

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

HÉLIDA HELENA DE SOUZA

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA DOS PARÂMETROS DO VOLANTE DE UM
CAVALO MECÂNICO PARA CONFORTO E SEGURANÇA DO MOTORISTA EM
DINÂMICA VERTICAL**

São Leopoldo

2018

HÉLIDA HELENA DE SOUZA

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA DOS PARÂMETROS DO VOLANTE DE UM
CAVALO MECÂNICO PARA CONFORTO E SEGURANÇA DO MOTORISTA EM
DINÂMICA VERTICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, pelo Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Luís Roberto Centeno Drehmer

São Leopoldo

2018

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, Fabricio, Lisete e José de Souza, pelo grande incentivo aos estudos desde o princípio de minha vida escolar e compreensão em relação aos momentos de ausência, devido à dedicação necessária para a realização deste trabalho.

Ao meu namorado e colega, Matheus Brito Daltoé, pelo incentivo, auxílio, paciência, e participação em todas as etapas desse trabalho (da concepção da ideia a análise dos resultados).

Aos professores Rodrigo Marques de Figueiredo e Leonel Augusto Calliari, pela grande disponibilidade e apoio nas áreas de Eletrônica e Metrologia. E ao meu professor orientador Luís Roberto Centeno Drehmer, pela atenção, incentivo e comprometimento para com o sucesso desse trabalho.

RESUMO

Este trabalho aborda a otimização de parâmetros do volante do sistema de direção de um cavalo mecânico, com o objetivo de reduzir as vibrações no mesmo, para aumentar o conforto e a segurança do motorista. Para isso, uma coleta de dados dos efeitos de exposição prolongada a vibrações em diferentes velocidades é realizada em campo, e, subsequentemente, a otimização dos parâmetros é feita por meio do algoritmo heurístico genético com o intuito de orientar um projeto de melhoria a posteriori. Utiliza-se nesta coleta de dados, um acelerômetro, o qual atende os parâmetros de medição descritos na NHO 10 (2013), norma essa que estabelece critérios e procedimentos para avaliação da exposição ocupacional a vibrações em mãos e braços tendo como principal foco a prevenção de doenças ocupacionais, de queda de produtividade, e auxílio na redução dos riscos de acidentes. A utilização da NHO 10 (2013), como guia para o processo de medição, se deve ao fato de ela ser a norma de referência utilizada para a elaboração do anexo VII (destinado a vibrações) da Norma Regulamentadora 15 – Atividades e Operações Insalubres (NR 15, 2014), vigente no Brasil. Um modelo analítico e numérico de dez graus de liberdade (10-GDL) é desenvolvido para servir de base ao processo de otimização por algoritmos genéticos. Neste modelo numérico, os dados experimentais medidos em campo são inseridos como fonte de excitação do sistema, e a otimização fornece, matematicamente, os valores das variáveis de projeto de um possível volante a ser projetado em trabalhos futuros. Os resultados obtidos indicam uma melhoria de 63% para reduzir os efeitos da aceleração vertical RMS transmitida ao punho do motorista.

Palavras-chave: Vibrações. Volante de direção. Otimização. Conforto e segurança. Cavalo mecânico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Algoritmo linear	22
Figura 2 – Algoritmo genético.....	24
Figura 3 – MPU-6050	26
Figura 4 – MPU-6050 detalhes do produto	26
Figura 5 – Modelo de funcionamento do MPU-6050	27
Figura 6 – Frequência e sensibilidade do corpo humano	32
Figura 7 – Fluxograma da metodologia.....	34
Figura 8 – Modelagem cavalo mecânico.....	35
Figura 9 – Matriz de rigidez.....	37
Figura 10 – Matriz de massa.....	37
Figura 11 – Matriz de amortecimento.....	37
Figura 12 – Ligação entre o Arduino e o acelerômetro	39
Figura 13 – Pseudocódigo do método de <i>Newmark</i>	53
Figura 14 – Fluxograma de análise	57
Figura 15 – Fluxograma de otimização	58
Figura 16 – Gráficos da fonte de excitação experimental	63
Figura 17 – Gráficos da fonte de excitação ISO-8606 (2016)	64
Figura 18 – Gráficos de deslocamento vertical no volante.....	65
Figura 19 – Gráficos de deslocamento vertical suporte e barra do volante.....	66
Figura 20 – Gráficos de deslocamento vertical cabine e chassi.....	67
Figura 21 – Gráficos de deslocamento vertical suspensões dianteira e traseira.....	68
Figura 22 – Gráficos da aceleração vertical no volante.....	69
Figura 23 – Gráficos da aceleração vertical suporte e barra do volante	70
Figura 24 – Gráficos da aceleração vertical cabine e chassi.....	71
Figura 25 – Gráficos da aceleração vertical suspensões dianteira e traseira.....	72
Figura 26 – Gráficos da arfagem θ na cabine e no chassi	73

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Materiais utilizados.....	39
Fotografia 2 – Solda do acelerômetro	40
Fotografia 3 – <i>Shaker Ets Solutions</i>	41
Fotografia 4 – Fixações dos acelerômetros no <i>Shaker</i>	42
Fotografia 5 – Eixo z	42
Fotografia 6 – Fixação do acelerômetro.....	44
Fotografia 7 – Local de fixação do acelerômetro.....	45
Fotografia 8 – Pista de testes (coleta de dados preliminar)	46
Fotografia 9 – Pista de testes (coleta de dados estudo de caso).....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ilustração de possível erro	43
Gráfico 2 – Validação do sistema de medição	44
Gráfico 3 – Influência das variáveis de projeto no valor médio do ponto ótimo global (amostra 6)	76
Gráfico 4 – Comparativo, amostra 6 e 12 (otimizado)	77
Gráfico 5 – Influência das variáveis de projeto no valor médio do ponto ótimo global (amostra 12)	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação aren	21
Quadro 2 – Algoritmos Meta-heurísticos	23
Quadro 3 – Pseudocódigo.....	25
Quadro 4 – Dados de entrada no MATLAB.....	55
Quadro 5 – Resultados análise, amostra 6 (otimizado).....	74
Quadro 6 – Resultados análise, amostra 12 (otimizado).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acelerações RMS ensaio preliminar.....	48
Tabela 2 – Acelerações RMS ensaio do estudo de caso	49
Tabela 3 – <i>arms</i> para cálculo de erro relativo	74
Tabela 4 – Acelerações RMS (não otimizadas)	80
Tabela 5 – Acelerações RMS (otimizadas)	82

LISTA DE SIMBOLOS

$amep_{ij}$	Aceleração Média de Exposição Parcial
s	Número de Amostras da Componente de Exposição i que Foram Mensuradas
am_{ijk}	Aceleração Média Relativa à k -ésima Amostra Seleccionada Dentre as Repetições da Componente de Exposição i no Eixo de Direção j
$arep_i$	Aceleração Resultante de Exposição Parcial
are	Aceleração Resultante de Exposição
T	Tempo de Duração da Jornada Diária de Trabalho
n	Número de Componentes de Exposição que Compõe a Exposição Diária
n_i	Número de Repetições da Componente de Exposição i ao Longo da Jornada de Trabalho
T_i	Tempo de Duração da Componente de Exposição i
aren	Aceleração Resultante de Exposição Normalizada
T_0	8 horas ou 480 minutos
a_{RMS}	Aceleração RMS
Δx	Diferença de Posição
x_f	Posição Inicial
x_m	Posição Final
N	Normal
R	Retangular
T	Triangular
U	Incerteza de Medição Expandida
a	Valor da Base do Retângulo
U_c	Incerteza de Padrão Combinada
K	Fator de Cobertura
v_n	Graus de Liberdade
m	Massa
k	Rigidez
c	Amortecimento
t	Tempo

Δt	Intervalo de Tempo
x_{i+1}	Deslocamento
\dot{x}_{i+1}	Velocidade
f_{obj}	Função Objetivo
x_{opt}	x Ótimo
v	Velocidade Longitudinal do Veículo
M_t	Massa Total do Cavalo
I	Momento de Inércia
w_{base}	Distância Entre Eixos do Cavalo Mecânico
t_{def}	Defasagem Entre Eixos
F_g	Vetor Força de Gravidade
U_g	Deslocamento estático inicial
$\sigma_{f_{obj}}$	Desvio Padrão da Função Objetivo
$\mu_{f_{obj}}$	Média da Função Objetivo Avaliada
$\dot{I}_{máx}$	Número Máximo de Iterações
f_{obj}^{i+1}	Função Objetivo Avaliada na $i+1$ ésima Iteração
f_{obj}^i	Função Objetivo Avaliada na i -ésima Iteração
E_R	Erro Relativo
V_V	Valor Verdadeiro
V_A	Valor Aproximado
GA	Algoritmo Genético
x_i	Vetor das Variáveis de Projeto

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIT	<i>Binary Digit</i>
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
CV	Coeficiente de Variação
DAS	<i>Serial Data Line</i>
DORT	Distúrbios Osteomusculares Relacionados com o Trabalho
FUNDACENTRO	Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho
GDL	Graus de Liberdade
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty</i>
Hz	Hertz
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LER	Lesões por Esforços Repetitivos
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NHO	Normas de Higiene Ocupacional
NR	Norma Regulamentadora
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VBM	Vibrações de Mãos e Braços
VCI	Vibrações de Corpo Inteiro
Veff	grau de liberdade efetivo
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Tema	16
1.2 Delimitação do Tema	16
1.3 Problema	16
1.4 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo Geral	17
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 Justificativa	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Norma de Higiene Ocupacional 10 (2013)	19
2.2 Algoritmos de Otimização	21
2.3 Instrumento de Medição: Acelerômetro	25
2.4 Arduino	27
2.5 Incerteza de Medição	28
2.6 Pesquisas Recentes	31
3 METODOLOGIA	34
3.1 Modelo Vibracional do Cavallo Mecânico	35
3.2 Montagem e Validação do Hardware e Software de Coleta de Dados	38
3.2.1 Circuito Eletrônico	38
3.2.2 Comunicação	40
3.2.3 Validação dos Dados Obtidos pelo Dispositivo para Coleta de Dados	40
3.3 Procedimento para Coleta de Dados	44
4 ANÁLISE DE DADOS	48
4.1 Dados dos Ensaios Experimentais	48
4.1.1 Ensaio Preliminar	48
4.1.2 Ensaio do Estudo de Caso	49
4.2 Considerações e Hipóteses do Modelo Analítico e Numérico	50
4.3 Método de Integração de Newmark	52
4.4 Função Objetivo e Restrições	54
4.5 Fluxogramas das Sub-rotinas	57
4.6 Critérios de Convergência	59
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61

5.1 Discussão dos Resultados Experimentais	61
5.2 Discussão dos Resultados Numéricos	62
5.2.1 Experimento Amostra 6 a 60 km/h (otimizado).....	74
5.2.2 Experimento Amostra 12 a 60 km/h (otimizado).....	76
5.3 Classificação NHO 10.....	79
5.3.1 Classificação NHO 10 para os Dados Experimentais	79
5.3.2 Classificação NHO 10 para os Dados Otimizados	82
5.4 Incerteza do Sistema de Medição	83
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICE A – MATRIZES E VETORES INERCIAIS DO SISTEMA	92
ANEXO A – VOLANTE, SEU SUPORTE E SUA BARRA.....	93
ANEXO B – PROGRAMAÇÃO ARDUINO	94
ANEXO C – LAUDO DE CALIBRAÇÃO ACELERÔMETRO ITT FUSE	96

1 INTRODUÇÃO

O volante de um veículo possui a importante função de permitir o controle da direção de deslocamento do veículo em termos de dirigibilidade e manobrabilidade, compondo um dos itens que está relacionado ao conforto e à segurança do motorista. Entende-se, nesse contexto, que monitorar os efeitos da vibração no controle da direção é um dos principais pontos relacionados à segurança e que pode ser fruto de estudos de vibrações em termos de dinâmica vertical no volante do motorista.

Os efeitos nocivos da exposição prolongada à vibração podem contribuir para prejudicar a saúde e segurança dos motoristas devido à vibração excessiva. A causa das vibrações transmitidas aos motoristas geralmente é objeto de estudo analisando somente as suspensões e os assentos, itens esses com maior número de estudos e otimizações, em detrimento de outros sistemas do veículo como, por exemplo, o sistema de direção. Vibrações transmitidas pelos volantes também podem ser estudadas a ponto de melhorar as condições de trabalho dos motoristas, que já enfrentam outros grandes desafios no seu dia a dia, tais como jornadas exaustivas e más condições das estradas.

As exposições prolongadas a vibrações no ser humano, especialmente no punho, estão associadas a doenças ocupacionais do trabalho, conhecidas como Lesões por Esforços Repetitivos (LER) e Distúrbios Osteomusculares Relacionados com o Trabalho (DORT). No Brasil em agosto de 2014, as Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego números 9 e 15 foram revisadas, e no anexo VIII da NR-15 foram introduzidos valores de limite de tolerância, de nível de ação e de dose de vibração resultante para a exposição ocupacional às Vibrações de Mãos e Braços (VBM) e Vibrações de Corpo Inteiro (VCI). Essa revisão, teve como base as normas de higiene ocupacional Avaliação da Exposição Ocupacional a Vibração de Corpo Inteiro (NHO 09) e Avaliação da Exposição Ocupacional a Vibração em Mãos e Braços (NHO 10), ambas de 2013.

Este trabalho traz o estudo da dinâmica vertical de um veículo pesado em que avalia o comportamento da vibração transmitida ao volante em relação às acelerações, aos deslocamentos durante as excitações verticais e à influência das diferentes velocidades de tráfego e do perfil de pista aleatório. Através de um modelo em que serão especificados os graus de liberdade e empregando uma otimização com o intuito de obter parâmetros de rigidezes ótimos de projeto do volante, e suporte e

barra ligados a ele. Dessa forma a aceleração vertical calculada pelo valor quadrático médio (RMS) para o motorista deverá ser minimizada.

A coleta das acelerações verticais do volante se dá pelo ensaio experimental, e a diferença entre os valores eficazes das acelerações medidas com os valores eficazes das acelerações do modelo numérico resulta no erro relativo. Os ensaios experimentais serão realizados a diferentes velocidades, abrangendo as faixas de velocidades permitidas, contidas na resolução 396 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN).

1.1 Tema

O presente trabalho aborda a otimização dos parâmetros do volante de direção de um cavalo mecânico, com o objetivo de determinar quais seriam os parâmetros ótimos de rigidezes do volante, e suporte e barra ligados a ele, capazes de reduzir as vibrações no mesmo e, por consequência, aumentar o conforto e a segurança do motorista. Para isso, uma coleta de dados dos efeitos de exposição prolongada a vibrações em diferentes velocidades é realizada e, subsequentemente, a otimização dos parâmetros é feita por meio do algoritmo heurístico genético.

1.2 Delimitação do Tema

O trabalho planeja estudar a influência das rigidezes do volante, e suporte e barra ligados a ele, na vibração transmitida para o punho do motorista pelo volante original de um cavalo mecânico Scania 124G 360. Para isso, delimita-se um trajeto reto de 100 metros, em uma pista asfáltica, a velocidade constante de 60 km/h.

1.3 Problema

A crescente demanda em termos de produtividade nos meios de transporte ocasiona um aumento na exposição prolongada e repetida à vibração do motorista. Essa exposição acentuada pode provocar uma queda na produtividade e também colocar a saúde do motorista em risco. Com intuito de melhorar as condições de trabalho relacionadas a essas questões, melhorias nas regiões onde há transmissão de vibrações podem ser realizadas.

O volante, nesse sentido, possui a importante função de permitir que o motorista controle a direção de deslocamento do veículo em termos de dirigibilidade, compondo um dos itens que está relacionado ao conforto e à segurança. As vibrações transmitidas pelo volante podem acarretar doenças ocupacionais conhecidas como Lesões por Esforços Repetitivos (LER) e Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT), que são prejudiciais à saúde do motorista.

Adicionalmente à questão da saúde, reside a problemática em que há uma preferência em otimizar a suspensão e o acento do veículo, deixando o volante em segunda opção. Este trabalho dedica-se ao estudo parâmetros ótimos de rigidezes do volante, e suporte e barra ligados a ele, como uma alternativa viável para atenuar os problemas decorrentes da exposição prolongada e repetida de vibrações, a qual o motorista está sujeito.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a aceleração transmitida em um volante de um cavalo mecânico, e verificar a influência das rigidezes do volante, e suporte e barra ligados a ele, a fim de obter uma minimização dessa aceleração. Garante-se assim, conforto e segurança ao motorista em termos de dirigibilidade em um perfil de pista aleatório definido.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho se desdobram nas seguintes alíneas:

- a) desenvolver um modelo analítico e numérico que represente o caso avaliado;
- b) desenvolver uma metodologia para realização da calibração e coleta de dados da aceleração vertical transmitida ao punho do motorista;
- c) desenvolver um sistema de medição para coleta de dados;
- d) calibrar o sistema de medição desenvolvido;

- e) trafegar em diferentes velocidades constantes (40 km/h, 60 km/h e 80 km/h) em um trajeto linear conhecido com o intuito de verificar experimentalmente qual destas velocidades consiste no pior caso a ser otimizado;
- f) coletar os dados para inserir no modelo numérico como fonte de excitação (considerar pior caso);
- g) otimizar, numericamente, por meio de um algoritmo heurístico genético, os valores de rigidezes do volante, e suporte e barra ligados a ele, para garantir conforto e segurança;
- h) realizar uma análise de sensibilidade para identificar quais variáveis de projeto mais influenciaram na obtenção do resultado ótimo do processo de otimização.

1.5 Justificativa

A justificativa deste trabalho dá-se a partir da necessidade de ter um projeto futuro de um volante mais adequado ao condutor em relação a transmissão de acelerações, item esse muitas vezes negligenciado no projeto de um veículo em detrimento, por exemplo, ao assento do motorista e à suspensão. Faz-se necessário estudar as vibrações transmitidas pelo volante, pois dependendo da amplitude e frequência das mesmas, elas podem gerar desconforto e, em casos mais extremos, podem acarretar doenças ocupacionais relacionadas aos movimentos repetitivos e conhecidas como Lesões por Esforços Repetitivos (LER) e Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT), que são prejudiciais à saúde do motorista. Justifica-se o estudo e melhoria contínua em termos de projeto de engenharia o fato da jornada de trabalho dos motoristas ser exaustiva e, em parte, comprometedora a saúde humana a médio e longo prazo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo e subseções destina-se a revisão bibliográfica pertinente. Os temas constituintes ao referente projeto de trabalho de conclusão são discriminados e fundamentados conforme a literatura, com os principais desenvolvimentos deste trabalho: normas relacionadas à saúde e segurança; otimização heurística; acelerômetro; Arduino; incerteza de medição; estudos recentes da arte a cerca de volantes de direção de veículos e análises de vibrações.

2.1 Norma de Higiene Ocupacional 10 (2013)

No caso de estudo em questão, o interesse dos efeitos da vibração está em mãos e braços, e as normas comumente utilizadas em trabalhos com este viés são as ISO 5349-1 e 5349-2. Outras normas, como a ISO 2631-1 e a ISO 10819, tratam, respectivamente, a vibração de corpo inteiro e a medição e transmissibilidade de luvas nas palmas das mãos, e são importantes para orientar estudos na área de saúde humana e efeitos nocivos de vibração. (ISO, 2001, 1997, 2013).

No presente trabalho, entretanto, adota-se a Norma de Higiene Ocupacional 10 – Avaliação da exposição ocupacional em mãos e braços (NHO 10, 2013), regida pela instituição brasileira FUNDACENTRO. Esta norma brasileira referencia também as normas ISO 5349-1 e 2 e ISO 8041 para compor suas orientações no que diz respeito à exposição de vibrações em mãos e braços. A importância da NHO 10 (2013) é ser constituinte para formar a base do Anexo VIII da Norma Regulamentadora 15 – Atividades e Operações Insalubres (NR 15, 2014). Este anexo, do ano de 2014, é atualmente utilizado dentro do território brasileiro para avaliação de atividades e operações insalubres referentes a vibrações. (ISO, 2001; ISO, 2017).

A NHO 10 orienta as diretrizes gerais para avaliar a exposição a vibrações em mãos e braços, tendo como principal foco a prevenção e o controle dos riscos à saúde. Ela apresenta símbolos, definições, abreviaturas e correlações matemáticas para quantificar e orientar a medição de uma variável quantitativa (aceleração) que representa um estado subjetivo do objeto medido (conforto e segurança). Por isso, ela disponibiliza um critério de tomada de decisão em relação à adoção de medidas preventivas e corretivas com base em dados quantitativos. (BRASIL, 2013).

As equações necessárias utilizadas na NHO 10 (2013) são as que se seguem:

$$amep_{ij} = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s am_{ijk} \quad (1)$$

$$arep_i = \sqrt{amep_{ix}^2 + amep_{iy}^2 + amep_{iz}^2} \quad (2)$$

$$are = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^m n_i arep_i^2 T_i} \quad (3)$$

$$aren = are \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (4)$$

onde:

$amep_{ij}$ = aceleração média de exposição parcial, sendo j igual a x , y ou z [m/s^2];

s = número de amostras da componente de exposição i que foram mensuradas

[-];

am_{ijk} = aceleração média relativa à k -ésima amostra selecionada dentre as repetições da componente de exposição i no eixo de direção j [m/s^2];

$arep_i$ = aceleração resultante de exposição parcial [m/s^2];

are = aceleração resultante de exposição [m/s^2];

T = tempo de duração da jornada diária de trabalho, expresso em horas ou minutos;

m = número de componentes de exposição que compõe a exposição diária [-];

n_i = número de repetições da componente de exposição i ao longo da jornada de trabalho [-];

T_i = tempo de duração da componente de exposição i [horas ou minutos];

$aren$ = aceleração resultante de exposição normalizada [m/s^2];

T_0 = 8 horas ou 480 minutos.

Após obtida a aceleração resultante de exposição normalizada ($aren$), é necessária uma análise do critério de julgamento para tomada de decisão, conforme o Quadro 1 abaixo. Onde valores a partir de $2,5 m/s^2$ necessitaram de adoções de medidas, sejam estas preventivas ou corretivas, e mesmos valores menores são passíveis de melhoramentos, a não ser que o valor seja, ou tenda a zero.

Quadro 1 – Classificação aren

Aren (m/s²)	Consideração técnica	Atuação recomendada
0 a 2,5	Aceitável	No mínimo, manutenção da condição existente
> 2,5 a < 3,5	Acima do nível de ação	No mínimo, adoção de medidas preventivas
3,5 a 5,0	Região de incerteza	Adoção de medidas preventivas e corretivas visando a redução da exposição diária
Acima de 5,0	Acima do limite de exposição	Adoção imediata das medidas corretivas

Fonte: Brasil (2013, p. 40).

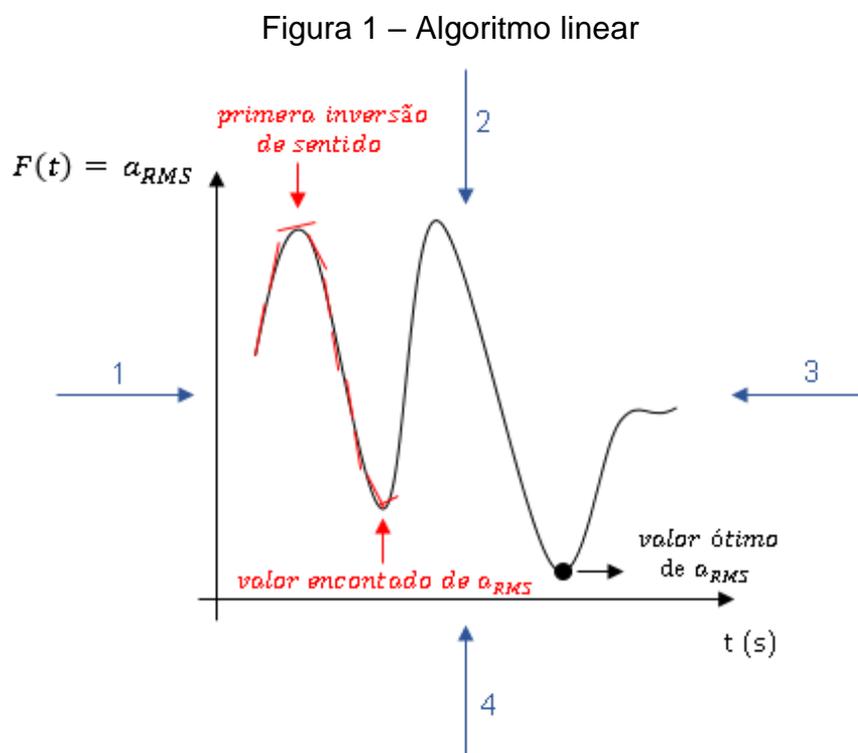
2.2 Algoritmos de Otimização

Algoritmos são instruções finitas e bem definidas, realizadas em um tempo finito, mecânica ou eletronicamente, para realizar a execução de uma tarefa. Neste trabalho, determinam-se as características e as variáveis de projeto do volante capazes de minimizar a função objetivo (aceleração vertical RMS no volante). Por meio de ferramentas matemáticas e de modelos analíticos, pode-se expressar o sistema avaliado no trabalho na forma de uma função matemática e, então, utilizar métodos numéricos organizados na forma de rotinas (ou algoritmos) para atingir o mínimo dessa função. A este processo dá-se o nome de otimização.

As funções e instruções são desenvolvidas no ambiente MATLAB, a fim de encontrar a solução ótima para uma função pré-definida. Essa função objetivo é resultante da modelagem em parâmetros concentrados do problema aqui abordado, e diferentes algoritmos disponíveis na base de dados e nos pacotes do MATLAB podem ser utilizados e customizados, dentre eles, o algoritmo genético.

Os algoritmos de otimização se dividem em dois grandes grupos, algoritmos lineares e meta heurísticos. Na utilização de algoritmos lineares é necessário indicar o sentido pelo qual a função irá começar a ser resolvida na busca pelo resultado desejado, os sentidos de início estão exemplificados pelas setas com numeração de 1 a 4 da Figura 1. O inconveniente de utilizar esse tipo de algoritmo em funções com diversos picos (como as obtidas nesse trabalho), é que ele pode parar a busca e a partir das primeiras inversões de sentido da função, acreditando ter encontrado a solução e dessa forma não percorrer a função até o final, podendo assim não encontrar o valor ótimo (mínimo ou máximo da função). Na Figura 1, pode-se observar

a exemplificação de uma função, resolvida através de um algoritmo linear, que iniciou a execução de suas instruções através do sentido da seta 1, e dessa forma, acabou não encontrando o valor ótimo de a_{RMS} .



Fonte: Elaborada pela autora.

O motivo de adotar um algoritmo meta-heurístico reside no fato de que ele permite explorar o subespaço de soluções, sem depender do gradiente da função objetivo, e, com isso, evitar mínimos (ou máximos) locais. A procura do mínimo (ou máximo) global se deve à característica própria dos heurísticos em avaliar a função objetivo por meio de seus agentes de procura (no caso dos genéticos, os indivíduos e a sua geração; no caso da nuvem de partículas, por exemplo, as partículas em si). Conforme Blum e Roli (2003), “As meta-heurísticas combinam métodos heurísticos básicos em arquiteturas de alto nível com o objetivo de promover a eficiência e eficácia na exploração do espaço de busca”.

De acordo com Goldberg, M., Goldberg, E. e Luna (2015, p. 74):

Uma heurística é uma técnica computacional aproximativa que visa alcançar uma solução avaliada como aceitável para um dado problema que pode ser representado em um computador, utilizando um esforço computacional considerado razoável, sendo capaz de garantir, em determinadas condições, a viabilidade ou a otimalidade da solução encontrada.

Segue abaixo, o Quadro 2, com os principais algoritmos meta-heurísticos classificados pela estratégia de busca utilizada:

Quadro 2 – Algoritmos Meta-heurísticos

Tipo	Descrição	Exemplos
1.Construtivas	As soluções são organizadas passo a passo em forma crescente, e poderão ser aperfeiçoadas ou não em fases subsequentes.	GRASP, Colônia de Formigas.
2.Evolutivas	As soluções são obtidas a partir da composição de outras soluções previamente conhecidas ou pelo uso de transformações associadas a essas soluções previamente existentes. Existem critérios que permitem, em qualquer interação do algoritmo, selecionar um grupo de soluções para serem consideradas como previamente conhecidas e realimentar a busca.	Evolucionários: Genéticos, Meméticos, Culturais, Simbióticos, Transgenéticos.
3.De decomposição	As soluções são organizadas a partir de subproblemas de mais fácil solução. Tais meta-heurísticas possuem especial adaptação à paralelização.	Decomposição heurística de Dantzing-Wolfe, decomposição heurística de Benders.
4.De informação compartilhada	As soluções são organizadas a partir de um grupo de agentes ou métodos que constroem ou modificam as soluções ao longo do processo. Quando as informações que guiam a construção das soluções são compartilhadas com o auxílio da analogia com o meio ambiente, caracterizam-se os algoritmos em Colônia de Formigas. Quando o compartilhamento de informações é baseado em analogia com a dinâmica de um bando de pássaros, caracterizam-se os algoritmos denominados em Nuvem de Partículas. Quando o compartilhamento de informações é baseado em analogia com a dinâmica da troca genética do fluxo intra e extra celular, caracterizam-se os algoritmos Transgenéticos.	Colônia de Formigas, Nuvem de Partículas, Transgenéticos.

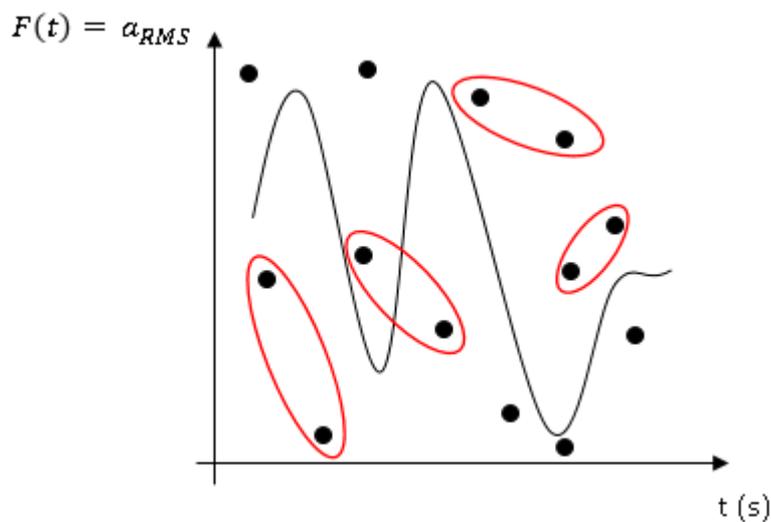
Fonte: Goldberg, M., Goldberg, E. e Luna (2015, p. 76)

Neste trabalho, utilizam-se algoritmos evolucionários genéticos, que utilizam os conceitos de seleção natural/evolução das espécies. De acordo com Lucas (2002, p. 4), “A própria evolução das espécies pode ser vista como um processo de otimização:

ao longo do tempo, os seres vivos se tornam cada vez mais adaptados a um meio ambiente em constante mudança”.

Esse tipo de algoritmo foi escolhido, por não realizar a busca apenas *por um lado* da função (como demonstrado na Figura 1, que ocorre nas funções lineares), por ser adequado ao objeto de estudo desse trabalho, ter bastante referencial teórico e também por estar disponível na base de dados do MATLAB. Abaixo na Figura 2 se exemplifica o mecanismo de busca do algoritmo genético, neste tipo de algoritmo é criada uma população, ocorre a *cruxa* de dois cromossomos, que geram *filhos* que irão compor uma nova geração, que deve ter *genes* (características) mais adequados para entender o objetivo especificado na instrução, que está relacionado a função criada para modelar o problema.

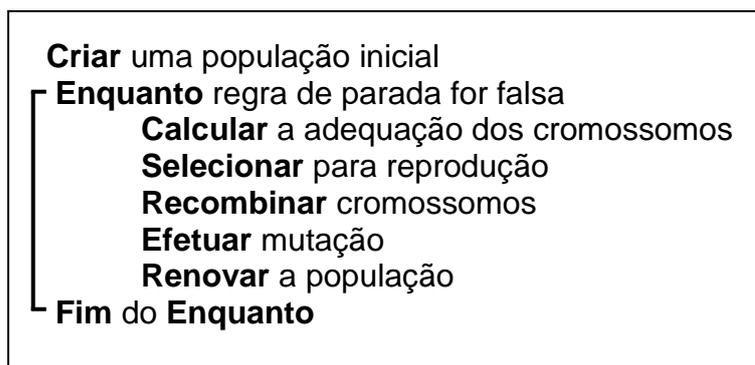
Figura 2 – Algoritmo genético



Fonte: Elaborada pela autora.

No Quadro 3, segue uma representação das instruções de ações criadas para os algoritmos genéticos realizarem a busca na função. Esta forma de descrever as instruções do MATLAB, que qualquer pessoa (leigos em mecanismos de otimização) consegue entender, é chamada de pseudocódigo.

Quadro 3 – Pseudocódigo



Fonte: Goldberg, M., Goldberg, E. e Luna (2015, p. 116)

2.3 Instrumento de Medição: Acelerômetro

A aceleração é uma grandeza física, composta pela taxa de variação da velocidade em relação ao tempo, serve para quantificar a rapidez com que a velocidade de um corpo varia em um tempo determinado. O acelerômetro é um sensor eletrônico que mede aceleração.

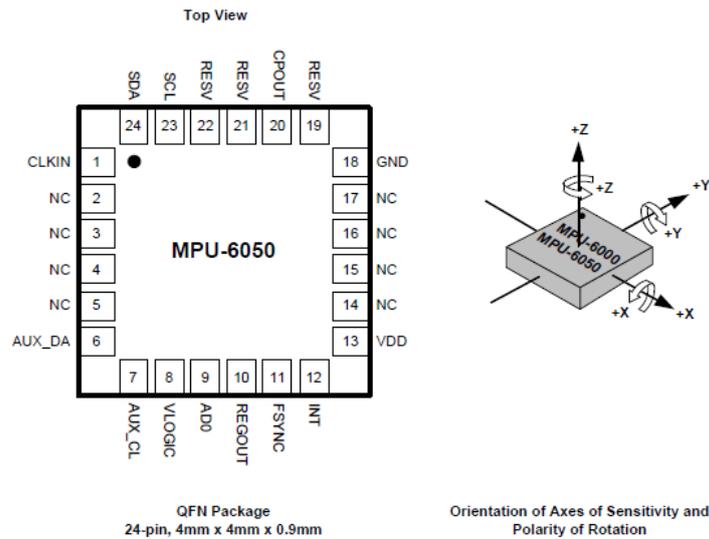
A tecnologia dos acelerômetros se desenvolveu muito rapidamente, devido em grande parte a suas inúmeras aplicações e sua produção em larga escala que reduziu seu custo de fabricação. Algumas de suas aplicações são: controle e manutenção preditiva de equipamentos, celulares, controle de vídeo games, sistemas de segurança e conforto principalmente no setor automotivo (*airbags*),...

Existem diferentes tamanhos e tecnologias para acelerômetros. As principais tecnologias de funcionamento utilizadas são piezoelétricos, piezorresistivos e capacitivos, e ultimamente esses acelerômetros podem ser fabricados através de microeletrônica sendo estes denominados *Microelectromechanical System* (MEMS). (BALBINOT, 2011).

Neste trabalho, utiliza-se o dispositivo MPU-6050 do tipo capacitivo e MEMS, que integra em si um acelerômetro tri axial, e um giroscópio tri axial, além de um processador capaz de detectar a temperatura ambiente. Esta escolha se deu devido a este dispositivo ser de pequenas dimensões (4mm x 4mm x 0.9mm), pequena massa em relação ao volante (20 gramas) atendendo aos requisitos da NHO 10 (2013), devido a sua disponibilidade pois é um componente de fácil acesso no mercado (muitos acelerômetros precisam ser importados), devido a facilidade de uso já que por ser muito utilizado por *hobbyistas* existem muitos exemplos de uso e

também por ser um dispositivo com uma boa relação custo e benefício, já que possui uma resolução muito boa (de 16 bits), frente ao custo (aproximadamente R\$ 25,00). Segue abaixo, nas Figuras 3 e 4, alguns dados técnicos do dispositivo MPU-6050.

Figura 3 – MPU-6050



Fonte: InvenSense (2011, p. 6).

Figura 4 – MPU-6050 detalhes do produto

Part #	Gyro Full Scale Range	Gyro Sensitivity	Gyro Rate Noise	Accel Full Scale Range	Accel Sensitivity	Digital Output	Logic Supply Voltage	Operating Voltage Supply	Package Size
UNITS	(°/sec)	(LSB/°/sec)	dps/√Hz	(g)	LSB/g		(V)	(V +/-5%)	(mm)
 MPU-6050	±250	131	0.005	±2	16384	I ² C	1.8V±5% or VDD	2.375V-3.46V	4x4x0.9
	±500	65.5	0.005	±4	8192				
	±1000	32.8	0.005	±8	4096				
	±2000	16.4	0.005	±16	2048				

Fonte: InvenSense (2018).

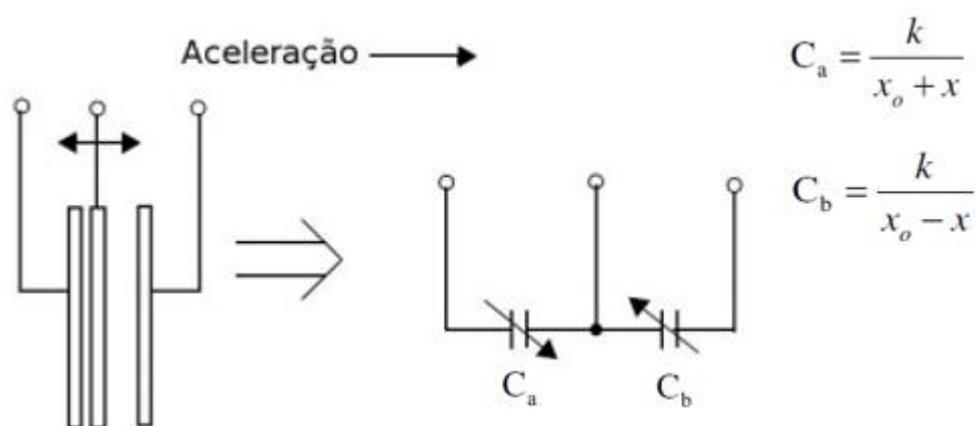
Os dispositivos com a tecnologia MEMS integram elementos mecânicos, sensores, atuadores e dispositivos eletrônicos em micromáquinas realmente muito pequenas, sendo em neste caso as maiores dimensões dadas pela placa a qual este (MPU-6050) está fixado. A principal vantagem é a não interferência no processo de medição, ou seja, aproximar as condições de medição das condições reais de trabalho.

O princípio básico de operação dos acelerômetros é baseado no sistema massa-mola, obedecendo a Lei de Hooke. O sistema consiste em uma massa que é conectada a uma fixação de referência através de uma mola com coeficiente elástico, conforme ilustrado na Figura 5.

Devido a inércia, o movimento da massa não é igual ao da referência, assim, sendo possível usar essa diferença de posição ($\Delta x = x_f - x_m$) para medir a aceleração destes acelerômetros, ou seja, são basicamente um sistema massa, mola e amortecedor em uma escala nano.

Sendo o acelerômetro utilizado do tipo capacitivo, nele há uma massa móvel que fica localizada entre duas placas paralelas formando assim dois capacitores, mostrados na Figura 5. A aceleração então é medida a partir da capacitância entre as placas que varia com a posição da massa móvel.

Figura 5 – Modelo de funcionamento do MPU-6050



Fonte: Freescale (2008, p. 4).

2.4 Arduino

O Arduino é uma plataforma de *hardware open source*, de fácil utilização, ideal para a criação de dispositivos que permitam interação com o ambiente (SOUZA *et al*, 2011). Esta plataforma foi criada em 2005, com a intenção de ser uma alternativa barata, funcional e fácil de programar, sendo acessível a estudantes e projetistas amadores. É ideal para desenvolvimento de *softwares*, pois possui uma estrutura básica de *hardware*, que pode ser personalizada para as mais diversas aplicações. A estrutura básica de *hardware* é composta por um microcontrolador, circuitos de entrada/saída, pode ser facilmente conectada à um computador através de um cabo

USB (*Universal Serial Bus*) e programada através de um ambiente de desenvolvimento integrado (e gratuito) utilizando uma linguagem baseada em C/C++.

A alimentação da placa do Arduino geralmente é provida por um cabo USB conectado a um *notebook* ou *desktop*, porém pode ser também alimentado por fonte externa, isso lhe confere versatilidade na aquisição de dados por meio de sua plataforma. Conforme já comentado, sua criação privilegiou a facilidade em seu uso e a não necessidade de um vasto conhecimento prévio de eletrônica e programação. Utiliza-se Arduino nesse trabalho, pela necessidade de registrar os dados obtidos pelo acelerômetro, por ser um dispositivo de fácil operação e de baixo custo (aproximadamente R\$ 90,00).

Além dos motivos citados no parágrafo anterior, através de uma rápida pesquisa é possível verificar sua larga utilização em artigos acadêmicos para obtenção de dados referente a vibrações, inclusive sendo este utilizado em conjunto com o acelerômetro escolhido (MPU-6050) em trabalhos anteriores como visto na Revista InterAtividade, no artigo Sistema para monitoramento de vibrações utilizando Arduino (INTERATIVIDADE, 2014).

2.5 Incerteza de Medição

Para a realização da coleta de dados experimentais desse trabalho um sistema de medição (acelerômetro e Arduino) foi desenvolvido, sendo necessário então, verificar a incerteza do mesmo. Os cálculos de incerteza são realizados utilizando como base o guia GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, em inglês - Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, em português) de 2008.

O GUM (2008), é um guia internacional que define regras para avaliar e expressar incertezas em medição, ele foi desenvolvido em conjunto por sete diferentes organizações internacionais, e no Brasil foi traduzido e publicado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), devido a ciência deste instituto de sua responsabilidade como difusor da cultura metrológica no Brasil. Com este mesmo propósito o INMETRO também fez a tradução e publicação do VIM 2012 (Vocabulário Internacional de Metrologia), que complementa, através da definição do vocabulário, os objetivos do GUM.

Na sequência, são apresentados os conceitos do GUM (2008) e do VIM (2012) que nortearam o cálculo da incerteza do sistema de medição utilizado neste trabalho. Segue, o conceito de incerteza e tipos de incerteza, segundo o VIM (2012):

Incerteza de medição

Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

NOTA 1 A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza definicional. Algumas vezes, não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados mas, em vez disso, são incorporadas componentes de incerteza de medição associadas.

NOTA 2 O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão denominado incerteza padrão (ou um de seus múltiplos) ou a metade da amplitude dum intervalo tendo uma probabilidade de abrangência determinada.

NOTA 3 A incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

NOTA 4 Geralmente para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando. Uma modificação deste valor resulta numa modificação da incerteza associada.

A quantificação de uma fonte de incerteza se baseia na fixação de um valor e a determinação da distribuição a qual se aplica este valor, sendo as distribuições mais comuns: Normal (N), Retangular (R) e Triangular (T). Neste trabalho, através do histograma gerado a partir dos dados experimentais, verificou-se que se este caso se enquadra em uma distribuição de probabilidades retangular (R), que expressa para cada valor em um intervalo a mesma probabilidade.

Existem diversas incertezas no sistema de medição, que devem ser identificadas e calculadas de acordo com seu tipo. Para o cálculo do desvio padrão dos dados experimentais analisados, devido ao fato anteriormente citado que os dados analisados neste trabalho apresentam distribuição de probabilidade retangular, utiliza-se a equação abaixo:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Onde a é o valor da base do retângulo obtido no histograma dividido por dois, já que segundo GUM (2008) a base do retângulo equivale a $2a$. O histograma é um gráfico de barras, que nas abscissas distribui as classes e nas ordenadas os valores absolutos e serve para indicar a forma de distribuição da população de resultados (aplicável para incertezas do tipo A).

Para esse caso, distribuição de probabilidades retangular (R), o desvio padrão devido à incerteza da resolução do instrumento de medição utilizado, é obtido através da aplicação da fórmula abaixo:

$$U_{\text{resolução}} = \frac{\left(\frac{\text{resolução}}{2}\right)}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Sendo a resolução de um instrumento o menor valor representativo em que pode ser feita a leitura. Um conceito básico, porém também utilizado neste trabalho é a média aritmética, que é descrita no GUM (2008) como a soma de valores, dividida pelo número de valores.

A incerteza de padrão combinada (U_c) é o resultado da combinação da incerteza de todas as fontes identificadas. Para estimar a incerteza combinada (U_c) de n fontes de incerteza (definidas e registradas no cálculo de incerteza), estatisticamente independentes (não correlacionadas) utiliza-se a equação abaixo:

$$U_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2} \quad (7)$$

Já que o quadrado da hipotenusa é igual a soma do quadrado dos catetos, considerando que navega-se num espaço n dimensional. Neste cálculo, considera-se apenas um desvio padrão na incerteza de cada variável. Para obter-se a incerteza expandida (U), multiplica-se a incerteza combinada (U_c) por um número K , chamado fator de cobertura.

$$U = U_c \cdot K \quad (8)$$

Este K , chamado de coeficiente de expansão ou fator de cobertura de coeficiente de abrangência, serve para aumentar o valor da incerteza combinada U_c . Para isso ele considera um coeficiente de confiança (95% no caso deste trabalho) e o

número de grau de liberdade efetivo (V_{eff}), o valor de K é obtido na tabela da distribuição *t-Student* (que relaciona essas duas grandezas). O INMETRO obriga a publicação da incerteza expandida (U) e do coeficiente de expansão (K) nos certificados de calibração.

O grau de liberdade efetivo (V_{eff}) relaciona o peso da incerteza de cada n variável (u_n) com seus graus de liberdade (v_n) e a incerteza combinada (U_c), sendo obtido pela equação de Welch-Satterthwaite, que simplificada resulta em:

$$V_{eff} = \frac{U_c^4}{\sum \frac{u_n^4}{v_n}} \quad (9)$$

As incertezas tipo A (estatísticas) possuem grau de liberdade igual ao número de amostras consideradas, já as incertezas tipo B por possuírem grau de liberdade infinito, pois são normalmente contínua (não amostradas), acabam não sendo consideradas no cálculo do grau de liberdade efetivo (V_{eff}), devido ao fato de que o número de graus de liberdade é o denominador da incerteza de cada variável na equação de Welch-Satterthwaite.

Por fim, com a utilização de todos os conceitos descritos acima, a incerteza expandida (U) é encontrada. Essa incerteza é a representação do intervalo dentro do qual, para uma probabilidade de 95%, espera-se encontrar a componente aleatória dos erros de um processo de medição, portanto mais ou menos dois desvios padrões.

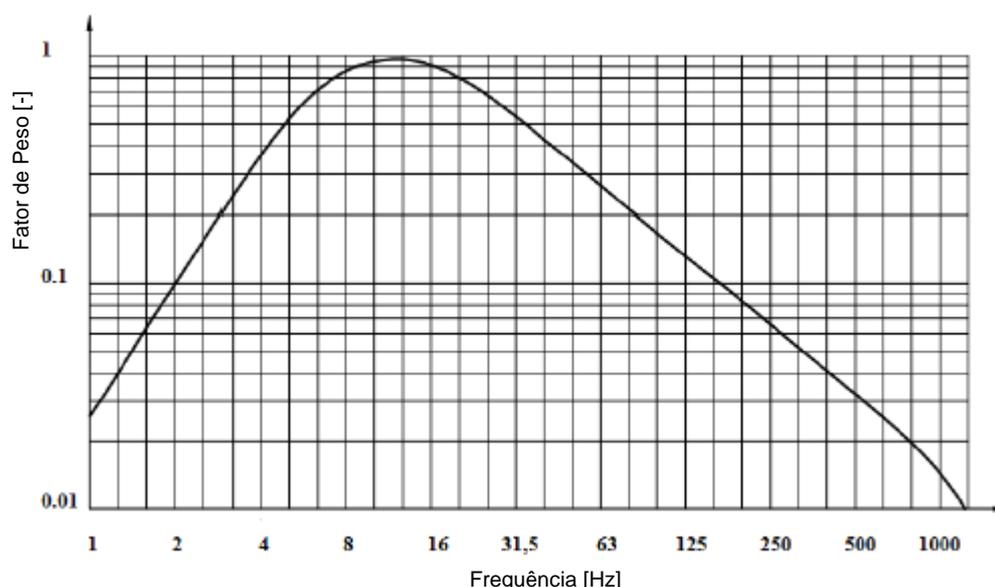
2.6 Pesquisas Recentes

Esta seção destina-se ao estudo recente da arte a cerca de volantes de direção em veículos para fins de contextualização e imersão do assunto abordado neste trabalho. Os trabalhos aqui expostos evidenciam as normas, os limites de frequência sensíveis ao punho humano e as considerações hipóteses e métodos utilizados para compreender e extrair resultados do fenômeno da vibração transmitida pelo volante.

O estudo de Çankaya, Koyuncu e Balaban (2016), tem a finalidade de realizar estudo na vibração do volante de tratores para cumprir os requisitos da ISO 5349 (2001), tendo como alvo a diminuição da magnitude da vibração. O mesmo serve como base para esse trabalho, no que diz respeito definição da faixa de frequência normalmente encontrada nas acelerações em volantes, sendo nesse estudo os picos

de aceleração na faixa de 8 a 20 Hz. Ainda sobre este estudo, o dado de que a frequência máxima de corte escolhida foi de 100 Hz com a justificativa de que acima desse limite a energia absorvida no sinal diminui e porque além disso, a sensibilidade do corpo humano diminui com o aumento da frequência, conforme o gráfico de ponderação de frequência em relação a sensibilidade do corpo humana representado na Figura 6. Neste trabalho a otimização realizada é numérica e executada através de um software de elementos finitos.

Figura 6 – Frequência e sensibilidade do corpo humano



Fonte: NHO 10 (2013, p. 18)

O artigo de Xinfang, Yi e Chang'na (2015) também trabalha na mesma linha do citado anteriormente, análise e otimização das acelerações transmitidas em volante, porém analisando o volante de empilhadeiras, através de coleta de dados experimentais e otimização numérica por elementos finitos. Neste trabalho a frequência de excitação da aceleração encontrada foi em torno de 27,6 Hz.

Szczotka (2011) traz um exemplo de um trabalho puramente matemático, sem dados experimentais para calibração. A parte interessante deste trabalho é que ele utiliza estratégias evolutivas para aquisição dos dados de otimização, mesmo tipo de estratégia usada neste estudo, porém por um método diferente (Runge-Kutta de quarta ordem) e também através de um programa diferente, sendo o programa desenvolvido e objeto de estudo do artigo de Szczotka (2011).

Şendur, Kurtdere e Akaylar (2016), apresenta uma análise das acelerações transmitidas através do volante de um caminhão pesado, integrando nesse estudo análises numéricas, analíticas e experimentais, obtendo através de simulação numérica uma otimização de parâmetros que proporciona uma redução de 40% das vibrações transmitidas através do volante do motorista. Neste trabalho, as vibrações excessivas são encontradas em torno de 27 Hz.

Campos e Souza (2014) têm como proposta de projeto analisar as tensões no chassi de veículos pesados que são provocadas ao passar por uma descontinuidade da pista, como lombadas. Os autores utilizam o MATLAB para realizar os cálculos e as simulações numéricas de deslocamentos, apresentando resultados e discussões que fomentam o presente trabalho de conclusão no que diz respeito à modelagem numérica e à simulação computacional.

O trabalho de Forsberg e Möller (2015), é uma tese que investiga os níveis de ruído na cabine devido a direção hidráulica em um caminhão. Apesar de o assunto não ter relação direta com o objetivo deste trabalho, o mesmo se mostra interessante pois nos permite conhecer um trabalho realizado na Universidade de Chalmers, que possui recursos diversos para teste experimentais e obtenção de dados precisos, tendo a possibilidade de reproduzir partes do funcionamento do caminhão em bancada permitindo a medição das grandezas de interesse.

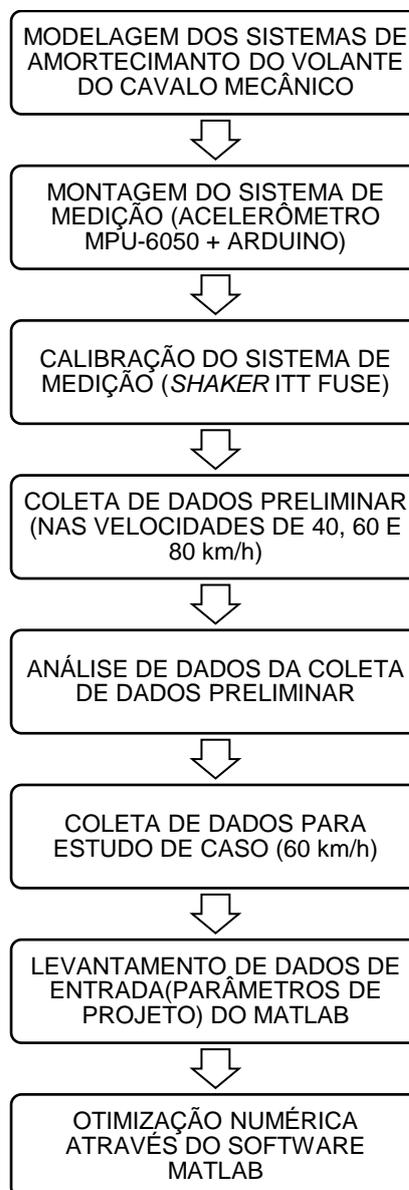
Já o trabalho de Aziz, Nuawi e Mohd Nor (2014), é focado na criação de um programa/método para análise estatística adequada, previsão e monitorização de acelerações em volantes e geração de gráficos para interpretação de resultados. Para isso, utiliza a coleta de dados em caminhões do exército da Malásia, e tem como um dos objetivos identificar se as acelerações encontradas no volante estão de acordo com o os requisitos da ISO 5349-1 (2011).

A leitura dos trabalhos acima citados contribui para este trabalho como fonte de dados técnicos, estimativa da faixa de frequência de vibração deste e inspiração para a criação das metodologias deste trabalho. Adicionalmente, os trabalhos aqui sumarizados permitem reforçar a importância do tema e do objeto de estudo na área de engenharia mecânica nos últimos anos.

3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida no presente trabalho consiste em mensurar a magnitude das acelerações transmitidas ao motorista através do volante do cavalo mecânico Scania modelo 124G 360, e a influência de alguns parâmetros de projeto desse volante nos valores dessas acelerações. Isso é possível por meio de ensaios experimentais e análise numérica. Abaixo, na Figura 7, um fluxograma que apresenta os principais passos da metodologia desenvolvida nesse trabalho:

Figura 7 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborada pela autora.

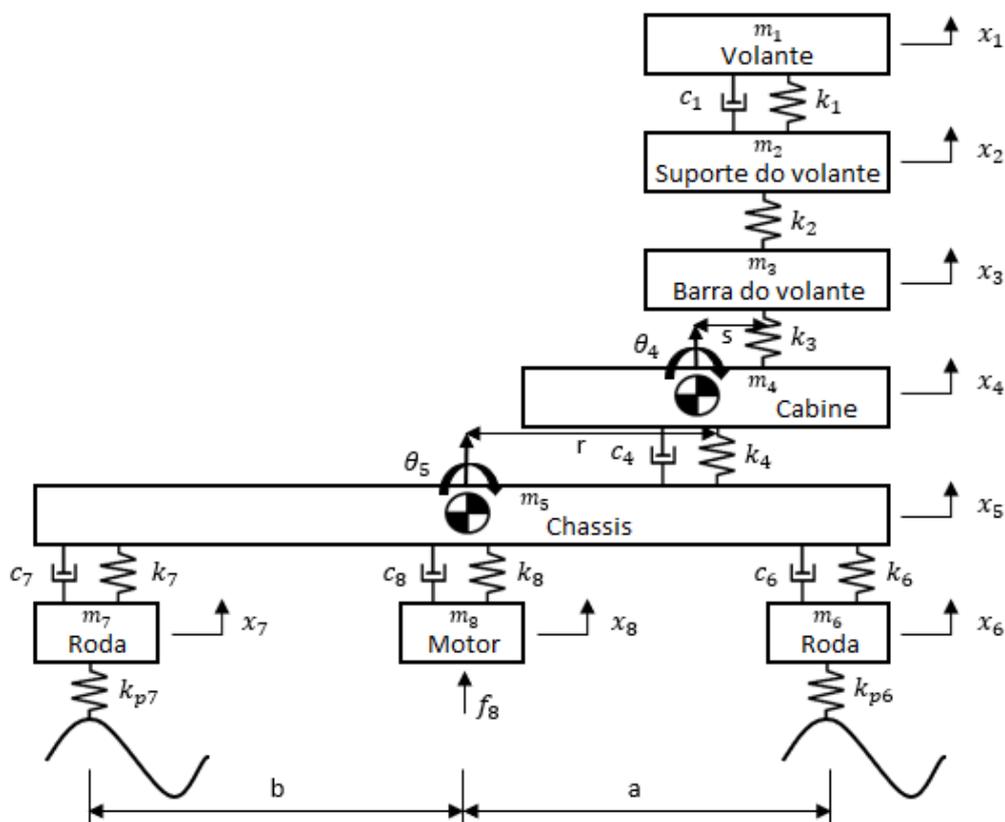
A seguir serão detalhadas as etapas da metodologia, conforme a sequência de trabalho apresentada no fluxograma da Figura 7.

3.1 Modelo Vibracional do Cavalho Mecânico

O cavalo mecânico objeto de estudo desse trabalho é um Scania 124G 360. O modelo vibracional referente à dinâmica vertical do conjunto sistema de direção e veículo a ser estudado baseia-se naquele proposto por Prashanth, Patro e Maram (2015) para o caso simplificado da condição quasi-estático do veículo (as deflexões estáticas são atendidas antes do veículo entrar em movimento).

É um modelo de sistema de direção acoplado à cabine em um modelo de um cavalo mecânico em dinâmica vertical no plano, avaliando os efeitos de arfagem da carroceria (chassi, theta5) e da cabine (theta4) nas vibrações transmitidas pelo volante, totalizando 10-GDL. No Anexo A deste trabalho, consta uma imagem mostra em um desenho técnico, o volante, seu suporte e sua barra. Na Figura 8, segue a modelagem do cavalo mecânico:

Figura 8 – Modelagem cavalo mecânico



Fonte: Elaborada pela autora.

As equações pertinentes ao modelo estudado são as que se seguem:

$$m_1\ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \quad (10)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_3) = 0 \quad (11)$$

$$m_3\ddot{x}_3 + k_2(x_3 - x_2) + k_3(x_3 - (x_4 - s\theta_4)) = 0 \quad (12)$$

$$m_4\ddot{x}_4 + k_3((x_4 - s\theta_4) - x_3) + k_4(x_4 - (x_5 - r\theta_5)) + c_4(\dot{x}_4 - (\dot{x}_5 - r\dot{\theta}_5)) = 0 \quad (13)$$

$$m_5\ddot{x}_5 + k_4((x_5 - r\theta_5) - x_4) + c_4((\dot{x}_5 - r\dot{\theta}_5) - \dot{x}_4) + k_6((x_5 - a\theta_5) - x_6) + c_6((\dot{x}_5 - a\dot{\theta}_5) - \dot{x}_6) + k_7((x_5 + b\theta_5) - x_7) + c_7((\dot{x}_5 - b\dot{\theta}_5) - \dot{x}_7) + k_8(x_5 - x_8) + c_8(\dot{x}_5 - \dot{x}_8) = 0 \quad (14)$$

$$m_6\ddot{x}_6 + k_6(x_6 - (x_5 - a\theta_5)) + c_6(\dot{x}_6 - (\dot{x}_5 - a\dot{\theta}_5)) + k_{p6}(x_6 - \zeta_6) = 0 \quad (15)$$

$$m_7\ddot{x}_7 + k_7(x_7 - (x_5 + b\theta_5)) + c_7(\dot{x}_7 - (\dot{x}_5 + b\dot{\theta}_5)) + k_{p7}(x_7 - \zeta_7) = 0 \quad (16)$$

$$m_8\ddot{x}_8 + k_8(x_8 - x_5) + c_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_5) = f_8 \quad (17)$$

$$I_4\ddot{\theta}_4 - s[k_3((x_4 - s\theta_4) - x_3)] = 0 \quad (18)$$

$$I_5\ddot{\theta}_5 - r[k_4((x_5 - r\theta_5) - x_4) + c_4((\dot{x}_5 - r\dot{\theta}_5) - \dot{x}_4)] - a[k_6((x_5 - a\theta_5) - x_6) + c_6((\dot{x}_5 - a\dot{\theta}_5) - \dot{x}_6)] + b[k_7((x_5 + b\theta_5) - x_7) + c_7((\dot{x}_5 - b\dot{\theta}_5) - \dot{x}_7)] = 0 \quad (19)$$

As matrizes de amortecimento, massa e rigidez, pertinentes ao equacionamento acima são:

Figura 9 – Matriz de rigidez

$$\begin{bmatrix}
 k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & sk_3 & 0 \\
 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 & -sk_3 & rk_4 \\
 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_6 + k_7 + k_8 & -k_6 & -k_7 & -k_8 & 0 & -rk_4 - ak_6 + bk_7 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -k_6 & k_6 + k_{p6} & 0 & 0 & 0 & ak_6 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -k_7 & 0 & k_7 + k_{p7} & 0 & 0 & -bk_7 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -k_8 & 0 & 0 & k_8 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & sk_3 & -sk_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & s^2k_3 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & rk_4 & -rk_4 - ak_6 + bk_7 & ak_6 & -bk_7 & 0 & 0 & r^2k_4 + a^2k_6 + b^2k_7
 \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 10 – Matriz de massa

$$\begin{bmatrix}
 m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_7 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_8 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_5
 \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 11 – Matriz de amortecimento

$$\begin{bmatrix}
 c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & sc_3 & 0 \\
 0 & 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 & -sc_3 & rc_4 \\
 0 & 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_6 + c_7 + c_8 & -c_6 & -c_7 & -c_8 & 0 & -rc_4 - ac_6 + bc_7 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -c_6 & c_6 & 0 & 0 & 0 & ac_6 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -c_7 & 0 & c_7 & 0 & 0 & -bc_7 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -c_8 & 0 & 0 & c_8 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & sc_3 & -sc_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & s^2c_3 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & rc_4 & -rc_4 - ac_6 + bc_7 & ac_6 & -bc_7 & 0 & 0 & r^2c_4 + a^2c_6 + b^2c_7
 \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborada pela autora.

3.2 Montagem e Validação do Hardware e Software de Coleta de Dados

Nesta seção é detalhado o processo de montagem do dispositivo de coleta de dados, a interação entre os dispositivos utilizados e validação dos resultados obtidos com o mesmo. Primeiramente é apresentada a montagem do *kit* de desenvolvimento Arduino Uno e do acelerômetro MPU-6050, mostrando seu circuito eletrônico. Em seguida, é apresentada a forma com que os dados são adquiridos e o código que torna estes dados interpretáveis. Essa metodologia se encerra com a validação dos resultados obtidos, a partir do uso do sistema para coleta de dados construído.

3.2.1 Circuito Eletrônico

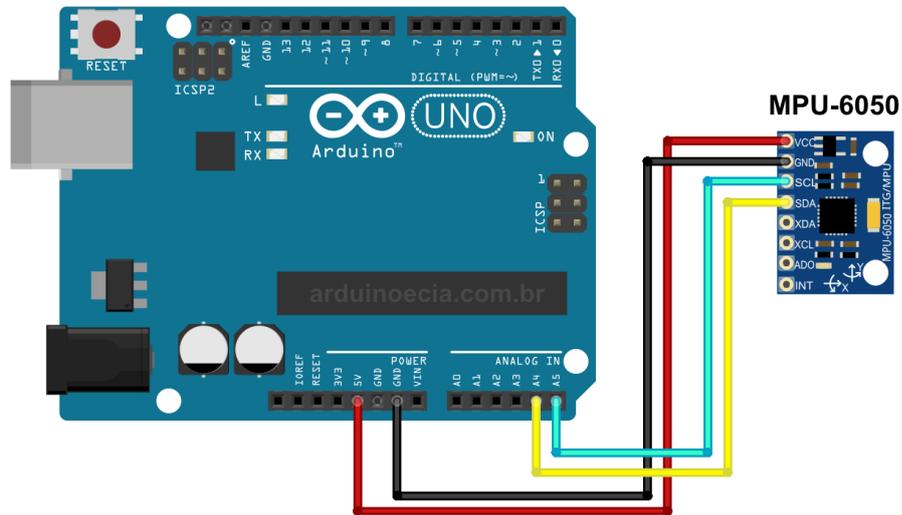
A montagem de um circuito eletrônico pode ser feita de várias maneiras, tais como: por meio de uma *proto-board*, montagem em placas que possibilitem a criação de trilhas de cobre pelo método de corrosão, montagem em placas com furação padrão e criação de trilhas a partir da soldagem utilizando um liga de estanho e chumbo, ou ligação do acelerômetro ao microcontrolador realizada por fios diretamente soldados em suas placas.

Como a plataforma Arduino Uno possui conectores de maneira a facilitar a conexão por meio de pinos, o método de conexão que se mostrou mais indicado foi a soldagem de fios diretamente na placa do acelerômetro e na ponta oposta do fio, a soldagem de pinos necessários para a conexão com o Arduino. Esta montagem foi de fácil e rápida realização, e adequada devido à baixa possibilidade de desconexão durante o processo de medição, já que apenas os pinos da plataforma Arduino (que ficam distante da fonte de vibração) não foram soldados.

Na Figura 12 é mostrada a ligação entre a plataforma Arduino e o acelerômetro MPU-6050. Como o MPU-6050 utiliza a interface I²C (*Inter-Integrated Circuit* do inglês Circuito Inter-integrado) para se comunicar, a conexão é bem simples e envolve apenas os pinos de entrada analógica, A4 (DAS – *Serial Data Line*) e A5 (SCL – *Serial Clock Line*) do Arduino Uno, além das entradas VCC (alimentação) e GND (aterramento) do MPU-6050, que são conectadas ao 5V (também podendo ser alimentada com 3,3V) e GND do Arduino, respectivamente. A conexão com o microcontrolador, do notebook utilizado, ao Arduino se dá por meio de um cabo USB (*Universal Serial Bus*). Por meio deste cabo os dados coletados são enviados ao

microcontrolador (onde os dados são armazenados em blocos de notas) e também é feita a alimentação da plataforma Arduino.

Figura 12 – Ligação entre o Arduino e o acelerômetro



Fonte: Acelerômetro... (2015).

Na Fotografia 1, são apresentados os materiais utilizados para a montagem do sistema de coleta de dados. O alicate de corte, utilizado para retirar a capa plástica de proteção dos fios. O soldador e fio de cobre, utilizados para a execução da solda.

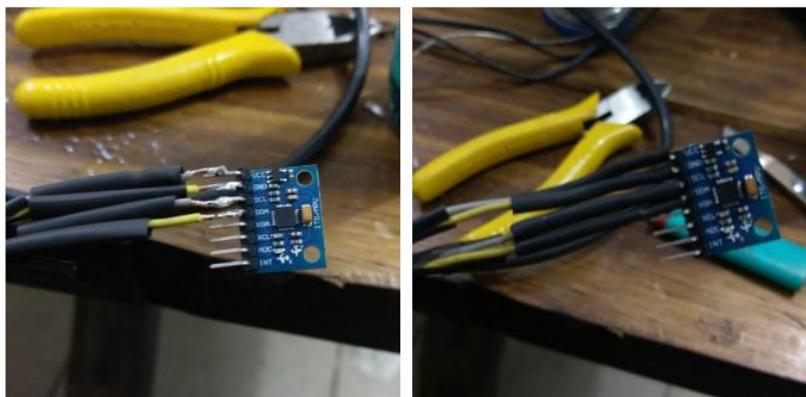
Fotografia 1 – Materiais utilizados



Fonte: Registrada pela autora.

Na Fotografia 2, pode-se ver a solda realizada no acelerômetro MPU-6050, e a montagem final desta conexão, que recebeu a proteção de um isolador termo retrátil.

Fotografia 2 – Solda do acelerômetro



Fonte: Registrada pela autora.

3.2.2 Comunicação

Como o dispositivo I²C utilizado (MPU-6050) é destinado a leitura da aceleração, e não o foco de estudo deste trabalho, utiliza-se um código (*sketch*) fornecido na plataforma de código aberto GitHub, já pronto para utilização do Arduino em conjunto com o MPU-6050. (VROMANOV89, 2016).

Deste código foi retirada apenas a parte destinada à leitura de dados do giroscópio presente no sensor, a qual não interessa aquisição de dados para avaliação realizada neste trabalho. O código utilizado está no Anexo B deste trabalho, e sua parametrização permite coletar um dado a cada 0,1 segundos.

3.2.3 Validação dos Dados Obtidos pelo Dispositivo para Coleta de Dados

Duas validações do sistema de coleta de dados são realizadas, com os seguintes objetivos:

- a) garantir que o sistema é capaz de medir os valores verdadeiros de aceleração na aceleração e frequência deste trabalho;
- b) cálculo da incerteza de medição.

Para a validação dos dados obtidos pelo dispositivo para coleta de dados utilizou-se o *Shaker* modelo MPA101-L315M do fabricante Ets Solutions, disponível no Laboratório de Testes do Instituto Tecnológico itt Fuse, situado dentro do parque tecnológico da Universidade do Vale do Rio do Sinos – UNISINOS.

Fotografia 3 – *Shaker Ets Solutions*



Fonte: Registrada pela autora.

Para o uso do *Shaker*, o acelerômetro é fixado com fita isolante (mesmo material utilizado nos testes de coleta de dados) em uma barra de alumínio, que serve de base, a ser aparafusada no *Shaker*. Na sequência, é colado com cola instantânea um acelerômetro modelo 3035B2 da marca DYTRAN, que pertence ao itt Fuse, que está aferido e serve para validar as acelerações selecionadas para atuarem no *Shaker*.

Fotografia 4 – Fixações dos acelerômetros no *Shaker*

Fonte: Registrada pela autora.

A aceleração simulada pelo *Shaker* nos testes é de 1g, pois na coleta de dados preliminar verificou-se que a aceleração máxima do volante é inferior a 2g no eixo z (1g de aceleração e $\pm 1g$ da aceleração da gravidade). O eixo z é o eixo de interesse de trabalho pois delimita-se a análise do volante em um trecho retilíneo e porque na coleta de dados preliminar, constatou-se que nas condições de teste delimitadas neste trabalho, os valores das acelerações nas demais direções mostraram-se insignificantes frente aos valores de aceleração observados no eixo z.

Fotografia 5 – Eixo z

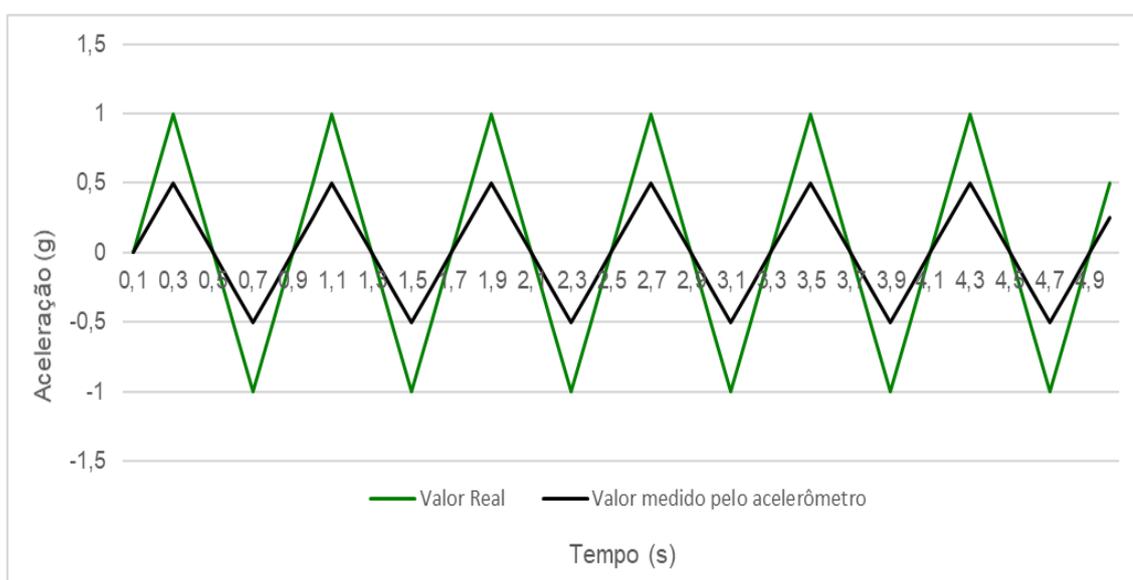


Fonte: Registrada pela autora

A frequência simulada pelo *Shaker* é de 31,5 Hz, pois conforme a revisão de literatura apresentada (seção 2.6), a frequência de vibração encontrada em volantes, é em torno de 30 Hz. O valor exato de 31,5 Hz deu-se pelo fato de essa ser uma das faixas de frequência que consta no laudo de calibração do acelerômetro do itt Fuse, Anexo C, utilizado no cálculo da incerteza de medição.

A validação do sistema de medição para garantir que ele é capaz de medir os valores verdadeiros de aceleração na aceleração e frequência deste trabalho, é necessária para evitar que ocorra o erro ilustrado no Gráfico 1, em que o valor lido pelo acelerômetro não reflete o real comportamento vibracional do sistema.

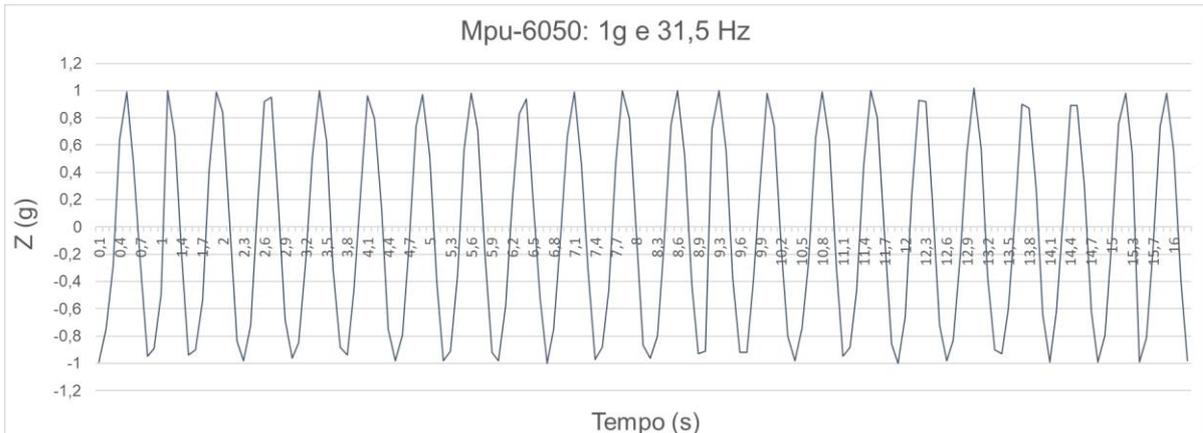
Gráfico 1 – Ilustração de possível erro



Fonte: Elaborado pela autora.

No Gráfico 2, o resultado do teste de validação em que pode-se verificar que o sistema de medição desenvolvido é capaz de medir os valores verdadeiros de aceleração. Esta mesma validação também foi feita para as frequências de 5, 8, 12,5, 20, 50 e 80 Hz (faixas presentes no laudo de calibração do acelerômetro do itt Fuse – Anexo C), conseguindo também para estas, através do sistema de medição criado, captar todos os picos de aceleração.

Gráfico 2 – Validação do sistema de medição



Fonte: Elaborado pela autora.

A incerteza desse sistema de medição é calculada na secção 5.4 desse trabalho, utilizando dados adquiridos nesse ensaio laboratorial realizado no itt Fuse.

3.3 Procedimento para Coleta de Dados

Para realizar as medições das acelerações no volante, através de ensaios experimentais, o sensor é fixado ao volante do veículo, como visto na Fotografia 6, por meio de fita isolante. A adoção da fita isolante visa não danificar o sensor pelo fato da elasticidade da fita em comparação a outros meios de fixação, como abraçadeiras, e ao mesmo tempo ser o mais rígida possível, para minimizar os efeitos vibracionais relacionados à fixação do acelerômetro, conforme solicitado na norma NHO 10 (2013).

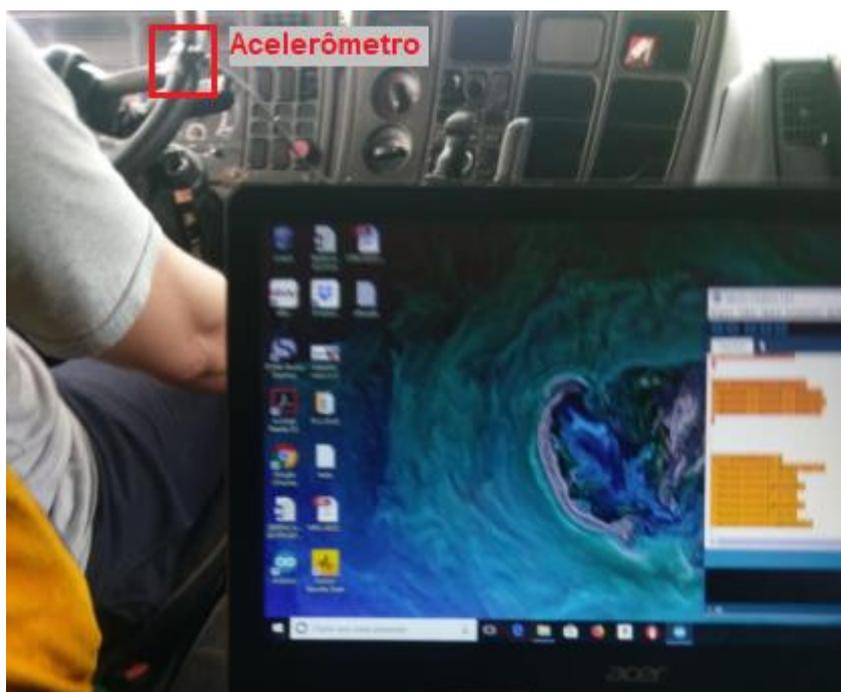
Fotografia 6 – Fixação do acelerômetro



Fonte: Registrada pela autora.

Para realização da coleta de dados experimentais existem dois pontos possíveis para a fixação do acelerômetro, sendo eles os locais de *pega* no volante de cada uma das mãos, pois segundo o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) o condutor deve ter as duas mãos no volante ao dirigir. Segundo a NHO 10 (2013), sendo o volante simétrico e tendo o mesmo raio de distância, da fonte de excitação em ambas as mãos, espera-se ter o mesmo valor (ou com diferença irrelevante) de aceleração em ambas as mãos. Assim, é possível optar por qual das mãos usar para as medições, de forma a escolher o ponto que apresentar maior facilidade de fixação do acelerômetro e onde a fixação e a fixação causarem menor interferência na condição real de operação do veículo. Escolheu-se então fixar o acelerômetro no ponto de apoio da mão direita, devido ao fato de que o computador utilizado na coleta de dados localiza-se na parte central da cabine, conforme ilustrado na Fotografia 7.

Fotografia 7 – Local de fixação do acelerômetro



Fonte: Registrada pela autora.

Antes de iniciar os testes, mede-se a aceleração no volante, depois na etapa de trabalho dos dados, essa aceleração deve ser descontada de cada um dos dados coletados. Definiu-se realizar os testes em pista asfáltica, a medição em um trecho de 100 metros a velocidade constante, mantendo uma distância fixa de 2 metros do meio fio (para obter-se um perfil de pista similar em cada uma das amostras). Um trecho de 50 metros antes da área de medição e outro também de 50 metros após área de

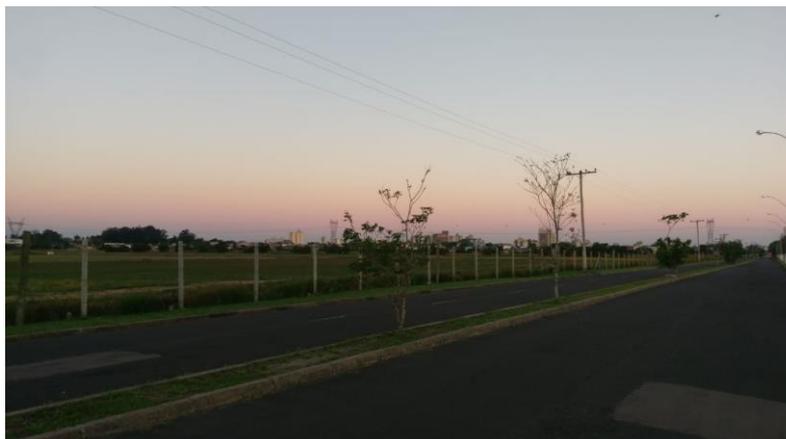
medição devem ser identificados e utilizados como áreas para aceleração e frenagem, trechos estes não considerados nesse estudo, pois essas condições (aceleração e frenagem) compõe uma pequena parte da rotina dos caminhoneiros. O local escolhido para a realização dos testes foi a Avenida Bonifácio Carvalho Bernardes, na cidade de Cachoeirinha-RS, ilustrada nas Fotografias 8 e 9. A escolha dessa via deu-se devido a mesma ser na cidade onde fica o cavalo mecânico utilizado, o baixo fluxo de veículos, a marcação já existente de trechos de 100 metros de distância ao longo da via, de um meio fio bem claro (recentemente pintado de branco) sendo um ponto de referência para replicar a passagem sobre o mesmo trecho de asfalto e da possibilidade de retornar o veículo para a posição inicial em marcha ré após cada passagem. Este último item é de suma importância, visto que para uma manobra de retorno seria necessário o total esterçamento do volante, o que implicaria em ter que desmontar a fixação do MPU-6050 do volante a cada amostra.

Fotografia 8 – Pista de testes (coleta de dados preliminar)



Fonte: Registrada pela autora.

Fotografia 9 – Pista de testes (coleta de dados estudo de caso)



Fonte: Registrada pela autora.

Duas coletas de dados são realizadas. A primeira coleta de dados realizada é denominada *preliminar* e contém 30 amostras, compostas por 10 repetições em cada uma das velocidades em que a vibração será analisada (40, 60 e 80 km/h) abrangendo as faixas de velocidades permitidas, contidas na resolução 396 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Essa coleta serve para definir em qual das velocidades as maiores acelerações são encontradas e qual é a faixa de amplitude das acelerações máximas transmitidas pelo volante.

A segunda coleta de dados é denominada *do estudo de caso* e é realizada nas mesmas condições da coleta de dados preliminar, porém com duas diferenças: é realizada apenas na velocidade em que se obteve as maiores acelerações na coleta de dados preliminar e supõe-se o uso de 23 amostras (para um erro relativo amostral pequeno, menor do que 2,5%). Os dados obtidos na coleta de dados do estudo de caso são os analisados e estudados neste trabalho, a coleta de dados preliminar é apenas uma preparação para a coleta de dados do estudo de caso.

4 ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo são apresentados os tópicos relacionados aos ensaios experimentais, preliminar e do estudo de caso. E, também as condições e formas de funcionamento (programação) do *software* MATLAB, para que o modelo matemático reproduza as condições do ensaio experimental e posteriormente busque a otimização de parâmetros de projeto do volante, que minimize a aceleração vertical RMS transmitida pelo mesmo.

4.1 Dados dos Ensaio Experimentais

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios experimentais, preliminar e do estudo de caso, e analisada a influência dos mesmos nos próximos passos deste trabalho.

4.1.1 Ensaio Preliminar

A coleta de dados preliminar foi realizada, de acordo com a metodologia descrita na seção 3.3 deste trabalho. A aceleração no eixo z em repouso, medida antes da realização da coleta de dados preliminar, teve o valor de 1,01 g (sendo g uma unidade de medida para aceleração que equivale a $9,80665 \text{ m/s}^2$). Posteriormente, na etapa de trabalho dos dados, essa aceleração é descontada de cada um dos dados coletados.

De acordo com a Tabela 1, verifica-se que a maior aceleração RMS, foi obtida na velocidade de 60 km/h, sendo por esse critério, essa a velocidade utilizada no estudo de caso deste trabalho.

Tabela 1 – Acelerações RMS ensaio preliminar

Velocidade do ensaio (km/h)	Média da aceleração RMS (g)
40	0,22
60	0,43
80	0,39

Fonte: Elaborada pela autora.

Esta coleta de dados nos fornece também, a informação de que a aceleração máxima captada não chega a 2g (aceleração do volante + aceleração da gravidade), dado esse importante para parametrização do acelerômetro que pode estar configurado para quatro diferentes acelerações máximas (2g, 4g, 8g e 16g).

4.1.2 Ensaio do Estudo de Caso

A coleta de dados do estudo de caso foi realizada, de acordo com a metodologia descrita na seção 3.3 deste trabalho. A aceleração no eixo z em repouso, medida antes da realização da coleta de dados preliminar, teve o valor de 1,01 g. Sendo na etapa de trabalho dos dados, essa aceleração descontada de cada um dos dados coletados.

Conforme a metodologia propõe-se a aplicação de 23 amostras coletadas na velocidade constante de 60 km/h. Isso indica que o erro amostral para um intervalo de confiança de 95% é de 2,315% com base no desvio padrão amostral dos dados da Tabela 2, a seguir:

Tabela 2 – Acelerações RMS ensaio do estudo de caso

(continua)

Número da Amostra	Valor da Aceleração RMS (m/s ²)
1	3,64
2	4,43
3	3,08
4	3,93
5	4,52
6	6,29
7	4,25
8	4,11
9	3,99
10	4,11
11	3,03
12	4,50
13	3,21

(conclusão)

Número da Amostra	Valor da Aceleração RMS (m/s²)
14	3,98
15	3,51
16	3,49
17	3,29
18	3,06
19	4,08
20	3,26
21	2,82
22	2,50
23	3,24

Fonte: Elaborada pela autora.

Para a classificação em relação a NHO 10 (2013) e validação do modelo numérico (do MATLAB), é utilizada a aceleração RMS média dessa coleta de dados do estudo de caso, que é 3,76 m/s². Já para as otimizações numéricas são avaliados os dois piores casos, ou seja, as amostras com a maior aceleração RMS, sendo essas as amostras 6 e 12.

4.2 Considerações e Hipóteses do Modelo Analítico e Numérico

O modelo veicular objeto de estudo desse trabalho é baseado no plano, com interesse no estudo da arfagem e assume algumas considerações e hipóteses:

- a) pequenos deslocamentos;
- b) o sistema é linear;
- c) os pneus estão em contato pontual com a pista;
- d) os parâmetros são concentrados, lineares e atendem o regime elástico do material;
- e) o sistema é arranjado em um sistema linear de equações.

Devido a consideração de contato entre os pneus e a pista ser pontual, as irregularidades com comprimentos de onda contidos nesta zona considerada não têm influência na medição. Desta forma, a área de contato é infinitesimal e absorve a menor irregularidade possível dentro de um comprimento de onda. Não sendo isso um problema, devido ao fato de o foco desse estudo ser o volante e não os pneus.

O sistema linear é resolvido pelo método de Newmark (o qual considera intervalos de tempo de integração fixos e iguais). Foi tomado o cuidado de coletar e tratar os dados experimentais para intervalos de tempo fixos e iguais justamente para corroborar o método de Newmark (e facilitar o cálculo numérico).

A consideração de o sistema ser linear, resolvido por meio do Método de Integração de Newmark, com a hipótese de pequenos deslocamentos, implica diferenças entre o modelo analítico e numérico e os dados coletados experimentalmente.

Para a validação entre o modelo numérico e o experimental, parte-se dos valores RMS das acelerações verticais coletadas no volante e dos respectivos valores RMS das acelerações verticais calculadas pelo modelo numérico. A fonte de excitação para essa validação são as acelerações verticais incidentes no volante, as quais foram coletadas no ensaio para coleta de dados do estudo de caso. A partir dessa fonte de excitação, o modelo numérico calcula, por meio do método de integração de Newmark, os valores da aceleração, levando em consideração os demais parâmetros do modelo, incluindo as rigidezes, os amortecimentos e as massas concentradas nos outros graus de liberdade do modelo.

Resta, então, o questionamento: como obter e estimar os parâmetros do modelo numérico que não estão em catálogos do fabricante? Estes parâmetros podem ser enquadrados em um limite mínimo e máximo, obtidos na literatura e por métodos tradicionais de medição (como a medição direta por meio de uma balança).

Os parâmetros iniciais no modelo numérico foram reunidos por intermédio de medição direta (para as massas concentradas do sistema) e pela literatura (para a aproximação das rigidezes e dos amortecimentos), conforme coletado em Ajovalasit e Giacomini (2007), Szczotka (2011), Campos e Souza (2014), e Forberg e Möller (2015). Uma investigação mais apurada para fazer a estimativa desses parâmetros geralmente utiliza o método de inferência bayesiana, o que foge do escopo deste trabalho.

A partir desses limites mínimos e máximos, é possível, então, realizar uma otimização numérica cujo objetivo é minimizar a aceleração RMS no volante e determinar (calcular) os parâmetros que não estão em catálogos ou facilmente disponíveis, definido assim qual seriam os valores de rigidez do volante, e suporte e barra ligados a ele, para garantir a aceleração RMS seja a menor possível dentro das condições estudadas e experimentadas no pior caso.

Como se garante que a simulação numérica em MATLAB e as respectivas medições experimentais estão coerentes com o comportamento real do problema? Calcula-se o RMS da aceleração medida no volante e faz-se a diferença desse valor em relação ao RMS da aceleração calculada no volante pelo modelo numérico (obtendo dessa forma o erro relativo). À medida que o erro relativo for menor, mais próximo da realidade o procedimento de análise fica.

4.3 Método de Integração de Newmark

O Método de Integração de Newmark baseia-se em que a aceleração varia linearmente entre dois instantes de tempo, considerando a condição de equilíbrio no instante atual $t+\Delta t$ para obter a solução nesse mesmo instante (RAO, 2008). Este método assume que o intervalo de tempo Δt é fixo para obter o vetor atualizado de deslocamentos, velocidades e acelerações a partir de um vetor inicial de acelerações. Esses vetores (deslocamento x_{i+1} e velocidade \dot{x}_{i+1}) pelas expressões a seguir:

$$\ddot{x}_0 = M^{-1}(F_0 - C\dot{x}_0 - Kx_0) \quad (20)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + [(1 - \beta)\ddot{x}_i + \beta\ddot{x}_{i+1}]\Delta t \quad (21)$$

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x}_i\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\ddot{x}_i + \alpha\ddot{x}_{i+1}\right](\Delta t)^2 \quad (22)$$

Onde os parâmetros α e β regulam, respectivamente, a influência do vetor de acelerações e do vetor de velocidades na resposta do sistema. Nesse sentido, esses parâmetros intrínsecos do método representam a precisão e a estabilidade do mesmo (RAO, 2008).

O valor da aceleração \ddot{x}_{i+1} é obtido no instante $t = t_{i+1}$ tal que

$$M\ddot{x}_{i+1} + C\dot{x}_{i+1} + Kx_{i+1} = F_{i+1} \quad (23)$$

e, substituindo as equações (21) e (22) na Eq. (23), tem-se

$$\begin{aligned} x_{i+1} = & \left[\frac{1}{\alpha (\Delta t)^2} M + \frac{\beta}{\alpha \Delta t} C + K \right]^{-1} \\ & \times \left(F_{i+1} + M \left(\frac{1}{\alpha (\Delta t)^2} x_i + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{x}_i + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{x}_i \right) \right. \\ & \left. + C \left(\frac{\beta}{\alpha \Delta t} x_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \dot{x}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}_i \right) \right) \end{aligned} \quad (24)$$

e atualizam-se os vetores de velocidade e aceleração para:

$$\ddot{x}_{i+1} = \frac{1}{\alpha (\Delta t)^2} (x_{i+1} - x_i) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{x}_i - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{x}_i \quad (25)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + (1 - \beta) \ddot{x}_i \Delta t + \beta \ddot{x}_{i+1} \Delta t \quad (26)$$

O Método de Newmark pode ser entendido na forma de um pseudocódigo, dado a seguir:

Figura 13 – Pseudocódigo do método de *Newmark*

1) Preparação

Determine \ddot{x}_0 , usando a Eq. (20) a partir dos valores de \dot{x}_0 e x_0 ;

Defina o tempo da análise, t .

2) Ajuste

Selecione valores adequados de Δt , α e β .

3) Vetor de deslocamento atualizado

Calcule x_{i+1} para $i = 0$, usando a Eq. (24).

4) Vetor de velocidade e aceleração atualizados

Calcule os valores de \dot{x}_{i+1} e \ddot{x}_{i+1} , usando respectivamente as equações (25) e (26).

5) Finalização

Se $t = t_{m\acute{a}x}$, então finaliza; Do contrário, ajuste $i = i + 1$ e retorne ao passo 3.

Fonte: Rao (2008).

Segundo Rao (2008), se o β não for $\frac{1}{2}$, o Método de Newmark introduz um efeito de amortecimento proporcional a $\beta - \frac{1}{2}$. Se o β for assumido igual à zero, o amortecimento é negativo; se ele for maior que $\frac{1}{2}$, torna-se positivo. Dentro dessa faixa, o método é estável para valores de $\alpha \geq (\beta - \frac{1}{2})^2$ e de $\beta \geq \frac{1}{2}$ incondicionalmente.

4.4 Função Objetivo e Restrições

A função objetivo f_{obj} do problema de otimização do volante permite encontrar o vetor de soluções otimizado, x_{opt} , que é constituído pelas variáveis de projeto (a saber, k_1 , k_2 e k_3 , respectivamente, as rigidezes do volante, da barra e do suporte), ao minimizar o valor RMS da aceleração vertical no volante. Diante desse problema, as restrições de projeto podem ser reunidas em um vetor que contém os limites mínimos e máximos das variáveis de projeto e também os limites mínimos e máximos de velocidade permitidos (condição de contorno de Dirichlet). Portanto, formula-se o seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} & \text{Encontrar } \mathbf{x}_{opt} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T \\ & \text{para } \min_x f_{obj} = \ddot{x}_1 \\ & \text{sujeito à } \begin{cases} 1,00 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}} \leq k_1 \leq 2,00 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \\ 1,60 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}} \leq k_2 \leq 3,10 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \\ 8,00 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}} \leq k_3 \leq 1,60 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \\ v = 60,0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \text{ mantida constante} \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

Onde \mathbf{x}_{opt} é o vetor das variáveis de projeto, descrito pelas rigidezes do volante, da barra e do suporte, dados em N/m; f_{obj} é o valor RMS da aceleração vertical no volante do modelo, dado em m/s^2 ; e v é a velocidade longitudinal do veículo, em km/h. Os limites mínimos e os limites máximos das restrições são baseados nos valores encontrados em Campos e Souza (2014) e aproximados pelas frequências naturais das partes do volante, conforme Şendur, Kurtdere e Akaylar (2016).

Abaixo, um quadro com os dados técnicos, inseridos no MATLAB e as justificativas em relação a fonte de cada um deles.

Quadro 4 – Dados de entrada no MATLAB

Dado	Sigla	Unidade	Valor	Justificativa
N° de graus de liberdade do sistema	ngdl	-	10	Modelagem do cavalo mecânico, conforme Figura 8
Velocidade longitudinal	Vel	m/s	16,67	Velocidade dentro dos limites do CONTRAN, em que foram obtidas as maiores acelerações em ensaio experimental (60km/h)
Massa do volante	m_1	kg	3.1	Mediu-se
Massa do suporte do volante	m_2	kg	8.3	Dado fornecido (medido) por um funcionário de uma concessionária Scania
Massa da barra do volante	m_3	kg	5.5	Mediu-se
Massa da cabine	m_4	kg	1589	Massa frontal – Massa traseira – Massa motor (Especificação Técnica Scania, 2014)
Massa do chassi	m_5	kg	2914	Massa total – Massa da suspensão dianteira – Massa da Suspensão traseira – Massa da Cabine – Massa do motor (Especificação Técnica Scania, 2014)
Massa da suspensão dianteira	m_6	kg	954	Massa da suspensão traseira – massa de duas rodas = ~30 kg cada, pois na frente é rodado simples, e atrás duplo. (Especificação Técnica Scania, 2014)
Massa da suspensão traseira	m_7	kg	1014.0	Massa cavalo toco - cavalo trucado (Especificação Técnica Scania, 2014)
Massa do motor	m_8	kg	1141	Peso do motor 1050 + ((40/1000)*900) = massa óleo + 55 litros de água = massa de refrigerante do motor (Scania Power Generation Engines)
Massa total do cavalo	M_t	kg	7612.0	Especificação Técnica Scania, 2014
Rigidez do volante	k_1	N/m	370208,86	$m_1*(2*\pi*55\text{Hz})^2$ - Adaptado de Şendur, Kurtdere e Akaylar (2016)
Rigidez do suporte do volante	k_2	N/m	314891,70	$m_2*(2*\pi*31\text{Hz})^2$, (Şendur, Kurtdere e Akaylar, 2016)
Rigidez da barra do volante	k_3	N/m	158288,72	$m_3*(2*\pi*27\text{Hz})^2$, (Şendur, Kurtdere e Akaylar, 2016)
Rigidez da cabine	k_4	N/m	23480	Campos e Souza, 2014

Rigidez da suspensão dianteira	k_6	N/m	178500	Campos e Souza, 2014 (adaptada por GILLESPIE, 1992)
Rigidez da suspensão traseira	k_7	N/m	535500	Campos e Souza, 2014 (adaptada por GILLESPIE, 1992)
Rigidez do motor	k_8	N/m	18000	Giacosa, 1986
Rigidez do pneu dianteiro	k_{p6}	N/m	839000	Campos e Souza, 2014
Rigidez do pneu traseiro	k_{p7}	N/m	1250000	Campos e Souza, 2014 (adaptada por GILLESPIE, 1992)
Amortecimento do volante	c_1	N.s/m	0	Considera-se que a rigidez do volante é mais significativa que o amortecimento
Amortecimento do suporte do volante	c_2	N.s/m	0	Considera-se que a rigidez do suporte do volante é mais significativa que o amortecimento
Amortecimento da barra do volante	c_3	N.s/m	0	Considera-se que a rigidez da barra do volante é mais significativa que o amortecimento
Amortecimento da cabine	c_4	N.s/m	2500	Adaptado da base de dados do TruckSim (2018). Disponível em: https://www.carsim.com/products/trucksim/
Amortecimento da suspensão dianteira	c_6	N.s/m	3000	Campos e Souza, 2014
Amortecimento da suspensão traseira	c_7	N.s/m	6000	Campos e Souza, 2014
Amortecimento do motor	c_8	N.s/m	2000	Giacosa, 1986
Amortecimento do pneu estimado	c_p	N.s/m	0	Considera-se que a rigidez do pneu é mais significativa que o amortecimento
Momento de inércia de arfagem da cabine	I_4	kg.m ²	32x10 ³	Campos e Souza, 2014
Momento de inércia de arfagem do chassi	I_5	kg.m ²	48x10 ³	Campos e Souza, 2014
Distância entre o CG e o eixo dianteiro	a	mm	1550	Estipulado a partir do modelo de cavalo mecânico (Especificação Técnica Scania, 2014) e medida realizada no veículo
Distância entre o CG e o eixo traseiro (comprimento da balança)	b	mm	2000	Estipulado a partir do modelo de cavalo mecânico (Especificação Técnica Scania, 2014) e medida realizada no veículo

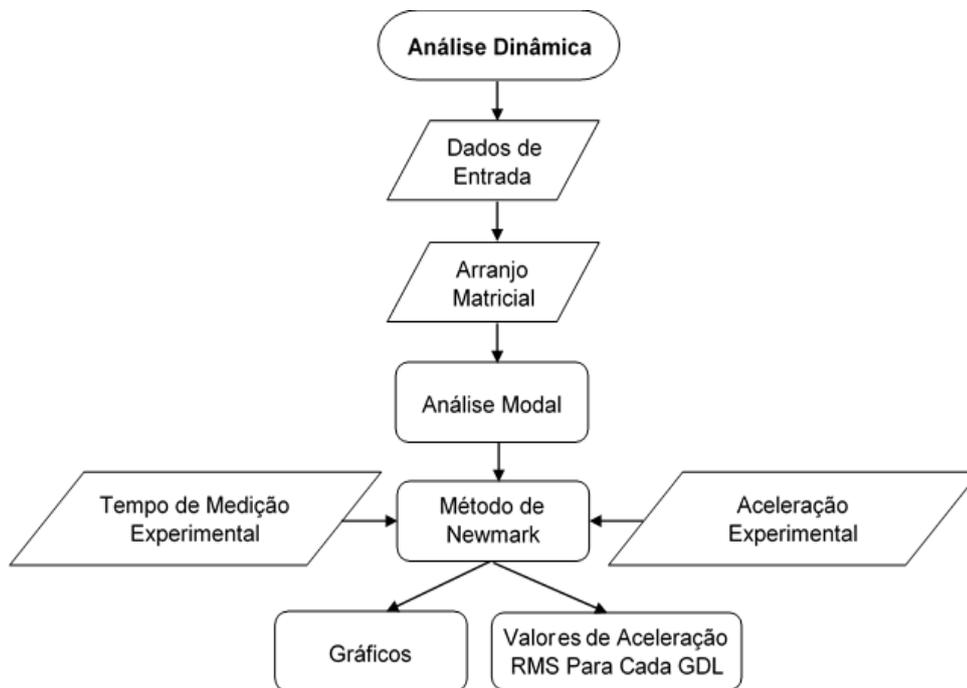
Distância entre o CG da cabine e a barra do volante	S	mm	1200	Estipulado a partir do modelo de cavalo mecânico (Especificação Técnica Scania, 2014) e medida realizada no veículo
Distância entre o CG da cabine e o CG do chassi	r	m	0,905	Estipulado a partir do modelo de cavalo mecânico (Especificação Técnica Scania, 2014) e medida realizada no veículo
Distância entre eixos do cavalo mecânico	w_{base}	mm	3550	a + b
Defasagem entre eixos	t_{def}	s	0,213	$t_{def} = w_{base}/Vel$

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Fluxogramas das Sub-rotinas

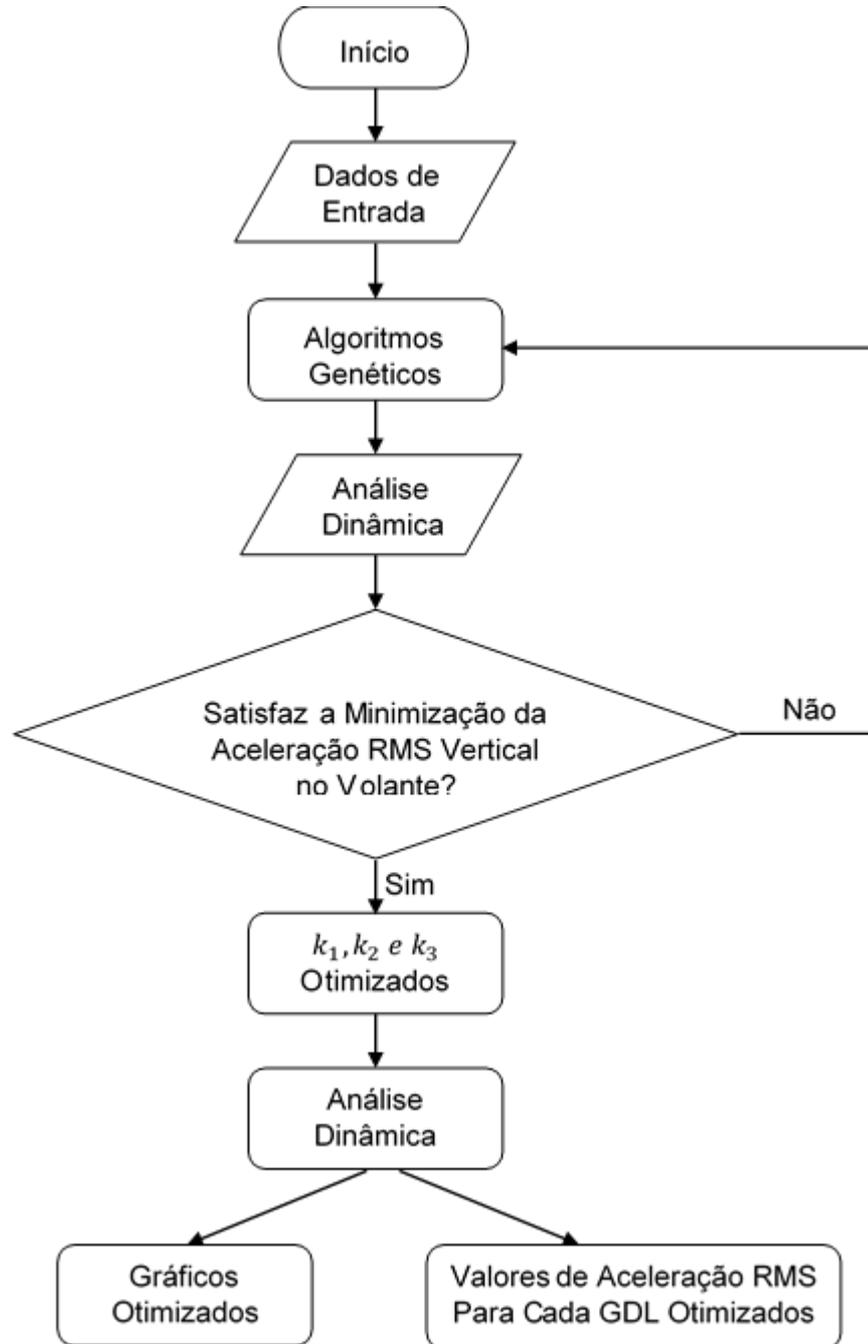
O fluxograma de chamada de cada uma das sub-rotinas do MATLAB está simplificado e ilustrado nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Fluxograma de análise



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 15 – Fluxograma de otimização



Fonte: Elaborada pela autora.

A análise dinâmica (Figura 14) inicia com a inserção dos dados de entrada (variáveis de projeto – Quadro 4) e das matrizes de massa (Figura 10), de amortecimento (Figura 11), de rigidez (Figura 9), do vetor força de gravidade (\mathbf{F}_g), de deslocamento estático inicial ($\mathbf{U}_g = (\mathbf{F}_g/\mathbf{K})^T$) e de rigidez elástica para a fonte de excitação (\mathbf{K}_e), estando essas três últimas disponíveis no Apêndice A. A análise modal, a partir dos dados inseridos, permite encontrar as frequências naturais do

sistema. Através da análise modal, do tempo de medição experimental e do valor de aceleração RMS experimental, o sistema resolve o método de integração de Newmark (explicado na seção 4.3), e gera os gráficos de resultados e o valor da aceleração RMS desse sistema, que é comparado com o valor de aceleração RMS encontrado nos ensaios experimentais. A partir dessa comparação obtém-se o erro relativo, e dependendo da magnitude do mesmo, dados de entrada podem ser ajustados, para que essa diferença seja a mínima possível.

Para verificar quais os valores de rigidezes do volante, e suporte e barra ligados a ele, resultam no menor valor de aceleração RMS, o programa chama a sub-rotina de otimização (Figura 15), que inicia com a inserção dos dados de entrada (variáveis de projeto – Quadro 4), após chama o algoritmo de otimização genéticos (explicado na seção 2.2), a análise dinâmica (explicada no parágrafo anterior) e verifica se o valor de aceleração RMS encontrado satisfaz a minimização da aceleração RMS vertical no volante. Se não, ele roda esse fluxo novamente desde a parte que chama o algoritmo de otimização genéticos, e se sim, ele apresenta os parâmetros otimizados (k_1, k_2 e k_3) e os demais resultados também otimizados (gráficos e o valor da aceleração RMS).

4.6 Critérios de Convergência

Os critérios de convergência aplicados no algoritmo para realizar a parada são dados pelo coeficiente de variação, CV, obtido pela razão entre o desvio padrão e o valor médio da função objetivo calculada, menor do que uma tolerância, e pela diferença entre duas avaliações consecutivas da função objetivo a cada iteração, menor do que uma tolerância (isso permite contornar o problema de flutuação em torno do ótimo global da função objetivo e evita que o algoritmo tenha divergência). Se o limite máximo de iterações for atingido, o algoritmo é interrompido. Os três critérios, em conjunto, formam a convergência numérica do algoritmo, dados pelas equações (28), (29) e (30), a seguir:

$$CV = \frac{\sigma_{fobj}}{\mu_{fobj}} < 10^{-12} \quad (28)$$

$$\|f_{obj}^{i+1} - f_{obj}^i\| < 10^{-12} \quad (29)$$

$$i_{m\acute{a}x} \leq 1000 \tag{30}$$

Onde CV é o coeficiente de variação (adimensional), $\sigma_{f_{obj}}$ é o desvio padrão da função objetivo avaliada, $\mu_{f_{obj}}$ é a média da função objetivo avaliada, $i_{m\acute{a}x}$ é o número máximo de iterações, f_{obj}^{i+1} é a função objetivo, avaliada na $i+1$ ésima iteração, e f_{obj}^i é a função objetivo, avaliada na i -ésima iteração.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios experimentais, dos ensaios numéricos (análise e otimização), da classificação das condições em relação a NHO 10 (2013) e a incerteza do sistema de medição utilizado.

5.1 Discussão dos Resultados Experimentais

Durante a coleta de dados experimentais, algumas dificuldades e oportunidades de melhorias foram encontradas. Parte dessas foram analisadas e contornadas após a coleta de dados preliminar, outra parte, assumiu-se como limitações do projeto.

Inicialmente, destaca-se o fato de o veículo objeto de estudo desse projeto, ser de uso comercial e fazer parte de operações logísticas. Esse fato foi limitante para a disponibilidade do mesmo para a realização dos ensaios, alterando por vezes o cronograma do projeto.

A fixação do sistema de medição ao volante, limita o esterçamento do mesmo, devido aos fios que ligam o sensor a placa de aquisição de dados enroscarem no corpo do volante. Tornando esse item, um limitante em relação à necessidade de retornar o veículo à posição inicial após cada amostragem. Devido as condições da pista escolhida para a realização dos testes, foi possível realizar esse retorno a posição inicial em marcha ré.

Uma das premissas deste trabalho é a realização dos ensaios a velocidades constantes, na prática porém, percebeu-se dificuldades para reproduzir esse parâmetro. Na busca de formas para contornar essa dificuldade, optou-se por disponibilizar um percurso maior para aceleração do veículo até atingir a velocidade estipulada.

Há uma indução ao erro em função da falta de sincronia entre o início e fim da área de medição e a ativação do gatilho de medição. Buscou-se a minimização desta interferência por meio de uma demarcação o mais clara possível, para que a mesma fosse de fácil identificação ao operador do software de aquisição de dados.

As variáveis acima citadas interferem diretamente nos resultados obtidos, ampliando as margens de erro deste trabalho. É de suma importância a identificação

e análise dessas variáveis, para que suas consequências possam ser eliminadas ou, ao menos, minimizadas.

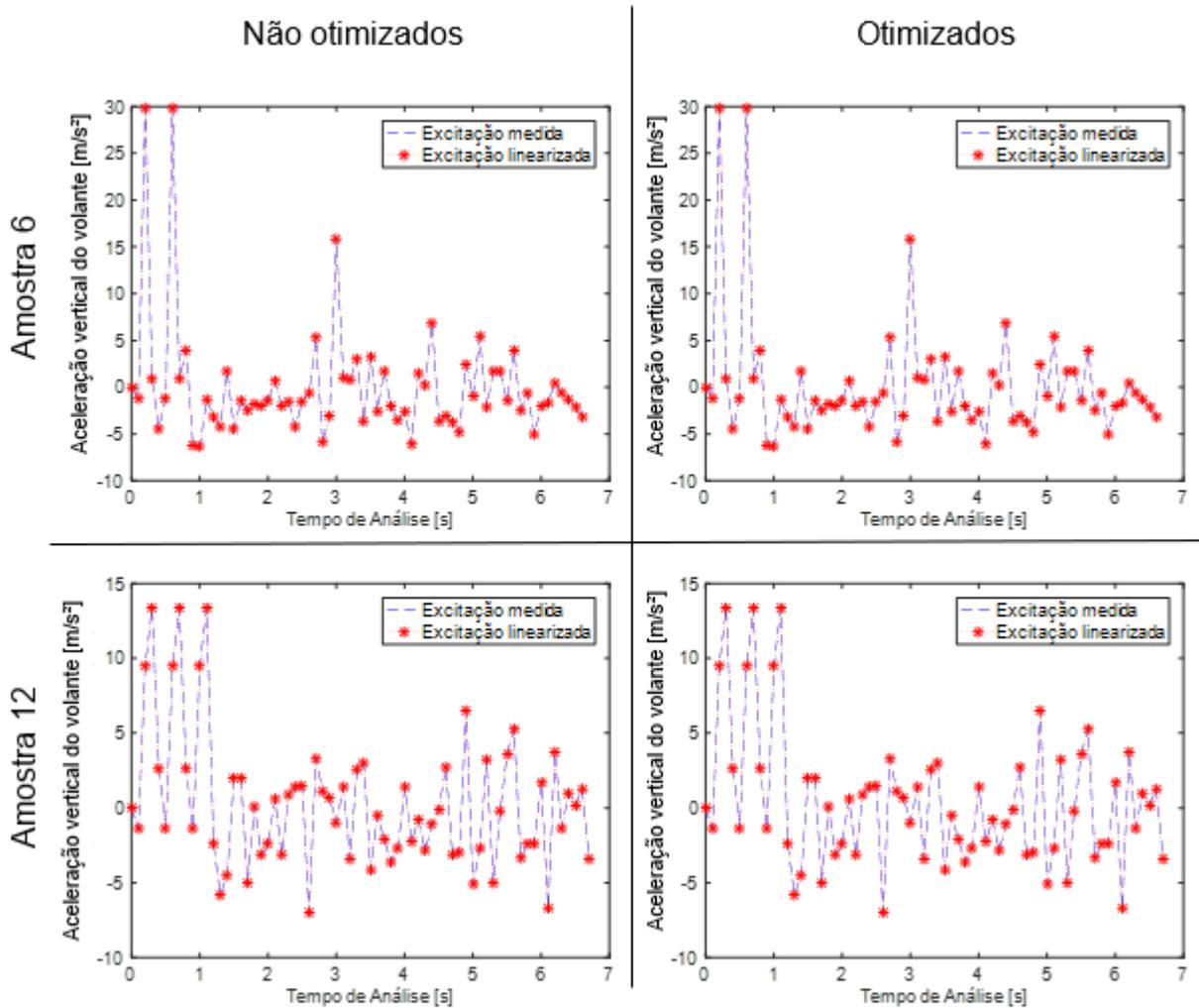
5.2 Discussão dos Resultados Numéricos

Seguem-se os resultados numéricos para as amostras 6 e 12 de 60 km/h, conforme já explicado (na subseção 4.1.2); escolheu-se essas duas amostras por apresentarem a maior aceleração RMS.

Nesta seção, cabe destacar que os valores de aceleração e deslocamentos obtidos para as amostras 6 e 12 apresentaram diferenças entre os valores mensurados para aceleração e deslocamento, sendo essa diferença obtida nos ensaios experimentais justificada como irregularidades apresentadas na pista. Uma vez que mantida a velocidade constante e a mesma marcha engrenada no veículo, a rotação do motor (fonte de excitação) permanece a mesma durante os testes (dentro das incertezas esperadas sobre o controle de velocidade do veículo).

Os gráficos a seguir, Figura 16, exibem a fonte de excitação medida e linearizada no MATLAB. A função de interpolação, *nearest*, do MATLAB conseguiu aproximar a curva com a do caso experimental de forma satisfatória porque o Δt de ambos foi fixo e idêntico (0,1 segundos). Em se tratando de ser a fonte de excitação do problema analisado, a Figura 16 foi utilizada tanto na análise pura quanto na otimização para cada amostra, certificando-se de que são os mesmos gráficos e, portanto, a mesma fonte de excitação numérica. As duas amostras se enquadram em um perfil Classe A, segundo a norma ISO-8606 (2016), uma vez que as duas coletas foram ensaiadas na mesma pista e nas mesmas condições de testes, um perfil de baixíssima irregularidade, podendo ser considerado quase liso.

Figura 16 – Gráficos da fonte de excitação experimental

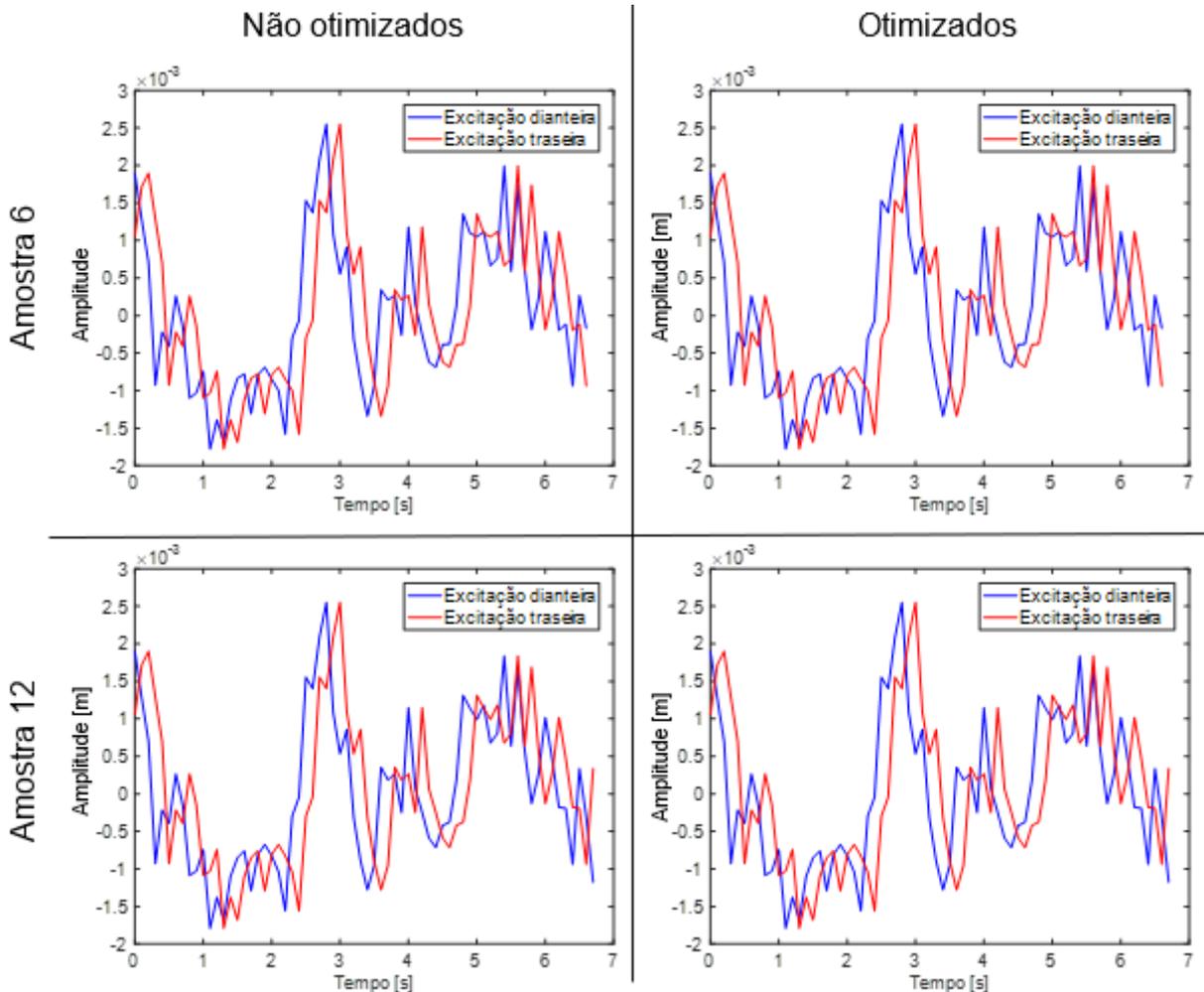


Fonte: Elaborada pela autora.

Os gráficos a seguir, Figura 17, simulam como seria o perfil de pista segundo a ISO-8606 (2016) a partir da fonte de excitação coletada experimentalmente no volante. Uma das vantagens da modelagem numérica por parâmetros concentrados foi justamente simular um perfil de pista a partir de acelerações coletadas no volante do sistema (de um corpo rígido em outra parte do sistema, propagando-se para as outras partes do sistema). Os quatro gráficos esboçados são praticamente idênticos, apesar do histórico de acelerações das amostras serem diferentes, porque o modelo de geração do perfil de pista conforme a ISO-8606 (2016) calculou dentro da mesma Classe (perfil A). É uma representação de um provável perfil de pista conforme a excitação captada no volante e, mais do que isso, ela está defasada entre a excitação dianteira e traseira. Isso evidencia que, a partir das medições no volante, pode-se utilizar o modelo analítico e numérico do cavalo-mecânico e também as orientações

da norma ISO-8606 (2016) para traçar um provável perfil de pista onde o veículo trafegou para fins de simulação numérica.

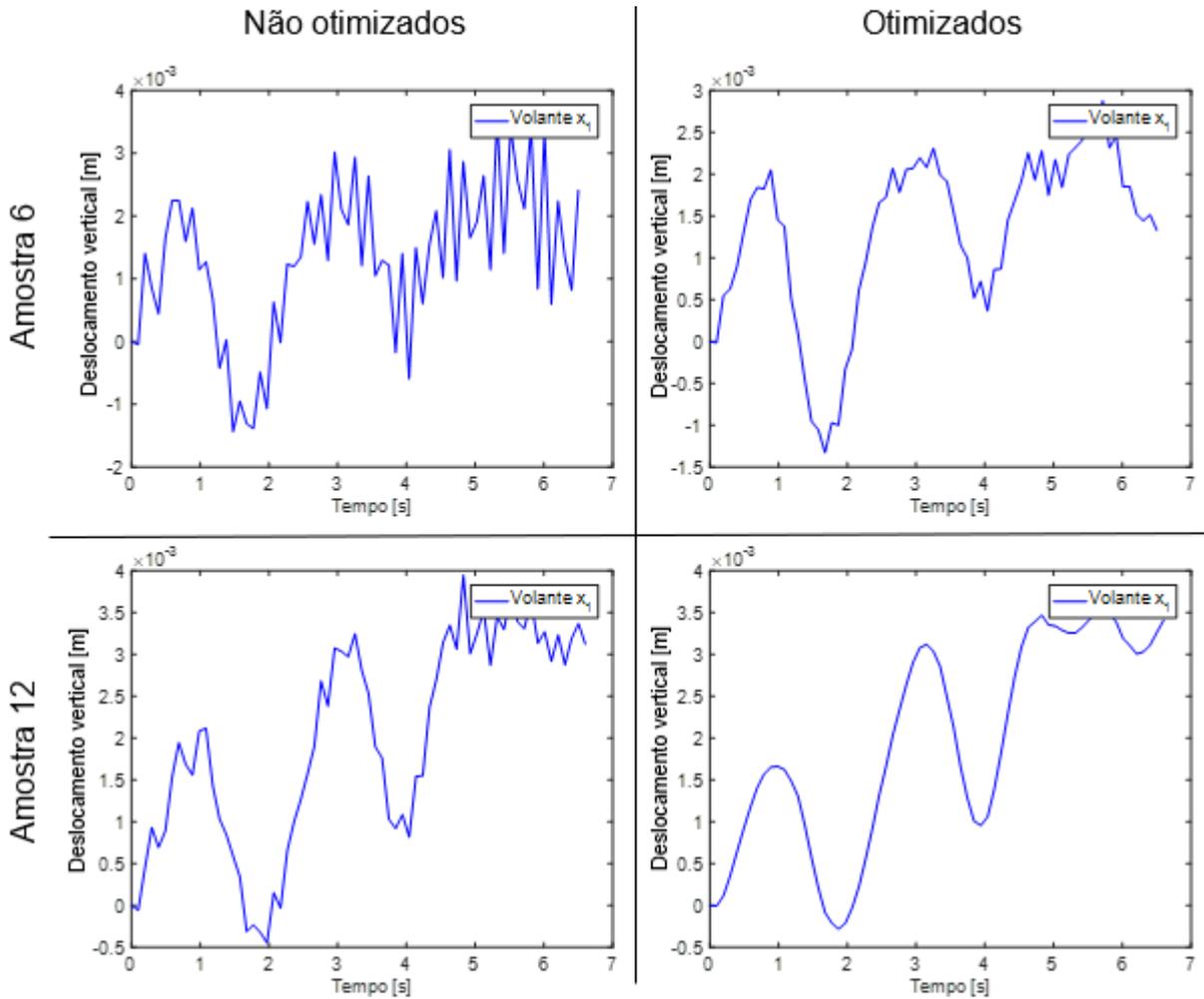
Figura 17 – Gráficos da fonte de excitação ISO-8606 (2016)



Fonte: Elaborada pela autora.

Os próximos gráficos, Figura 18, referem-se aos deslocamentos verticais do volante e são obtidos através da fonte de excitação em combinação com o perfil de pista simulado, reproduzindo numericamente os deslocamentos no volante. E comprovam a hipótese de que são pequenos deslocamentos (10^{-3}). A suavização das curvas obtidas (monotonicidade) manteve-se a mesma; porém, a composição das curvas foi diferente em função das acelerações captadas em cada amostra (a amostra 6 apresentou um histórico de acelerações mais severo do que a amostra 12). Após a otimização, em ambas amostras, a severidade nas curvas foi reduzida, deixando o histórico dos deslocamentos em uma curva mais suave.

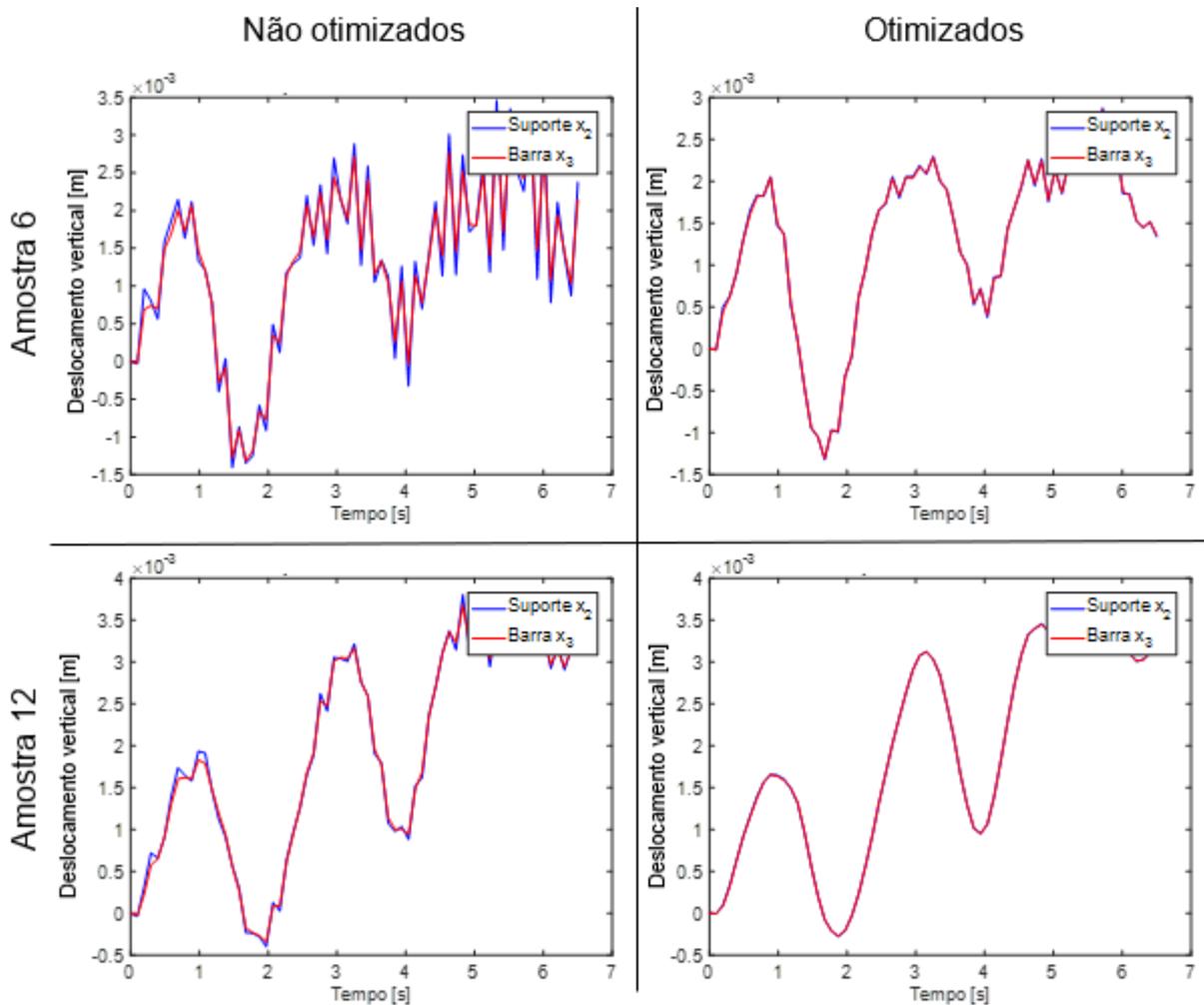
Figura 18 – Gráficos de deslocamento vertical no volante



Fonte: Elaborada pela autora.

Analogamente, o suporte e a barra seguem um deslocamento similar ao do volante; novamente, como resultado de uma combinação da fonte de excitação medida e da irregularidade da pista simulada, comprovando a hipótese inicial de pequenos deslocamentos. Nos gráficos resultantes da otimização, os deslocamentos verticais no volante ficaram mais delineados, como uma senoidal, mostrando como os valores ótimos de rigidez no sistema de direção podem tornar a curva mais suavizada.

Figura 19 – Gráficos de deslocamento vertical suporte e barra do volante



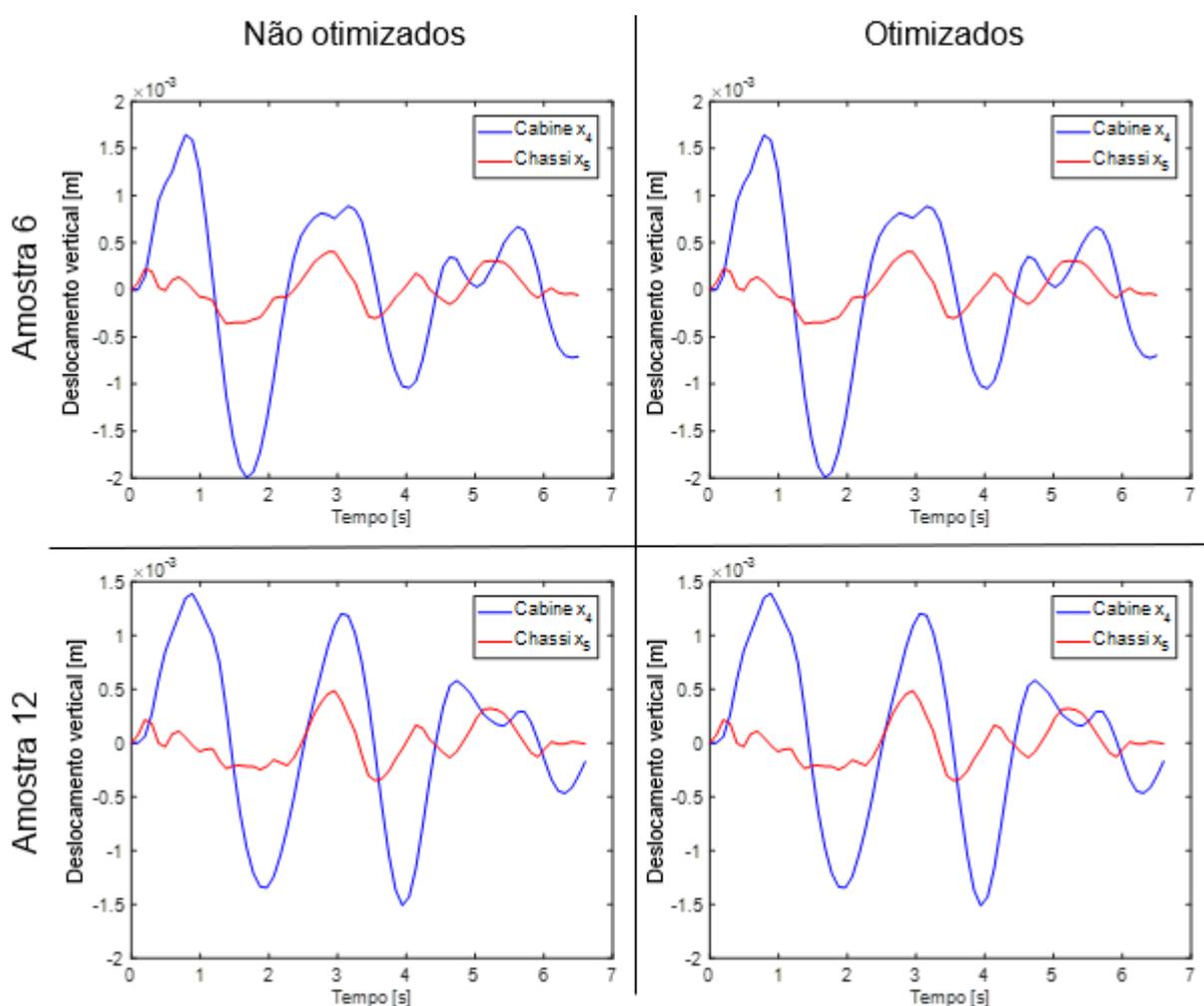
Fonte: Elaborada pela autora.

Os gráficos a seguir, Figura 20, pertinentes à cabine e ao chassi, representam os deslocamentos verticais no CG de cada parte e corroboram a hipótese de pequenos deslocamentos (10^{-3}). Vale ressaltar, que os movimentos mais bruscos quando se trafegou em linha reta durante a coleta de dados experimental foram justamente no início da aceleração do veículo (arrancada) e na frenagem do mesmo dos quais, conforme justificado na seção 3.3, os dados não foram computados.

Os gráficos traçados na Figura 20, tanto na análise pura não otimizada quanto na otimização subsequente, apresentaram praticamente o mesmo histórico. Isso ocorreu porque os parâmetros geométricos, inerciais e vibrações, bem como as dimensões e proporções da cabine e do chassi são relativamente superiores aos do volante. Por mais que o volante esteja otimizado, a sua influência na dinâmica do sistema para a cabine e para o chassi é muito pequena (a contribuição da diminuição

das acelerações no volante é irrelevante para a redução das acelerações na cabine e no chassi). Este resultado sugere que uma otimização levando em conta os parâmetros do chassi e da cabine certamente podem minimizar os efeitos de vibração no volante; contudo, o contrário não é tão significativo. Em casos onde o projeto do chassi e da cabine não pode ser modificado, a alteração dos parâmetros do volante é suficiente para minimizar as acelerações transmitidas ao punho do motorista.

Figura 20 – Gráficos de deslocamento vertical cabine e chassi

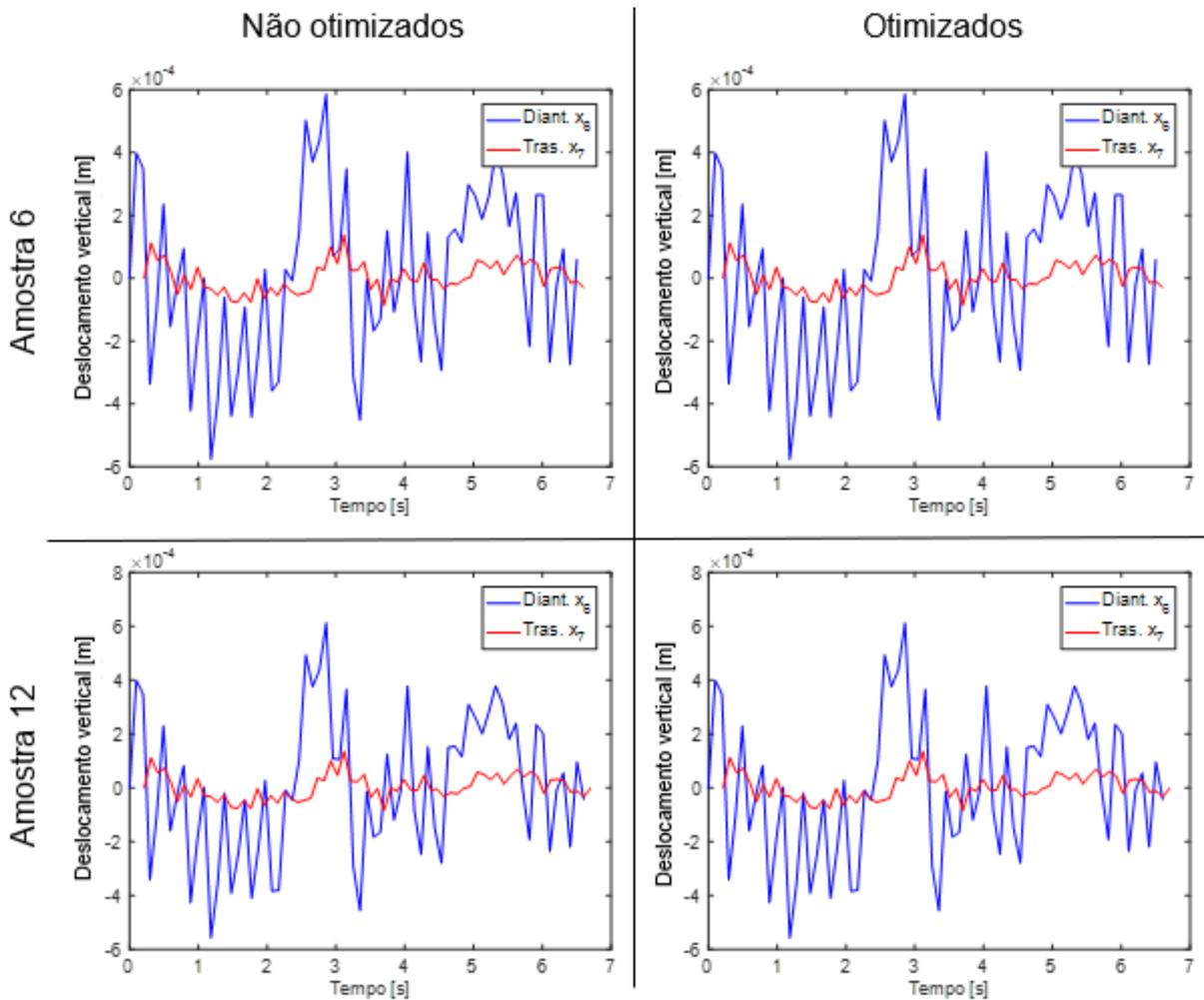


Fonte: Elaborada pela autora.

Os deslocamentos das suspensões, obtidos no modelo numérico, foram pequenos. As maiores magnitudes foram as das dianteiras, em virtude da sua rigidez ser muito menor que a traseira (CAMPOS; SOUZA, 2014). Os gráficos tanto na análise pura não otimizada quanto na otimização subsequente demonstraram que o histórico de deslocamento permaneceu praticamente o mesmo, corroborando o mesmo perfil

de pista e a irrelevância dos efeitos do volante sobre as suspensões do veículo. Analogamente ao que ocorreu na Figura 20, se a otimização fosse feita levando em consideração os parâmetros das suspensões do chassi, por exemplo, os efeitos no volante seriam alterados; porém, o processo contrário (alterar o volante na expectativa de modificar o histórico dinâmico nas suspensões) dificilmente ocorreria.

Figura 21 – Gráficos de deslocamento vertical suspensões dianteira e traseira

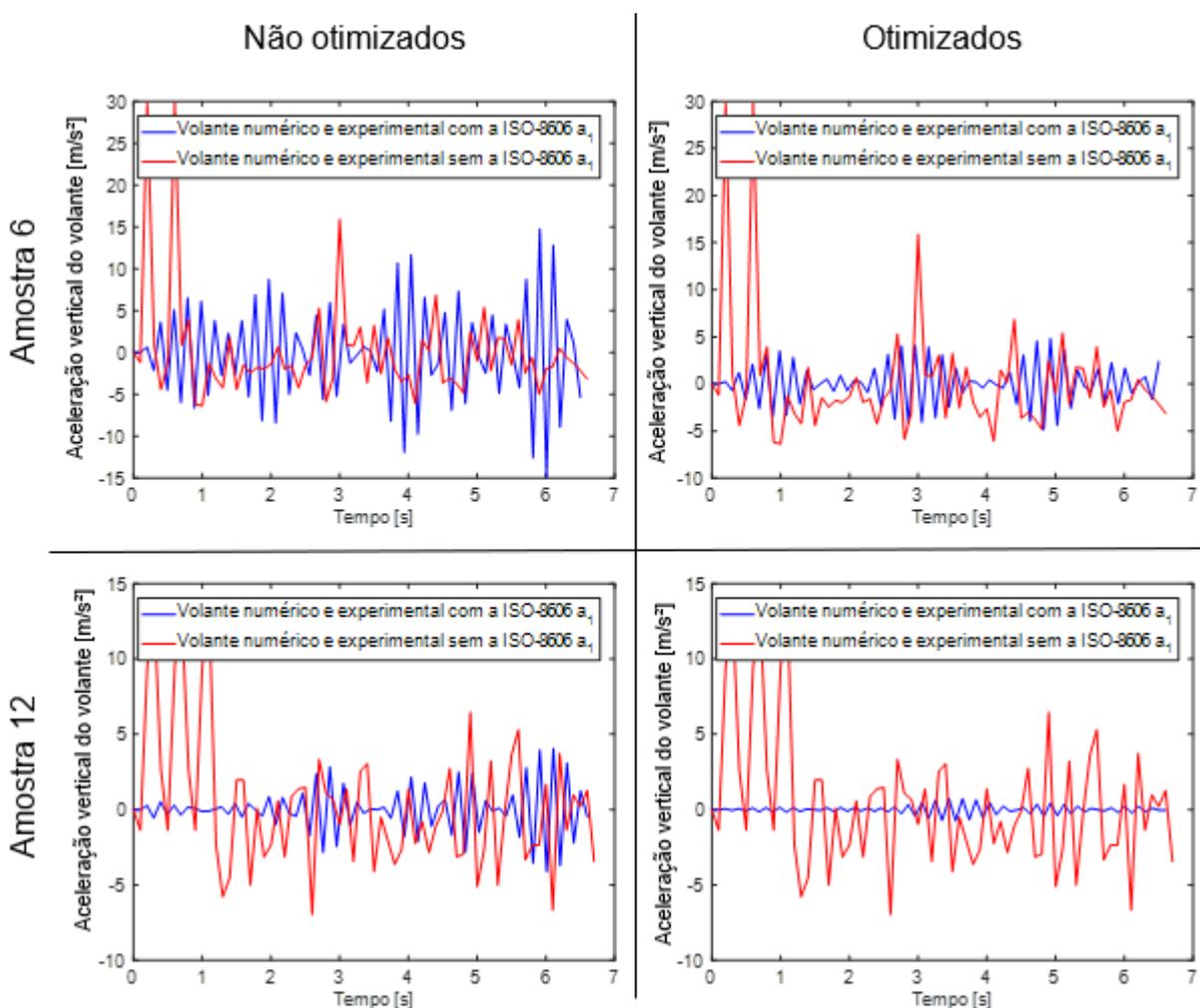


Fonte: Elaborada pela autora.

Os próximos gráficos, Figura 22, ilustram as acelerações obtidas no modelo numérico com base nos dados coletados experimentalmente. O gráfico em azul representa as acelerações no volante em termos da aceleração coletada no ensaio experimental e também leva em conta uma simulação do perfil de pista a qual o veículo foi submetido (Classe A). Já o gráfico em vermelho considerou única e exclusivamente as medições experimentais, sem tratar a ISO-8606 (2016)

numericamente, o que resultou num gráfico idêntico ao das acelerações, as quais foram medidas e linearizadas (ou seja, o primeiro gráfico, da Figura 16, fonte de excitação experimental). As acelerações apresentaram picos bastante elevados, em especial no início do movimento. No que diz respeito ao resultado otimizado na Figura 22, levando em consideração os efeitos do perfil de pista Classe A, as acelerações verticais no volante foram drasticamente minimizadas, sobretudo, na amostra 12.

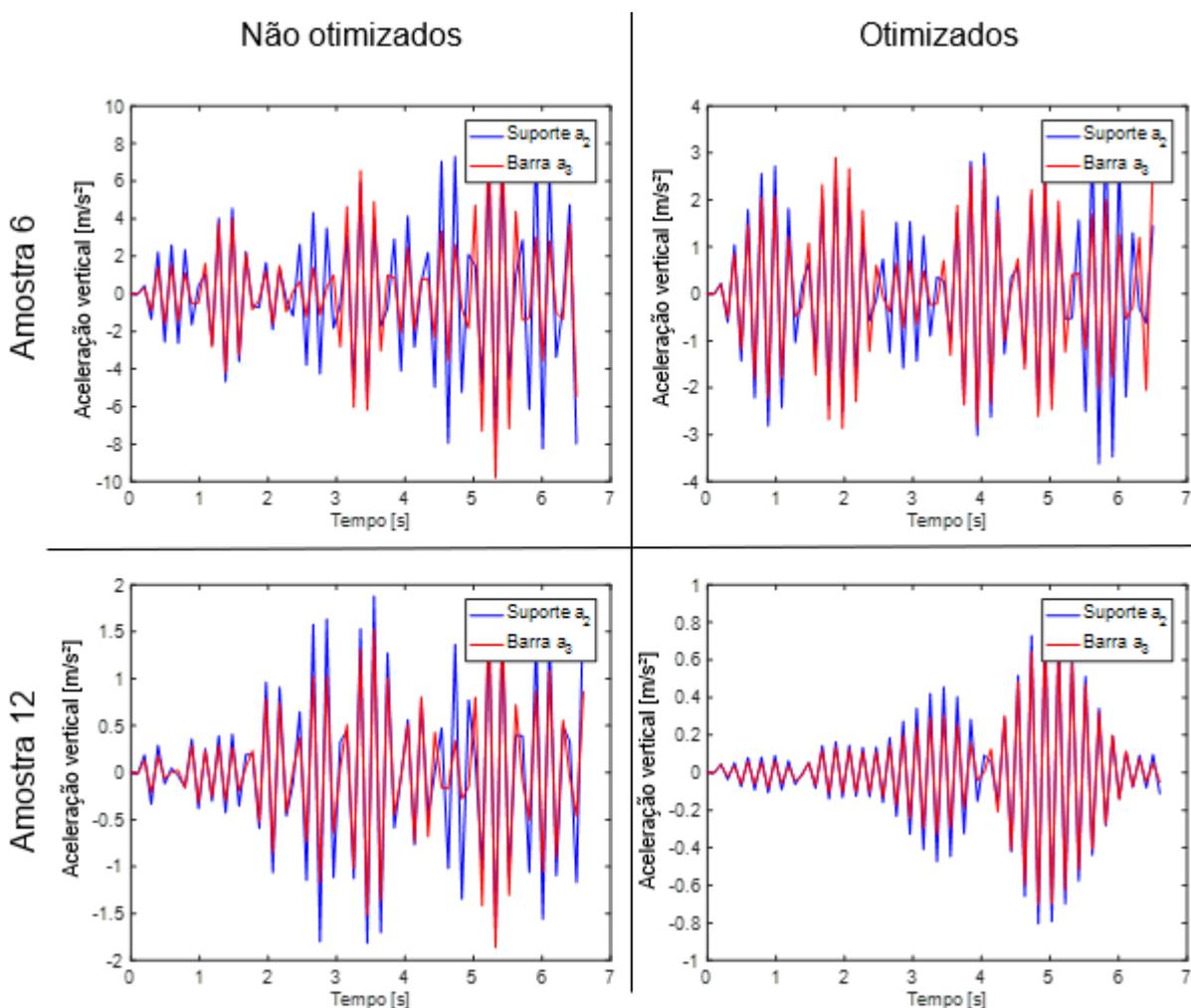
Figura 22 – Gráficos da aceleração vertical no volante



Fonte: Elaborada pela autora.

Os próximos gráficos, Figura 23, comparam as acelerações calculadas numericamente no suporte e na barra do volante, que antes da otimização, foram bastante elevadas. É perceptível esse efeito de minimização ao comparar as escalas entre os gráficos não otimizado e otimizado, para ambas as amostras.

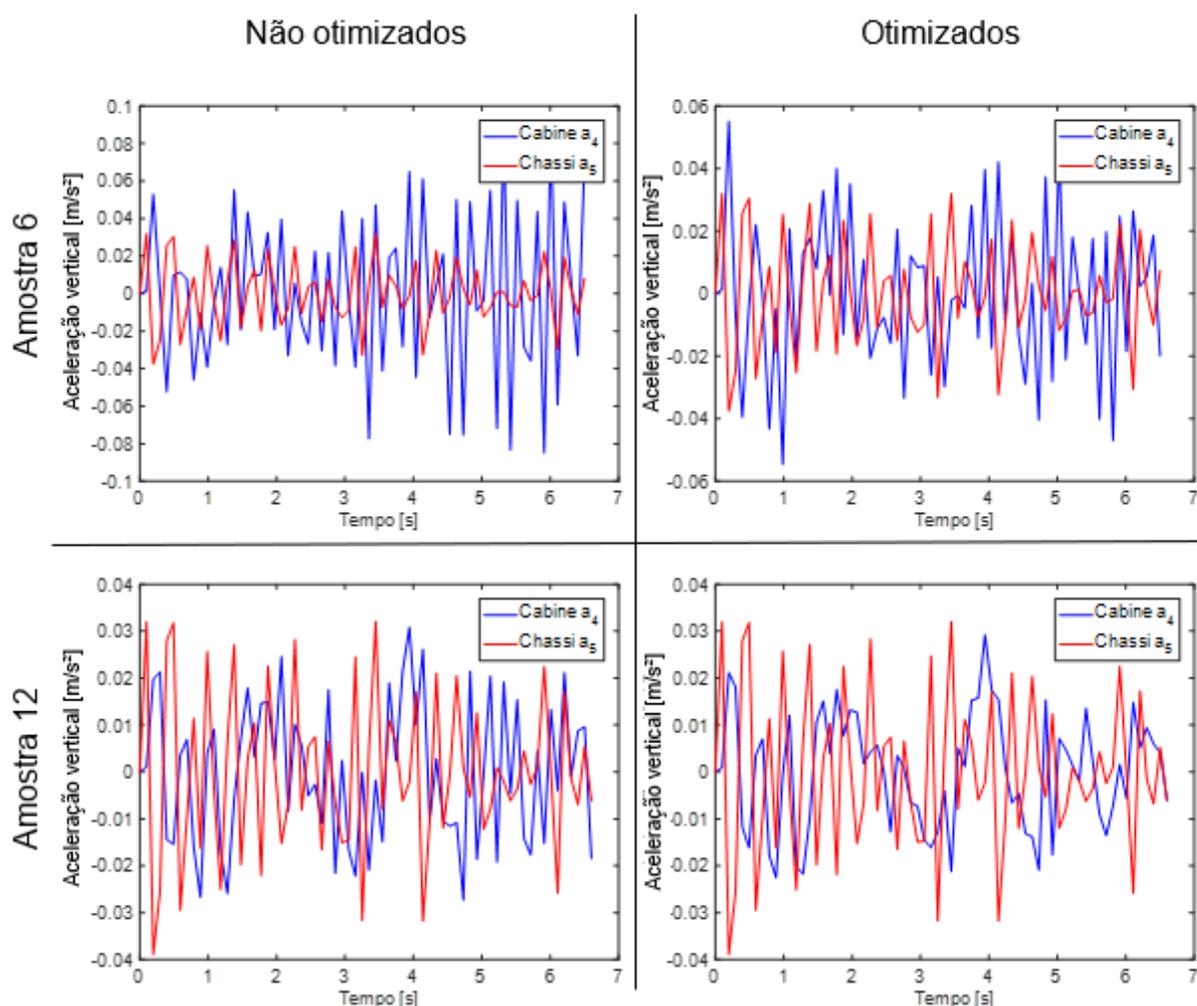
Figura 23 – Gráficos da aceleração vertical suporte e barra do volante



Fonte: Elaborada pela autora.

Já as acelerações da cabine e chassi são muito menores, evidentemente em função da elevada massa, rigidez, amortecimento, geometria e capacidade de armazenar e dissipar energia do sistema analisado. Após a otimização, verificam-se que os gráficos da cabine, chassi, suspensões e arfagens não alteraram significativamente, porque nenhuma variável de projeto, de fato, incide nos respectivos graus de liberdade diretamente (há pequenas diferenças entre o caso otimizado e não otimizado, mas elas não foram tão significativas como aquelas observadas no sistema de direção).

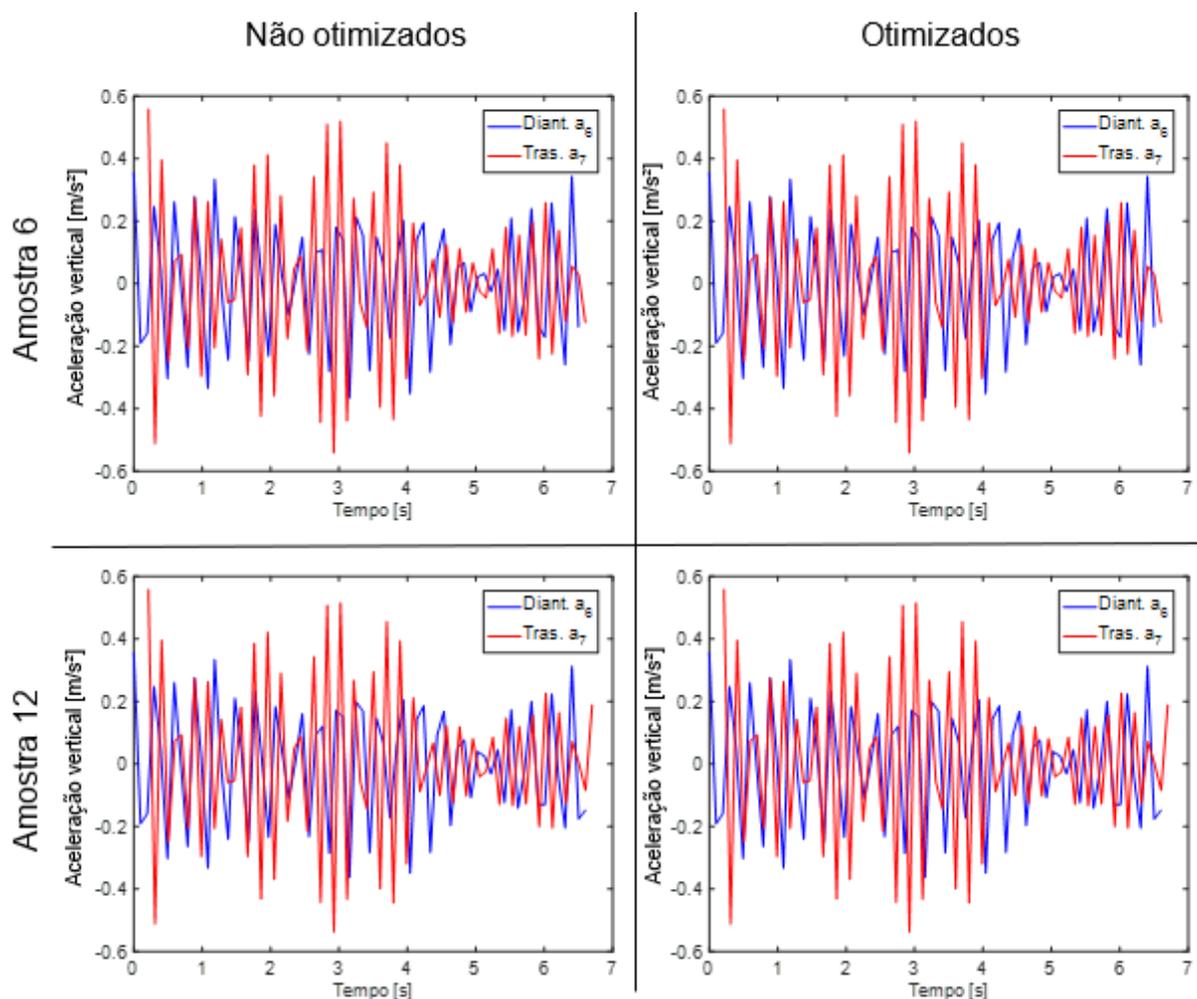
Figura 24 – Gráficos da aceleração vertical cabine e chassi



Fonte: Elaborada pela autora.

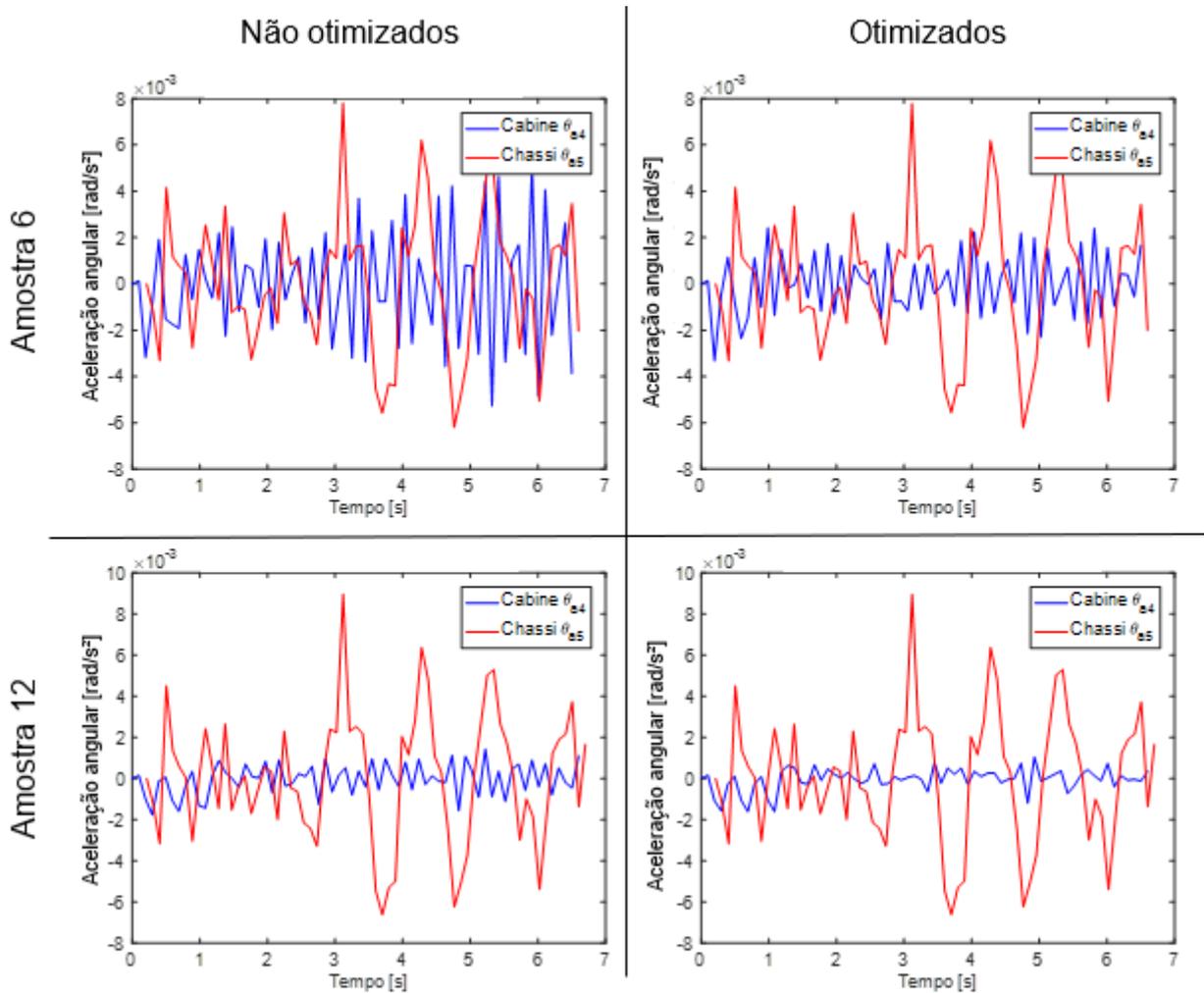
As acelerações nas suspensões evidenciaram grandes oscilações, sendo a traseira com picos maiores do que a dianteira. Isto é justificado devido à maior distância do centro de massa e alta rigidez presentes na traseira, em relação à suspensão dianteira. Os gráficos otimizados continuam iguais porque o modelo analítico e numérico adotou uma série de considerações e hipóteses, dentre elas, a de que o sistema é linear submetido a oscilações harmônicas e, por ser uma função harmônica, as acelerações são diretamente proporcionais aos deslocamentos. Por esse motivo, o histórico de acelerações nas suspensões, tal como o histórico dos deslocamentos, manteve praticamente inalterado antes e depois da otimização.

Figura 25 – Gráficos da aceleração vertical suspensões dianteira e traseira



Fonte: Elaborada pela autora.

As acelerações de arfagem na cabine e no chassi foram pequenas, o que significou pouca ação na região lombar e costas do motorista durante o ensaio. Porém, os efeitos de arfagem foram evidenciados pelos participantes do experimento como predominantes durante a arrancada e a frenagem do veículo, os quais não foram avaliados.

Figura 26 – Gráficos da arfagem θ na cabine e no chassi

Fonte: Elaborada pela autora.

Dos dados acima obtidos, o valor de aceleração RMS, valida a modelagem matemática e os dados de entrada do MATLAB, pois a comparação do valor de a_{rms} numérica do volante com o valor de a_{rms} no volante obtido através do ensaio experimental, resulta no erro relativo:

$$E_R = \frac{(V_V - V_A)}{V_V} \quad (31)$$

onde E_R é o erro relativo, V_V é o valor verdadeiro e V_A é o valor aproximado.

Os valores de a_{rms} para o cálculo do erro relativo são ilustrados na Tabela 3, a seguir:

Tabela 3 – a_{rms} para cálculo de erro relativo

Amostra	a_{rms} experimental [m/s ²]	a_{rms} numérica [m/s ²]
6	6,2867	6,3024
12	4,4961	4,4982

Fonte: Elaborada pela autora.

A seguir, o cálculo do erro relativo do modelo numérico em relação ao modelo experimental para cada uma das amostras, que por ser extremamente baixo, valida o modelo número.

$$E_{R_{amostra6}} = \frac{(6,2867-6,3024)}{6,2867} = -0,002 = -0,2\% \quad (32)$$

$$E_{R_{amostra12}} = \frac{(4,4961-4,4982)}{4,4961} = -0,005 = -0,5\% \quad (33)$$

5.2.1 Experimento Amostra 6 a 60 km/h (otimizado)

A otimização para a amostra 6 realizou 23 simulações numéricas, utilizando o GA para manter coerência em relação a amostra experimental. Os dados de entrada para a simulação foram 50 indivíduos, tolerância para atingir a convergência de 10^{-12} , 1000 iterações no máximo e fração de recombinação de 90%. As simulações do GA foram feitas em um *notebook* Acer Aspire E 15 Intel® Core™ i7-6500U, 2.5 GHz, 8GB DDR3 L e 4 GB VRAM dedicada. O Quadro 5 reúne todas as informações dos resultados das simulações.

Quadro 5 – Resultados análise, amostra 6 (otimizado)

Amostra	Tempo para rodar a otimização [s]	A_{rms} [m/s ²]	k_1 [N/m]	k_2 [N/m]	k_3 [N/m]
1	77,941724	2,007105936	1922026,284	740301,7123	80692,99317
2	78,248519	2,115678892	1991222,493	1002753,203	190047,8519
3	78,782094	2,268000703	2034693,036	2888393,951	726016,3523
4	82,90282	2,281516963	1959178,548	1777535,211	429737,2255
5	87,746314	2,091016918	2000751,145	246426,7579	79276,37332
6	80,776984	2,17422865	1805800,604	1077632,566	185510,2279
7	82,006092	1,932251674	1943582,792	631008,947	79144,35769
8	81,769795	2,111470078	2028633,545	1016806,261	189155,1107
9	80,415899	1,93657032	1899324,736	431033,1369	79144,35769
10	81,13757	2,186208096	1996063,116	1920858,277	193598,8616

11	80,423062	2,135772197	2004537,482	862379,623	207114,4507
12	79,866193	2,266314803	2003227,318	2641341,027	702288,4819
13	80,606776	2,250603865	1999719,21	2995043,718	625125,1071
14	81,042122	2,239971044	1966889,693	1972184,712	200507,5262
15	80,088228	1,954405659	2029159,711	783402,5333	79144,35769
16	93,652929	2,258270207	1968868,463	2906407,811	641703,491
17	78,938455	1,915380088	1943936,299	502529,3145	79144,35769
18	79,49242	2,283031078	1920667,564	2966337,51	582992,6411
19	79,231539	2,175870994	2012680,854	1546165,91	197625,7876
20	78,733951	2,101567376	2003110,5	726881,8338	203515,2859
21	79,114072	2,124725396	1866078,39	748157,7135	198995,92
22	79,929227	2,334992853	1620309,444	2193913,834	462984,8867
23	79,740162	2,251933538	1992044,922	2945554,807	636614,6809
Média	80,982041	2,147690753	1952717,659	1544480,451	306525,2472
Desvio Padrão	3,4162838	0,127111357	91500,80348	962525,1765	232657,664
Coefficiente de variação	0,0421857	0,05918513	0,046858184	0,623203211	0,759016316

Fonte: Elaborado pela autora.

Escolhendo o vetor de soluções ótimo x_{opt} da média das avaliações do GA (**em vermelho**), volta-se para a análise dinâmica do modelo numérico e, então, os resultados ótimos para a amostra 6 foram: i) RMS da aceleração vertical experimental medida de 6,2867 m/s²; ii) RMS da aceleração vertical otimizada de 2,1477 m/s²; e iii) redução de 62% entre o resultado experimental e otimizado.

Em seguida, uma análise de sensibilidade em torno do ponto ótimo global do valor médio da função objetivo (2,1477 m/s²) pode ser feita por meio de uma leve perturbação (10% para mais e para menos) nos valores médios das variáveis de projeto otimizadas que atingiram esse ponto ótimo global ($k_1 = 1952717,659$ N/m; $k_2 = 1544480,451$ N/m, $k_3 = 306525,2472$ N/m). Se a função objetivo alterar de valor (diminuir) significativamente, então aquela variável de projeto é muito influente no processo de minimização da função. Logo, a função objetivo analisada é sensível àquela variável de projeto (k_1 , k_2 e/ou k_3).

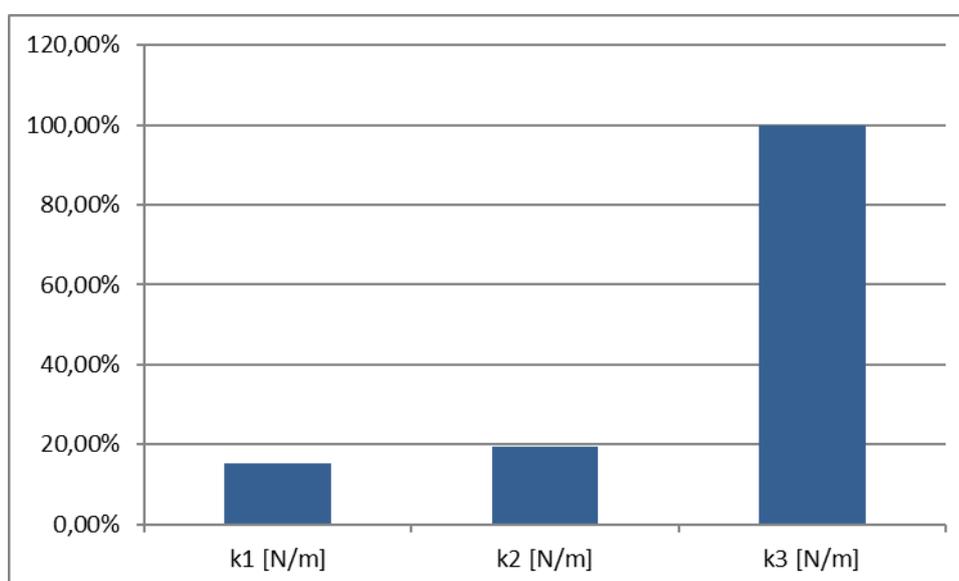
A sensibilidade pode ser calculada de forma ascendente em torno do valor médio do ponto ótimo global, conforme a equação, a seguir:

$$\frac{\partial f_{obj}(\mathbf{x})}{\partial x_i} = \frac{f_{obj}(x_i + \Delta x_i) - f_{obj}(x_i)}{\Delta x_i} \quad (34)$$

Onde $f_{obj}(\mathbf{x})$ é a função a ser otimizada, e x_i é o vetor das variáveis de projeto. Em essência, a análise de sensibilidade pode ser interpretada como um estudo do comportamento da derivada em torno do ponto ótimo.

A sensibilidade em torno do ponto ótimo é exibida no Gráfico 3. As barras do gráfico indicam a participação da variável no quesito de minimização da função objetivo.

Gráfico 3 – Influência das variáveis de projeto no valor médio do ponto ótimo global (amostra 6).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este gráfico apresenta a influência qualitativa das variáveis de projeto em relação a função objetivo avaliada. A sensibilidade é um adimensional e descreve o quanto uma dada variável de projeto contribuiu para fazer a otimização em relação às demais. Quanto maior o gradiente das variáveis de projeto na sensibilidade, maior é a contribuição dela no processo de otimização.

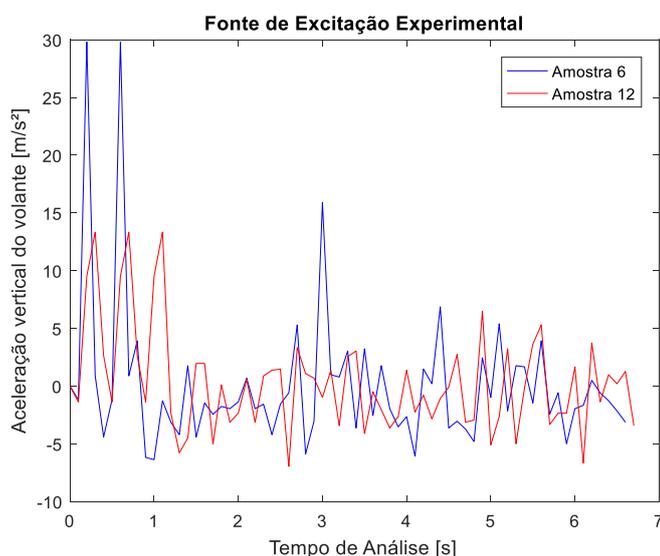
5.2.2 Experimento Amostra 12 a 60 km/h (otimizado)

Similarmente ao ocorrido na amostra 6, a otimização para a amostra 12 realizou 23 simulações numéricas para manter uma coerência em relação a amostra experimental. Os dados de entrada para a simulação foram 50 indivíduos, tolerância para atingir a convergência de 10^{-12} , 1000 iterações no máximo e fração de

recombinação de 90%. As simulações do GA foram feitas em um *notebook* Acer Aspire E 15 Intel® Core™ i7-6500U, 2.5 GHz, 8GB DDR3 L e 4 GB VRAM dedicada.

A aceleração RMS da amostra 12 foi significativamente menor que a amostra 6, e o GA pôde procurar em um espaço de soluções em torno de um ótimo global muito menor do que aquele obtido na amostra 6 (o GA realmente minimizou bastante). Isso significa que os picos da amostra 6 elevaram muito o valor RMS, e os picos da amostra 12 mantiveram o valor RMS mais próximo do valor médio. Por isso, numericamente, a amostra 12 foi um caso mais acessível para o GA, resultando numa minimização considerável do valor RMS. Veja o Gráfico 4 com o comparativo das medições entre as duas amostras:

Gráfico 4 – Comparativo, amostra 6 e 12 (otimizado)



Fonte: Elaborado pela autora.

Para fins de projeto, a amostra 6 pode ser considerada a mais severa e, portanto, os valores ótimos obtidos nas variáveis de projeto dessa amostra devem ser escolhidos, preferencialmente.

Em seguida, o Quadro 6 reúne todas as informações dos resultados das simulações para a amostra 12:

Quadro 6 – Resultados análise, amostra 12 (otimizado)

Amostra	Tempo para rodar a otimização [s]	A_{rms} [m/s ²]	k_1 [N/m]	k_2 [N/m]	k_3 [N/m]
1	84,012528	0,320272496	2003156,833	2265025,598	1071703,87
2	82,592257	0,311466587	1983072,991	3006763,131	1022164,435

3	82,146705	0,316998636	1825511,193	3141491,729	1035966,956
4	81,409626	0,316345729	1991580,186	2550549,01	1051679,108
5	86,914105	0,310071368	1987446,035	3120929,113	1034890,658
6	81,301891	0,313435268	1964979,05	2884857,48	1068716,828
7	82,216692	0,323150476	1765264,426	2910263,031	987839,5911
8	81,415895	0,317020573	2012579,026	2473430,083	1110587,993
9	81,261285	0,311228101	2029044,148	2855221,626	1062955,724
10	81,320397	0,314781774	1999367,883	2697608,016	1010989,75
11	81,526813	0,320557702	1911639,203	2470251,306	1062500,327
12	81,790167	0,318070302	1864454,816	2905572,757	1090136,072
13	81,467197	0,31546579	2003997,787	2736089,432	1138005,785
14	81,146757	0,318270742	1823844,613	3009698,609	1035330,472
15	85,81456	0,315621521	1986394,259	2705786,747	1118532,575
16	81,326323	0,309515207	2004767,782	3109785,341	1032624,567
17	83,633721	0,317064285	1952189,252	3117561,98	1170505,825
18	82,627284	0,313802282	1892966,871	3145197,967	1037166,701
19	83,883111	0,321091195	2006687,11	2207332,184	1090940,208
20	85,700532	0,312577159	1933339,172	3097077,913	1054312,53
21	82,143308	0,312275163	1959701,256	3038389,929	1009705,922
22	81,843315	0,311054968	2014985	2934507,76	1072043,348
23	82,813423	0,312326224	1931214,648	3124105,275	1036998,893
Média	82,62208226	0,315324502	1949921,024	2848152,001	1061143,397
Desvio Padrão	1,640340302	0,003788139	71625,27893	286773,8658	43577,65579
Coefficiente de variação	0,019853534	0,012013461	0,0367324	0,100687697	0,041066698

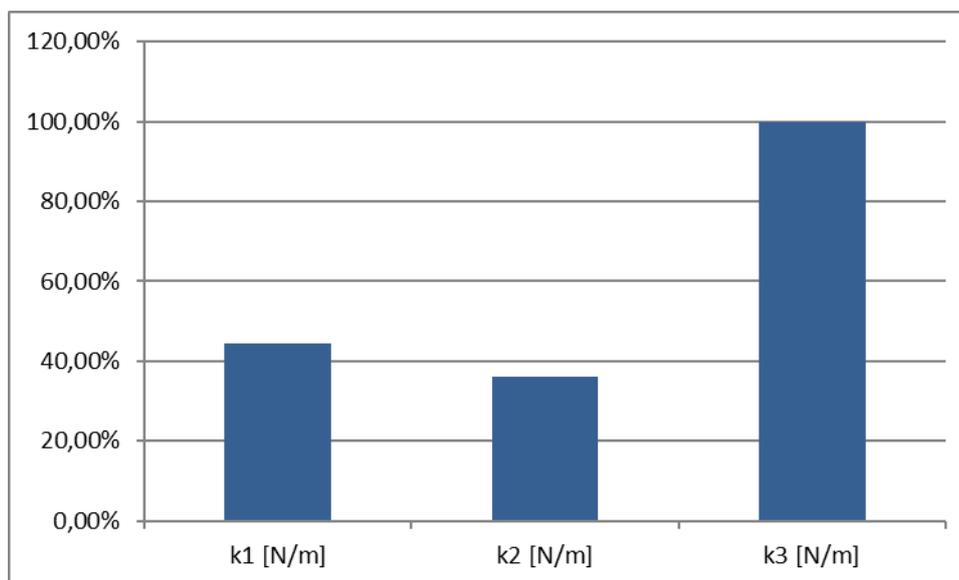
Fonte: Elaborado pela autora.

Analogamente ao realizado na amostra 6, para a amostra 12, escolhendo o vetor de soluções ótimo x_{opt} da média das avaliações do GA (**em vermelho**), volta-se para a análise dinâmica do modelo numérico e, então, os resultados ótimos para a amostra 12 foram: i) RMS da aceleração vertical experimental medida de 4,4961 m/s²; ii) RMS da aceleração vertical otimizada de 0,3153 m/s²; e iii) redução de 93% entre o resultado experimental e otimizado.

Em seguida, uma análise de sensibilidade em torno do ponto ótimo global do valor médio da função objetivo (0,3153 m/s²) pode ser feita por meio de uma leve perturbação (10% para mais e para menos) nos valores médios das variáveis de projeto otimizadas que atingiram esse ponto ótimo global ($k_1 = 1949921,024$ N/m; $k_2 = 2848152,001$ N/m, $k_3 = 1061143,397$ N/m). Se a função objetivo alterar de valor (diminuir) significativamente, então aquela variável de projeto é muito influente no processo de minimização da função. Logo, a função objetivo analisada é sensível

àquela variável de projeto (k_1 , k_2 e/ou k_3). A sensibilidade em torno do ponto ótimo é exibida no Gráfico 5. As barras do gráfico indicam a participação da variável no quesito de minimização da função objetivo.

Gráfico 5 – Influência das variáveis de projeto no valor médio do ponto ótimo global (amostra 12).



Fonte: Elaborado pelo autor.

As alternativas para aumentar a rigidez da barra da direção, estão relacionadas com a modificações de projeto no material ou na geometria da mesma. Faz-se necessário um estudo, para verificar quais seria a alternativa mais viável, mas uma opção seria aumentar o diâmetro da barra, sendo necessário verificar essa influência no funcionamento da peça e do conjunto como um todo.

5.3 Classificação NHO 10

Nesta seção são apresentados os cálculos para classificação das acelerações transmitidas no volante em relação a NHO 10 (2013), seguindo o procedimento descrito e explicado na seção 2.1 deste trabalho.

5.3.1 Classificação NHO 10 para os Dados Experimentais

Nessa seção, utiliza-se como base os dados de aceleração medidas no volante durante as 23 amostras do ensaio experimental do estudo de caso. Segue o passo a passo dos cálculos e a classificação da aceleração transmitida.

Passo 1: cálculo da a_m = aceleração média, que segundo a NHO 10 (2013), é a raiz média quadrática dos diversos valores de aceleração instantânea ocorridos em um período de medição. Ou seja, o valor de aceleração RMS (*root mean square*):

Tabela 4 – Acelerações RMS (não otimizadas)

Número da Amostra	Valor da Aceleração RMS (m/s ²)
1	3,64
2	4,43
3	3,08
4	3,93
5	4,52
6	6,29
7	4,25
8	4,11
9	3,99
10	4,11
11	3,03
12	4,50
13	3,21
14	3,98
15	3,51
16	3,49
17	3,29
18	3,06
19	4,08
20	3,26
21	2,82
22	2,50
23	3,24

Fonte: Elaborada pela autora.

Passo 2: cálculo do $amep_{ij}$ (aceleração média de exposição parcial):

$$amep_{ij} = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s am_{ijk} = 3,76 \frac{m}{s^2} \quad (34)$$

Passo 3: cálculo do $arep_i$ (aceleração resultante de exposição parcial), que neste caso pelo fato de o único eixo de interesse ser o z (conforme explicado na seção 2.1), é igual ao valor do $amep_{ij}$:

$$arep_i = \sqrt{amep_{ix}^2 + amep_{iy}^2 + amep_{iz}^2} \quad (35)$$

$$arep_i = \sqrt{amep_{ix}^2 + 0 + 0} \quad (36)$$

$$arep_i = amep_{ij} = 3,76 \frac{m}{s^2} \quad (37)$$

Passo 4: cálculo do are = (aceleração resultante de exposição), que no caso desse trabalho é igual ao valor do $arep_i$, devido ao fato de a velocidade deste estudo de caso, na maior parte do tempo (das longas viagens), ser igual a 60km/h.

$$are = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^m n_i arep_i^2 T_i} \quad (38)$$

$$are = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^m 1 arep_i^2 T_i} \quad (39)$$

$$are = arep_i = 3,76 \frac{m}{s^2} \quad (40)$$

Passo 5: cálculo do $aren$ (aceleração resultante de exposição normalizada):

$$aren = are \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (41)$$

$$aren = 3,76 \sqrt{\frac{12}{8}} = 4,60 \frac{m}{s^2} \quad (42)$$

Avaliando este valor de *aren*, segundo a NHO 10 (2013), Quadro 1 deste trabalho, a aceleração está em uma região de incerteza e a atuação recomendada a adoção de medidas preventivas e corretivas, visando a redução da exposição diária.

5.3.2 Classificação NHO 10 para os Dados Otimizados

Nessa seção, utiliza-se como base os dados de aceleração RMS obtidos após a otimização via MATLAB. Segue o passo a passo e a classificação da aceleração transmitida após otimização.

Passo 1: cálculo da *am* (dados do MATLAB):

Tabela 5 – Acelerações RMS (otimizadas)

Número da Amostra	Valor da Aceleração RMS (m/s²)
6	2,4393
12	0,3143

Fonte: Elaborada pela autora.

Passo 2: cálculo do *are*:

$$arep_i = amep_{ij} = are = 1,38 \frac{m}{s^2} \quad (43)$$

Passo 3: cálculo do *aren*:

$$aren = are \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (44)$$

$$aren = 1,38 \sqrt{\frac{12}{8}} = 1,69 \frac{m}{s^2} \quad (45)$$

Avaliando este valor de *aren*, segundo a NHO 10 (2013), Quadro 1 deste trabalho, a aceleração após a otimização, é aceitável e a atuação recomendada é a manutenção da condição existente.

5.4 Incerteza do Sistema de Medição

Calcula-se nessa seção, a incerteza do sistema de medição, conforme os conceitos do GUM (2008) detalhados na seção 2.5 desse trabalho. As incertezas de medição identificadas, relacionadas ao sistema de medição e que optou-se para mensura (mais impactantes/significativas) foram: da resolução do acelerômetro, do padrão utilizado na calibração e do desvio padrão da medição (sendo g uma unidade de medida para aceleração que equivale a 9,80665 m/s²).

$$\text{Incerteza de Resolução } (u_1) = \frac{\frac{0,01}{2}}{\sqrt{3}} = 0,002886751[g] \quad (46)$$

$$\text{Incerteza do Padrão } (u_2) = \frac{0,063}{2} = 0,0315[g] \quad (47)$$

$$\text{Desvio Padrão da Medição } (u_3) = \frac{0,091}{\sqrt{3}} = 0,052538874[g] \quad (48)$$

Incerteza combinada:

$$U_c = \sqrt{0,002886751^2 + 0,0315^2 + 0,052538874^2} = 0,061326313 [g] \quad (49)$$

Graus de liberdade efetivos:

$$V_{eff} = \frac{0,095459852^4}{\frac{0,052538874^4}{308}} = 3356,685731 \quad (50)$$

Segundo a tabela de distribuição de t-Student, contida no GUM (2008), o valor k para uma confiabilidade de 95% é de 1,96. Podendo então calcular a incerteza expandida:

$$U = \pm 0,095459852 \times 1,96 = \pm 0,120199573[g] \quad (51)$$

Essa incerteza expandida pode ser aplicada nos casos 6 e 12 medidos (6,29 e 4,50 m/s²); logo, o intervalo dessas acelerações é de 5,11 até 7,47 m/s² e 3,32 e 5,68 m/s². Então, avaliando (através da NHO 10 (2013), Quadro 1 deste trabalho) os

mínimos e máximos dos intervalos das acelerações (obtido através da incerteza combinada), sabendo que o valor do *aren* neste projeto é 22% maior que os valores das acelerações RMS, mantem-se condições próximas a verificada na seção 5.3.1 deste trabalho, em que são necessárias adoção de medidas preventivas e corretivas, visando a redução da exposição diária.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho adquiriu dados experimentais, buscando reproduzir a realidade da maior parte do tempo da jornada de trabalho do motorista do caminhão objeto desse estudo. A partir destes dados, é realizada uma verificação de conformidade com a norma, em vigência no país de realização do trabalho, NHO 10 (2013) e posteriormente uma otimização do parâmetro rigidez do volante, sua barra e suporte.

Todo o sistema para coleta de dados, utilizado neste trabalho, foi adquirido (*hardware*) e desenvolvido especialmente para este projeto. Isto se dá devido ao veículo de estudo ser comercial; logo, o seu tempo ocioso (disponível para o experimento) era escasso e de difícil agendamento o que tornava indispensável possuir um sistema de medição próprio e pronto para o uso. Vale ressaltar que todo o sistema de medição criado foi calibrado, anteriormente ao experimento, dentro das dependências da universidade. Essa calibração do equipamento se deu devido à necessidade de garantir os resultados entregados pelo conjunto e de ter um valor de erro de medição posteriormente inserido nos cálculos de incerteza.

Dos cuidados adotados para com a medição destacam-se a fixação do acelerômetro que teve seu corpo unido ao volante por meio fita isolante por opção, devido ao fácil manuseio e a possibilidade de colocação e remoção sem danificar o equipamento. Outro item a mencionar é a confecção do cabeamento, que une o acelerômetro à placa Arduino, foram utilizados cabos de comprimento suficiente a garantir a não interferência do acelerômetro na condução do veículo mantendo-a mais próxima do real o possível. Além destes, a soldagem dos cabos diretamente no acelerômetro foi necessária para garantir o correto contato e comunicação com a placa Arduino mesmo com o movimento do volante durante o experimento.

Das dificuldades encontradas durante o processo de obtenção dos dados pode-se destacar a impossibilidade de esterçamento total do volante, quando fixado o acelerômetro a este, impossibilitando manobras de retorno para a posição inicial (troca de sentido). A medida de contorno adotada aqui foi o deslocamento até a posição inicial do veículo em marcha ré, que foi possível graças à condição de baixo fluxo de veículo na via de experimento. Outro item a ser mencionado foi a dificuldade em sincronizar o início e fim da gravação de dados pelo *software*, como a passagem pelos pontos de referência de 0 e 100 m na pista, aqui a medida a ser tomada foi tornar o mais claro possível as marcações na pista para facilitar sua identificação. Além destes,

pode-se afirmar que uma das principais grandezas era a velocidade, logo esta teve cuidado reforçado sobre sua manutenção durante o trajeto, para isso uma maior distância antes do gatilho (referência) de início foi tomada e uma maior distância de frenagem também, possibilitando ao motorista maior facilidade na manutenção velocidade do veículo.

Foram coletadas 23 amostras na velocidade constante de 60 km/h, pois dentre as demais velocidades analisadas na coleta de dados preliminar (40, 60 e 80 km/h), foi nessa amostra que se encontrou os maiores valores de aceleração RMS. Segundo a NHO 10 (2013), Quadro 1 deste trabalho, a aceleração obtida nessas amostras está em uma região de incerteza e a atuação recomendada pela norma é a adoção de medidas preventivas e corretivas, visando a redução da exposição diária.

Devido a este resultado, uma modelagem do sistema vibratório foi feita, os parâmetros de projeto do cavalo mecânico foram obtidos e os dados das amostras 6 e 12 (casos em que se obteve os maiores valores de aceleração RMS) foram utilizados como fonte de excitação, e todas essas informações foram imputadas no MATLAB. Na análise numérica, após a validação dos dados inseridos no mesmo em relação ao comportamento real do sistema, realizou-se uma otimização numérica através de algoritmos genéticos, em busca dos valores ótimos das rigidezes do volante, sua barra e suporte, para encontrar o valor mínimo de aceleração RMS. Optou-se por avaliar a interferência desse parâmetro específico, pois seria possível manter o mesmo projeto estrutural e alterar apenas os materiais, para obter alterações nesse parâmetro.

Os valores mínimos de aceleração RMS encontrados pelo MATLAB, foram verificados em relação a NHO 10 (2013), Quadro 1 deste trabalho. Desta vez os valores foram classificados como aceitáveis, tendo como a atuação recomendada, pela norma, a manutenção da condição existente. A otimização tornou-se uma ferramenta viável de projeto para justamente minimizar as acelerações e adequá-las às restrições das normas, sugerindo, então, um conjunto de variáveis de projeto, caracterizado pelas rigidezes, para orientar um projeto de melhoria do volante futuro.

Outro ponto a ser destacado é que todo este trabalho foi organizado utilizando ferramentas conhecidas para a condução de projetos (elaboração de escopo, plano de ação, *check list*, *brainstorm*), destacando-se a importância dos planos de ação, com todas as atividades necessária, que foram surgindo ao longo do projeto, para que o mesmo fosse coerente, com responsáveis definidos para cada uma dessas ações e

prazos para execução, garantindo assim, uma maior assertividade do trabalho e a realização das tarefas para atender o cumprimento do prazo de entrega.

O tratamento estatístico realizado em diversas partes do trabalho foi um ponto importante a se considerar. Uma vez que diversas amostras foram tomadas no ensaio experimental, os dados coletados formaram curvas que apresentaram picos e oscilações nas quais uma interpretação direta a partir dos gráficos nem sempre são adequadas. Balizado pelas normas, este trabalho deu atenção especial às medidas estatísticas, como média, desvio padrão e coeficiente de variação, para obter um parâmetro que agrega as informações do histórico de dados em um único valor a ser comparado.

A partir dos dados coletados experimentalmente, graças ao modelo numérico, baseado no método dos parâmetros concentrados, puderam-se propagar os efeitos de vibração às outras partes do modelo. Isso permitiu extrapolar os efeitos e passar uma noção de como seria o comportamento dinâmico do sistema. O grande trunfo deste trabalho coincidiu justamente em simular um perfil de pista e sua consequente classificação segundo a ISO-8606 (2016) a partir da coleta das acelerações no volante do cavalo-mecânico.

REFERÊNCIAS

- ACELERÔMETRO e giroscópio MPU6050. [S.l.], 28 abr. 2015. Disponível em <<https://www.arduinoecia.com.br/2015/04/acelerometro-giroscopio-mpu-6050.html>> Acesso em: 15 ago. 2018. Blog: Arduino e Cia.
- AJOVALASIT Marco;GIACOMIN, Joseph. **Effect of automobile operating condition on the subjective equivalence of steering wheel vibration and sound**. 2007. 20f. Artigo acadêmico. International Journal of Vehicle Noise and Vibration. School of Engineering and Design, Brunel University, West London. Uxbridge. Middlesex. UB8 3PH. UK. 2007.
- AZIZ,Shamsul Akmar Ab; NUAWI,Mohd Zaki; NOR Mohd Jailani Mohd. **Monitoring Of Hand-Arm Vibration**. 2014. 43f. Artigo Acadêmico, ReserachGate, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/315534742_Monitoring_Of_Hand-Arm_Vibration>.Acesso em: 23 maio 2018.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 2. ed. LTC: Rio de Janeiro, 2011.
- BLUM, Cristian; ROLI, Andrea. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, Nova Iorque, 2003. Disponível em: <<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=937505>>. Acesso em: 14 abr. 2018.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (FUNDACENTRO). **Norma de Higiene Ocupacional NHO 10: avaliação da exposição ocupacional a vibrações em mãos e braços: procedimento técnico**. Elaboração Irlon de Ângelo da Cunha Eduardo Giampaoli. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.fundacentro.gov.br/biblioteca/normas-de-higiene-ocupacional/publicacao/detalhe/2013/4/nho-10-procedimento-tecnico-avaliacao-da-exposicao-ocupacional-a-vibracao-em-maos-e>>. Acesso em: 07 abr. 2018.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15: atividades e operações insalubres**. Brasília, DF, 1978. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-15-atividades-e-operacoes-insalubres>>. Acesso em: 31 mar. 2018.
- CAMPOS, Denir; SOUZA, Maíra Cruz de. **Análise da Dinâmica Vertical de Veículos Pesados Flexíveis**. 2014. 209f. Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado (Bacharel em Engenharia Mecânica), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). Rio de Janeiro, 2008.
- ÇANKAYA, Sevim; KOYUNCU, Atayıl; BALABAN, Murat. Steering Wheel Idle Vibration Improvement on Tractor. **Sigma Journal Engineering and Natural Sciences**, Istanbul, 2016. Disponível em: <<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjksquV0sDeAhUEfZAKHdnVAVQQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fed>>

s.yildiz.edu.tr%2FAjaxTool%2FGetArticleByPublishedArticleId%3FPublishedArticleId%3D2247&usg=AOvVaw0UBSjV6lofW3TxBGpr6bZm> . Acesso em: 09 ago 2018.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Resolução RE nº 396, de 13 de dezembro de 2011**. Sinalização dos radares. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/RESOLUCAO_CONTRAN_396_11.pdf>. Acesso em 14 abr. 2018.

DA SILVA, Marco Antonio; CARVALHO, Alessandro Basaglia; GARRIDO, Jean Cosme; ESTREMOTE, Marcos Antonio. Sistema para monitoramento de vibrações utilizando Arduino. **Revista Interatividade**, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.firb.br/editora/index.php/interatividade/article/view/144/206>>. Acesso em 05 mai. 2018.

FORSBERG, Gustav; MÖLLER, Tor. **The Noise and Vibration Transfer Characteristics of the Steering Installation in a Volvo FH Truck**. 2015. 86f. Tese (Mestrado em Som e Vibração).- Programa de Mestrado, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, 2015.

FREESCALE. **MMA7260QT: XYZ AXIS ACCELEROMETER ±1.5g/2g/4g/6g**. Tampa, 2008. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj9qiH-MDeAhVLhZAKHZvVBzsQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.nxp.com%2Fdocs%2Fen%2Fdata-sheet%2FMMA7260QT.pdf&usg=AOvVaw1zZd2Crd5iWDqA2sQxs_jM> . Acesso em: 13 jul. 2018.

G., Prashanth; PATRO, Pratyush Kumar; MARAM Devakumar Reddy. Mathematical Modeling of Vibration in Steering Wheel Assembly of Commercial Vehicles. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, Gujarat, 2015. Disponível em: <<https://www.ijert.org/phocadownload/V4I4/IJERTV4IS040973.pdf>> . Acesso em: 12 ago 2018.

GE, Xinfang; JIN, Yi; ZHU, Chang'na. Analysis and Optimization of Forklift Truck Steering Wheel Idle Vibration. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**. Shinjuku, 2015. Disponível em: <<https://www.ijert.org/phocadownload/V4I4/IJERTV4IS040973.pdf>> . Acesso em: 13 mai 2018.

GIACOSA, Dante. **Motores Endotermicos**. Barcelona: Cientifico-Medica: 1964.

GILLESPIE, T. D.; **Fundamentals of Vehicle Dynamics**, Society of Automotive Engineers, SAE, Warrendalle, 1992.

GOLDBARG, Marco Cesar; GOLDBARG, Elizabeth Gouvêa; LUNA, Henrique Pacca Loureiro. **Otimização Combinatória e Meta-Heurísticas**: algoritmos e aplicações. 1 ed. Elsevier: Rio de Janeiro, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. 1ª. ed. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. 1ª. ed. Rio de Janeiro, 2012.

INVENSENSE. **MPU-6000/MPU-6050 9-Axis Evaluation Board User Guide**. Sunnyvale, 2011. Disponível em: < <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-EV-Board1.pdf> >. Acesso em: 6 jun. 2018.

INVENSENSE. **MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices**. Sunnyvale, 2018. Disponível em: < <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> >. Acesso em: 6 jun. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 8608:2016**: Mechanical vibration – Road surface profiles – Reported of measured. 2 ed. Europe, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 5349-1:2001**: Mechanical vibration -- Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration -- Part 1: General requirements. 1 ed. Europe, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 5349-2:2001**: Mechanical vibration -- Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration -- Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace. 1 ed. Europe, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 2631-1:1997**: Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 1: General requirements. 2 ed. Europe, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10819:2013**: Mechanical vibration and shock -- Hand-arm vibration -- Measurement and evaluation of the vibration transmissibility of gloves at the palm of the hand. 2 ed. Europe, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 8041-1:2017**: Human response to vibration -- Measuring instrumentation -- Part 1: General purpose vibration meters. 1 ed. Europe, 2017.

LUCAS, Diogo C. **Algoritmos genéticos**: uma Introdução. Porto Alegre, 2002. Apostila em PDF.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. 4ª. ed. São Paulo: Prentice Pearson Hall, 2008.

SCANIA. **Especificação Técnica. G 360 LA4X2 R780**. [S.l.], jun. 2014. Disponível em: < <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&>

uact=8&ved=2ahUKEwiCk7HWhMPeAhUEEZAKHYcxB98QFjAAegQICBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.scania.com%2Fcontent%2Fdam%2Fscanianoe%2Fmarket%2Fbr%2Fpdfs%2Fespecifica%25C3%25A7%25C3%25B5es%2Fg%2F131_G360_LA4X2_R780_tcm253-428767.pdf&usg=AOvVaw1C4SpkcAh0epKtyX-LyxNJ >. Acesso em: 10 ago. 2018.

SCANIA. **Scania Power Generation Engines**. Södertälje, [2018?]. Disponível em: <https://www.scania.com/content/dam/scanianoe/market/master/products-and-services/engines/pdf/specs/power-gen/DC1371A_325-371kW.pdf>. Acesso em: 09 set. 2018.

ŞENDUR, Polat; KURTDERE, Ali; AKAYLAR, Oral. A Methodology to Improve Steering Wheel Vibration of a Heavy Commercial Truck. **Inter-noise 2016**. Hamburgo, 2016. Disponível em: <<http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000257.pdf>> . Acesso em: 12 ago 2018.

SOUZA, Anderson R. et al. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/331702.pdf>>. Acesso em 21 abr. 2018.

STEVAN JUNIOR, Sérgio Luiz; SILVA, Rodrigo Adamshuk. **Automação e Instrumentação Industrial com Arduino teoria e projetos**. 1. ed. Érica: São Paulo, 2015. Livro eletrônico.

SZCZOTKA, Marek. Simulation and Optimisation of the Steering Kickback Performance. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**. Warsaw, 2011. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.847.1711&rep=rep1&type=pdf>> . Acesso em: 20 jul 2018.

THOMSEN, Adilson. Tutorial: acelerômetro MPU6050 com Arduino. **FilipeFlop**, Florianópolis, 30 setembro 2014. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/tutorial-acelerometro-mpu6050-Arduino/>>. Acesso em: 12 maio 2018.

VROMANOV89. **[Código para Programação do MPU-6050 com Arduino]**. Local ou [S.l.], 15 jul. 2016. Disponível em: <https://github.com/VRomanov89/EEEnthusiast/blob/master/MPU-6050%20Implementation/MPU6050_Implementation/MPU6050_Implementation.ino#L1>. Acesso em: 23 jul. 2018.

APÊNDICE A – MATRIZES E VETORES INERCIAIS DO SISTEMA

Vetor de forças gravitacionais [N]:

$$\mathbf{F}_g = [-m_1 g \quad -m_2 g \quad -m_3 g \quad -m_4 g \quad -m_5 g \quad -m_6 g \quad -m_7 g \quad -m_8 g \quad 0 \quad 0]^T$$

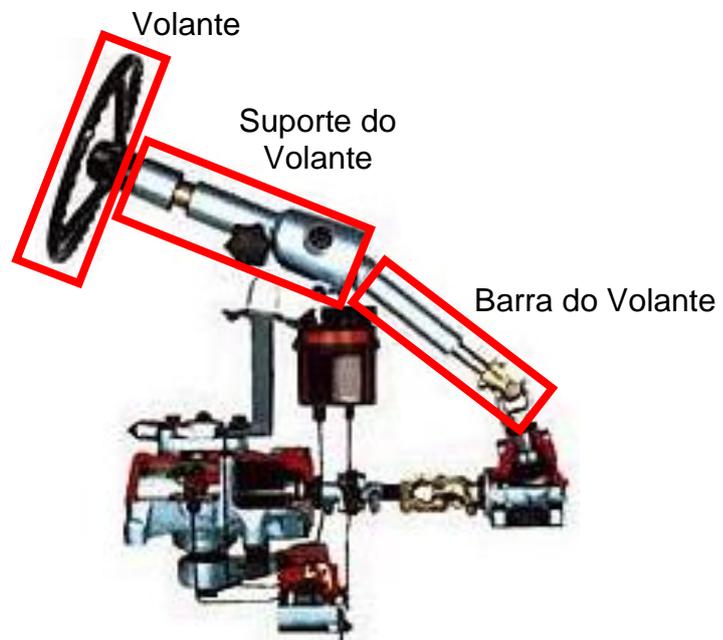
Vetor de deslocamentos da base (deflexão estática) [m]:

$$\mathbf{U}_g = \left[\frac{\mathbf{F}_g}{\mathbf{K}} \right]^T$$

Matriz de incidência da rigidez elástica dos pneus [N/m]:

$$\mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ k_6 & 0 \\ 0 & k_7 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ANEXO A – VOLANTE, SEU SUPORTE E SUA BARRA



Fonte: Adaptado de Blogspot: [geometriadedirecao...](#) (2018).

ANEXO B – PROGRAMAÇÃO ARDUINO

===Contact & Support===

Website: <http://eeenthusiast.com/>

Youtube: <https://www.youtube.com/EEEnthusiast>

Facebook: <https://www.facebook.com/EEEnthusiast/>

Patreon: https://www.patreon.com/EE_Enthusiast

Revision: 1.0 (July 13th, 2016)

===Hardware===

- Arduino Uno R3

- MPU-6050 (Available from: <http://eeenthusiast.com/product/6dof-mpu-6050-accelerometer-gyroscope-temperature/>)

===Software===

- Latest Software: https://github.com/VRomanov89/EEEnthusiast/tree/master/MPU-6050%20Implementation/MPU6050_Implementation

- Arduino IDE v1.6.9

- Arduino Wire library

===Terms of use===

The software is provided by EEEnthusiast without warranty of any kind. In no event shall the authors or

copyright holders be liable for any claim, damages or other liability, whether in an action of contract,

tort or otherwise, arising from, out of or in connection with the software or the use or other dealings in

the software.

*/

```
#include <Wire.h>
```

```
long accelX, accelY, accelZ;
```

```
float gForceX, gForceY, gForceZ;
```

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  setupMPU();
}
```

```
void loop() {
  recordAccelRegisters();
```

```

    printData();
    delay(100);
}

void setupMPU(){
    Wire.beginTransmission(0x68); //This is the I2C address of the MPU (b1101000/b1101001 for
AC0 low/high datasheet sec. 9.2)
    Wire.write(0x6B); //Accessing the register 6B - Power Management (Sec. 4.28)
    Wire.write(0x00); //Setting SLEEP register to 0. (Required; see Note on p. 9)
    Wire.endTransmission();
    Wire.beginTransmission(0x68); //I2C address of the MPU
    Wire.write(0x1C); //Accessing the register 1C - Acccelerometer Configuration (Sec. 4.5)
    Wire.write(0x10); //Setting the accel to +/- 2g
    Wire.endTransmission();
}

void recordAccelRegisters() {
    Wire.beginTransmission(0b1101000); //I2C address of the MPU
    Wire.write(0x3B); //Starting register for Accel Readings
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(0b1101000,6); //Request Accel Registers (3B - 40)
    while(Wire.available() < 6);
    accelX = Wire.read()<<8|Wire.read(); //Store first two bytes into accelX
    accelY = Wire.read()<<8|Wire.read(); //Store middle two bytes into accelY
    accelZ = Wire.read()<<8|Wire.read(); //Store last two bytes into accelZ
    processAccelData();
}

void processAccelData(){
    gForceX = accelX / 4096.0;
    gForceY = accelY / 4096.0;
    gForceZ = accelZ / 4096.0;
}

void printData() {
    Serial.print(" Accel (g)");
    Serial.print(" X=");
    Serial.print(gForceX);
    Serial.print(" Y=");
    Serial.print(gForceY);
    Serial.print(" Z=");
    Serial.println(gForceZ);
}

```

ANEXO C – LAUDO DE CALIBRAÇÃO ACELERÔMETRO ITT FUSE

MTS MTS SISTEMAS DO BRASIL LTDA.
Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob nº 669.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº A281R/2018

COBRETEC
2009 NBR
14726-1/1988
CAL 0969

CLIENTE: UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

ENDEREÇO: Av. Uniainos, 950 - Bairro Cristo Rei - São Leopoldo/RS - CEP: 93022-750

DADOS DO ACELERÔMETRO

MODELO Nº: 3035B2

FABRICANTE: Dytran

Nº DE SÉRIE: 8266

CÓDIGO: E014F

DESCRIÇÃO: ICP® Accelerometer

ESPECIFICAÇÕES DO TRANSDUTOR

RANGE AMP.: ± 0,01 m/s²

FREQ. RESON.: ≥ 45000 Hz

RANGE TEMP.: -51 até 121°C ou -60 até 250°F

EIXO: Uni-Axial

DADOS DA CALIBRAÇÃO

SENSIBILIDADE @100 Hz: 5,249 mV/(m/s²) ou 51,47 mV/g

NÍVEL DE TESTE: 9,81 m/s² ou 1 g

DATA DA CALIBRAÇÃO: 12/09/2018

CONDIÇÕES AMBIENTAIS:

TEMPERATURA: 23,9 ± 0,3 °C

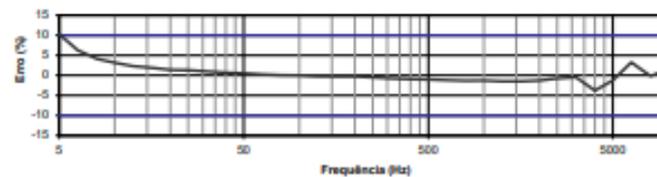
UMIDADE: 43,0 ± 5 %

CONDIÇÕES DO SENSOR:

Sensor recebido em condições normais para calibração.

Fixação do acelerômetro na base do Excitador (Shaker) através de cola Cianoacrilato.

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA:



Notas:

Resultados desse documento referem-se somente ao sensor calibrado.

Calibração por comparação "Back-to-Back" conforme ISO 16063 Parte 21 e Instrução interna ITV01.

Certificado de Calibração emitido por MTS Sistemas do Brasil Ltda.

A reprodução desse Certificado de Calibração só poderá ser feita integralmente e sem alterações.

Instrumentos e/ou equipamentos utilizados nesta calibração são rastreáveis ao S.I.

A linha azul do gráfico acima corresponde à tolerância do Fabricante.

Convenções:

Erro relativo @100 Hz: $\left(\frac{S - S_{REF}}{S_{REF}} \right) \times 100$

Sendo: S = Sensibilidade medida

SREF = Sensibilidade da referência (@100 Hz)

U : Incerteza de Medição

A Incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência k=2 para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

A Sensibilidade em mV/g foi calculada considerando o valor da gravidade normalizada de 9,80665 m/s².

Cal ID: 2228

Est. Doutor Altino Bondensan, 500 - Centro Empresarial II Conj. 1402 E 1404 - Pq. Tecnológico
CEP: 12.247-016 São José dos Campos/SP - Tel: (11) 5901-5300 www.mtsbrasil.com.br

Folha 1 de 2
FS22-Rev.04

