequências mais amplo e preciso.

Por fim, bastou ler os dados de máxima frequência e amplitude:

Tabela 2 – Amplitudes máximas teste 2

| Eixo | Frequência (Hz) | Amplitude (Gs) |
|--------------|------------------------|-----------------------|
| Longitudinal | 78,03 | 0,19831 |
| Transversal | 78,03 | 0,23255 |
| Vertical | 78,03 | 0,13716 |

Tabela 3 – Amplitudes máximas teste 1

| Eixo | Frequência (Hz) | Amplitude (Gs) |
|--------------|------------------------|-----------------------|
| Longitudinal | 80,91 | 0,08151 |
| Transversal | 68,63 | 0,14099 |
| Vertical | 68,63 | 0,07404 |

Como o teste 2 teve menos ruído devemos desprezar os valores do teste 1.

Entretanto, toda essa coleta de dados foi feita antes de definir de maneira correta o modelo dinâmico, além disso o teste foi feito sem uma massa que representasse o piloto sentado no banco, logo, estes resultados de amplitude e frequência não representam as reais vibrações que chegam ao corpo do piloto, já que seu peso irá reduzir a frequência e alterar a amplitude.

Portanto, não faz sentido comparar estes valores com os limites definidos pela norma ISO 2631, já que estes limites variam conforme a frequência e não há um meio de prever qual será a mudança na frequência de vibração que a massa do piloto causará.

O ideal seria ter adquirido mais dados, com o piloto presente, entretanto isto não foi possível devido a impossibilidade de ter acesso ao carro em estudo em função dos trabalhos da equipe do baja.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise vibracional é uma importante ferramenta de análise ergonômica, sendo fundamental para poder mensurar o conforto do piloto.

Os dados de frequência e amplitude levantados não condizem com a real situação de utilização, e isto se deu por uma falha na aplicação da metodologia e por uma incompatibilidade de cronogramas, já que a equipe baja não pôde disponibilizar o carro para uma segunda bateria de testes. Logo, não se pôde completar o estudo devido à falta de dados.

Observou-se que frequências de aquisição mais altas resultaram em menos ruído.

Durante a disciplinas conheceu-se e utilizou-se importantes ferramentas, como o matlab, por exemplo.

REFERÊNCIAS

Norma ISO 2631 - <http://www.feb.unesp.br/jcandido/vib/iso2631.doc>