



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



JONAS BARBOSA HERÉDIA

**DIMENSIONAMENTO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DE UM PATINETE
ELÉTRICO PARA CONFORTO DO PILOTO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

OURO PRETO - MG
2021

JONAS BARBOSA HERÉDIA
jonas.heredia@aluno.ufop.edu.br

**DIMENSIONAMENTO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA DE UM PATINETE
ELÉTRICO PARA CONFORTO DO PILOTO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Gustavo Paulinelli Guimarães

OURO PRETO – MG
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

H542d Heredia, Jonas Barbosa .

Dimensionamento da suspensão dianteira de um patinete elétrico para conforto do piloto através de simulação computacional. [manuscrito] / Jonas Barbosa Heredia. - 2021. 37 f.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães . Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Veículos a motor - Molas e suspensão - Patinete elétrico. 2. Vibração. 3. Molas e Suspensão. I. Guimarães , Gustavo Paulinelli. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jonas Barbosa Herédia

Dimensionamento da suspensão dianteira de um patinete elétrico para conforto do piloto através de simulação computacional

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 10 de dezembro de 2021

Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Diogo Antônio de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. Alison de Andrade Couto - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/12/2021



Documento assinado eletronicamente por Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 15/12/2021, às 16:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=Q, informando o código verificador 0259238 e o código CRC C635E64F.

A minha mãe e minha vó dedico esse trabalho como uma forma de gratidão ao apoio e amor durante toda minha formação.

Sou grato orientador Gustavo que me deu suporte desde o início do trabalho.

AGRADECIMENTO

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica por suas importantes contribuições para minha formação. Em especial ao meu orientador Gustavo.

À minha família, pelo apoio dado e confiança em mim depositado.

Aos amigos de Ouro Preto, pela amizade e companheirismo em especial o Lucas, por toda a colaboração e parceria ao trabalho.

Aos irmãos republicanos em especial aos da família Birinaite.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

HERÉDIA, Jonas Barbosa. Dimensionamento da suspensão dianteira de um patinete elétrico para o conforto do piloto através de uma simulação computacional. 2021. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Ouro Preto.

O caos no trânsito dos grandes centros urbanos e a constante preocupação com o exaurimento dos combustíveis fósseis coloca a sociedade diante da necessidade de novos meios de transporte. Surge, com mais intensidade, as pesquisas com transportes elétricos. Devido à exposição em estradas e rodovias instáveis, além do desconforto que o piloto pode sentir, ele pode sofrer riscos potenciais à saúde, como lesões musculares ou em articulações. Esses riscos se devem à exposição do usuário às vibrações causadas pelo patinete elétrico, principalmente pela suspensão dianteira, que pode ser analisada numericamente. O presente estudo investiga o resultado dessa vibração na suspensão dianteira que é transmitida ao piloto. Um modelo numérico da suspensão dianteira foi então desenvolvido para realizar análise no modelo proposto. Assim, foi possível gerar gráficos de aceleração dos modelos observados para compará-los, além de verificar os resultados em relação a padrões válidos. Com esta modificação, foram obtidos resultados positivos, chegando a uma redução no valor da aceleração efetiva, indicando uma melhora no conforto do usuário.

Palavras-chave: Patinete Elétrico. Ambiente. Vibração. Conforto. Suspensão. Análise Numérica.

ABSTRACT

The chaotic traffic in large urban centers and the constant concern with the depletion of fossils put our society before the need for new means of transport. With more intensity, research on electric transport emerges. Accepting exposure on unstable roads and highways, in addition to the discomfort the rider may feel, he may suffer potential health risks, such as muscle or joint injuries. These risks are due to the user's exposure to vibrations caused by the electric scooter, especially the front suspension, which can be analyzed numerically. The present study investigates the result of this vibration in the front suspension that is transmitted to the pilot. A numerical model of the front suspension was then developed to perform an analysis on the proposed model. Thus, it was possible to generate acceleration graphs of the observed models to compare them, in addition to verifying the results against valid patterns. With this modification, there were positive results, reaching a reduction in the value of the effective acceleration, indicating an improvement in user comfort.

Key-words: Electric Scooter. Environment. Vibration. Comfort. Suspension. Numerical analysis.

LISTA DE SIMBOLOS

F	Força Peso [N]
x	Deslocamento relativo da mola [m]
k_s	Rigidez da suspensão [N/m]
k_r	Rigidez da roda [N/m]
ζ	Fator de amortecimento
B_s	Coefficiente de amortecimento [N.s/m]
M_c	Massa referente a porção frontal [Kg]
M_r	Massa referente a roda [Kg]
f_0	Frequência natural não amortecida [Hz]
f	Frequência natural amortecida [Hz]
c	Constante de amortecimento [N.s/m]
c_c	Constante de amortecimento crítico [N.s/m]
rms	Root mean square
$xrms$	Valor rms calculado de x
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Visão geral patinete elétrico	5
Figura 2 - Motor elétrico sem escova.....	6
Figura 3 - Painel de controle.....	7
Figura 4 - Suspensão patinete elétrico	7
Figura 5 - Exemplo de uma suspensão do tipo estilingue	9
Figura 6- Exemplo de uma suspensão do tipo Earles	10
Figura 7 - Exemplo de uma suspensão do tipo Ceriani.....	10
Figura 8 - Exemplo de uma suspensão do tipo invertida	11
Figura 9 - Comparação entre os movimentos com diferentes tipos de amortecimento.	13
Figura 10 - Excitação de base.....	14
Figura 11 - Razão de frequência(w/w_n) x Transmissibilidade	15
Figura 12 - Resposta a vibrações verticais	15
Figura 13- Limites para fadiga, saúde e conforto ponderados em função da frequência.....	16
Figura 14 - Modelo de meio veículo com (a) um GDL para massa suspensa e (b) para massa não suspensa	18
Figura 15 - Modelo físico proposto	21
Figura 16 - Modelagem do Chassi	22
Figura 17 - Modelagem da Roda	22
Figura 18 - Centro de gravidade (piloto e patinete elétrico).....	23
Figura 19 – Força peso exercida no patinete.....	24
Figura 20 - Dimensionamento da Rigidez.....	24
Figura 21 - Resposta do sistema para diferentes Fatores de Amortecimento.....	26
Figura 22 – Modelo da Suspensão	28
Figura 23 - Resposta da suspensão modelada no software Simulink.....	30
Figura 24 - Comparação dos valores de <i>RMS</i> do modelo com a norma	31
Figura 25 - Comparação dos valores de <i>RMS</i> do novo modelo com a norma	32

Figura 26 - Resposta da nova suspensão modelada no software Simulink.....	33
Figura 27 - Comparação da aceleração dos modelos.....	34
Figura 28- Comparação nos valores de RMS.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis e indicadores.....	19
Tabela 2 - : Especificações técnicas do patinete elétrico Dual-Tron Ultra	19
Tabela 3- Parâmetros utilizados na simulação do modelo	29
Tabela 4 – Calculo da <i>RMS</i> alterando a rigidez do pneu.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Formulação do Problema.....	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Geral.....	3
1.3.2 Específicos	3
1.4 Estrutura do Trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Patinete elétrico.....	5
2.1.1 Guiador.....	5
2.1.2 Plataforma	6
2.1.3 Motores	6
2.1.4 Módulo de controle.....	6
2.1.5 Suspensão.....	7
2.1.6 Bateria.....	7
2.2 Sistema de suspensão.....	8
2.2.1 Estilingue.....	8
2.2.2 Earles.....	9
2.2.3 Telescópica (ceriani).....	10
2.2.4 Suspensão Invertida (upside down).....	11
2.3 Vibração Mecânica.....	11
2.3.1 Sistema Vibratório.....	12
2.3.2 Modelo Patinete Elétrico.....	12
2.3.3 Vibração Livre.....	13
2.3.4 Amortecimento	13
2.3.5 Transmissibilidade.....	14
2.3.6 Conforto veicular.....	15
3. METODOLOGIA	17
3.1 Tipo de Pesquisa.....	17
3.2 Materiais e Métodos	18
3.3 Variáveis e Indicadores.....	19
3.4 Coleta de Dados	19

3.5	Especificações do Patinete Elétrico.....	19
3.6	Tabulação de Dados	20
3.6.1	Modelagem do Chassi (Mc)	21
3.6.2	Modelagem da Roda (Mt)	22
3.6.3	Parâmetros Iniciais do Trabalho.....	22
3.7	Software Simulink.....	27
3.7.1	Diagrama de blocos	27
3.7.2	Modelagem numérica computacional.....	27
3.8	Considerações Finais	28
4.	RESULTADOS.....	29
4.1	Modelagem numérica computacional do modelo proposto.....	29
4.1.1	Análise do modelo proposto	30
4.2	Modelagem computacional do modelo proposto com variação nos parâmetros	31
4.2.1	Análise do modelo proposto com alteração nos parâmetros.....	32
4.3	Comparação de resultados dos modelos	33
4.3.1	Aceleração.....	33
4.4	Valores eficazes.....	34
5.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO	35
5.1	Conclusão.....	35
5.2	Recomendações.....	36
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	36

1. INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

De acordo com Ribeiro (2016), o caos no trânsito dos grandes centros urbanos e a constante preocupação com o exaurimento dos combustíveis fósseis coloca a sociedade diante da necessidade de novos meios de transporte. Surge, com mais intensidade, as pesquisas com transportes elétricos. Um estudo feito pela BloombergNEF aponta que a Europa atingirá 50% da frota de elétricos em 2030 e mostra que os carros elétricos terão um custo de produção equivalente ao dos carros tradicionais no ano de 2027 na Europa. Porém, além de ser uma tecnologia de relativamente alto custo não resolveria o problema do trânsito por não ser de fácil locomoção e armazenamento.

O patinete surgiu pela primeira vez, de acordo com JGS Pereira (2016), como um veículo para crianças na primeira metade do século XX, eram feitos de madeira e tinham duas rodas traseiras e uma dianteira. A partir de 1950, esse veículo se tornou muito popular porque deixou de ser exclusivamente um brinquedo para se tornar um meio de transporte.

Atualmente o patinete é um meio de transporte, que é constituído por duas rodas em série, que sustentam uma base onde o utilizador apoia os pés, guiando-o através de um guidão que se eleva até a altura da cintura (JGS Pereira,2016).

Segundo a PROMOB-e com o avanço da tecnologia o patinete elétrico ganha sua primeira versão nos anos 2000 nos Estados Unidos, logo em seguida tendo sua produção levada para a Ásia. Entretanto, o ponto de inflexão do mercado ocorre com o início de operação de modelos de compartilhamento de grande escala, a partir de 2016 e 2017.

Devido ao compartilhamento em alta escala, existem no mercado diversos tipos de patinetes elétricos. Assim, deve-se considerar alguns aspectos importantes para o uso como a autonomia (que é a distância que ele é capaz de percorrer com uma carga de energia completa), a velocidade máxima atingida, capacidade de carga de acordo com o peso do piloto e possuir sinal sonoro e faróis dianteiro, traseiro e lateral, de acordo com o Ministério da Infraestrutura, se baseiam na resolução nº 465, de 27 de novembro de 2013, do Conselho Nacional de Trânsito (Contran).

Nesse sentido, o sistema de suspensão apresenta também um aspecto importante para o patinete elétrico, pois apresenta uma linha de pesquisa que envolve o estudo de causa e efeito

provocado pela exposição prolongada de vibração e ruído que são nocivos à saúde humana e reduzindo a vida útil de diversos componentes mecânicos da suspensão e da carroceria.

Os fenômenos vibratórios estão fortemente presentes em sistemas veiculares e, por esse motivo aprofundar-se sobre esse assunto sob o prisma da Engenharia Mecânica motiva descobertas através da análise teórica e numérica desses fenômenos.

Assim, devido ao grande crescimento no número de usuários, a busca pelo conforto do piloto e a busca pelo aumento da vida útil dos componentes surge a seguinte questão:

Como realizar o dimensionamento do sistema de suspensão de um patinete elétrico?

1.2 Justificativa

A necessidade de incorporar um veículo pessoal eficiente e sem emissão de gases poluentes movido a propulsão elétrica, permite a evolução da logística diária da população evitando congestionamento em vias públicas em horário de pico e também minimizando o uso dos estacionamentos em centros comerciais.

As questões pertinentes a este projeto são relacionadas à falta de opções nos modos de deslocamentos, consciência e o individualismo associado às tarefas cotidianas. Além disso outro atrativo para patinetes elétricos no Brasil, é que o país possui a matriz energética mais renovável do mundo industrializado, segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética do Governo Federal). Portanto, o patinete elétrico surge como boa opção na tentativa de suprir as necessidades contemporâneas e melhorar a qualidade de vida dos habitantes.

Em alguns países, como por exemplo os EUA e Canadá, de acordo com a BBC NEWS vem sendo desenvolvida e comercializada uma nova tipologia de patinete elétrico, o *high e-scooter*, que atinge uma velocidade maior comparada aos atuais. Esses novos patinetes possuem uma estrutura mais robusta, um sistema de suspensão semelhante ao de bicicletas e motocicletas e baterias com maior “capacidade” demonstrando um forte potencial de mercado.

Além disso, a pesquisa pelo termo “patinete elétrico” no Google em 2019 representou o ponto mais alto de interesse de pesquisa, demonstrando a popularidade no assunto no ano anterior ao início da pandemia COVID-19 evidenciando o mercado crescente e exigente buscando se interessar mais pelo assunto. Com isso surge a necessidade das empresas de se

adaptarem a essa demanda e suprirem a necessidade dos clientes, aumentando o conforto e a vida útil de componentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar o dimensionamento da suspensão dianteira de um patinete elétrico para aplicação em centros urbanos e rurais. Serão utilizados modelos numéricos para avaliação do desempenho.

1.3.2 Específicos

- Efetivar a revisão bibliográfica de amortecedores existente em motocicletas e bicicletas e aplicado para patinetes elétricos;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Analisar numericamente o modelo da suspensão;
- Definir o desenho da estrutura do sistema proposto;
- Validar uma modelagem computacional.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito de suspensões já existentes de motocicleta e bicicleta.

O terceiro capítulo refere-se a metodologia, onde será apresentado os materiais envolvidos para resolução do problema, ferramentas, técnicas, métodos e procedimento utilizado para o dimensionamento da suspensão.

O quarto representando os resultados e discussões onde será abordado a eficácia do dimensionamento da suspensão proposta.

E por último, o quinto capítulo, conclusões e recomendações, onde será apresentado resposta baseado nos resultados, a problemática proposta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo são apresentados conceitos sobre patinete elétrico (scooter), aprofundando nos seus sistemas, com foco na suspensão. Além disso, serão abordados outros fatores relevantes para o estudo feito, como a dinâmica, vibrações mecânicas e suas implicações no conforto veicular. Sendo assim, esse capítulo tem como finalidade apresentar a base teórica utilizada para o desenvolvimento do estudo feito.

2.1 Patinete elétrico

Patinetes elétricos de acordo com Hamm (2020) podem ter muitos projetos (ou conceitos) e características diferentes, mas existem peças e componentes que podem ser considerados regras operacionais. Cada um desses componentes possui funções importantes que determinam o desempenho, segurança, durabilidade e qualidade do produto final.

Na Figura 1 pode ser observado os componentes do patinete elétrico Mi Electric Scooter Pro do fabricante Xiaomi.

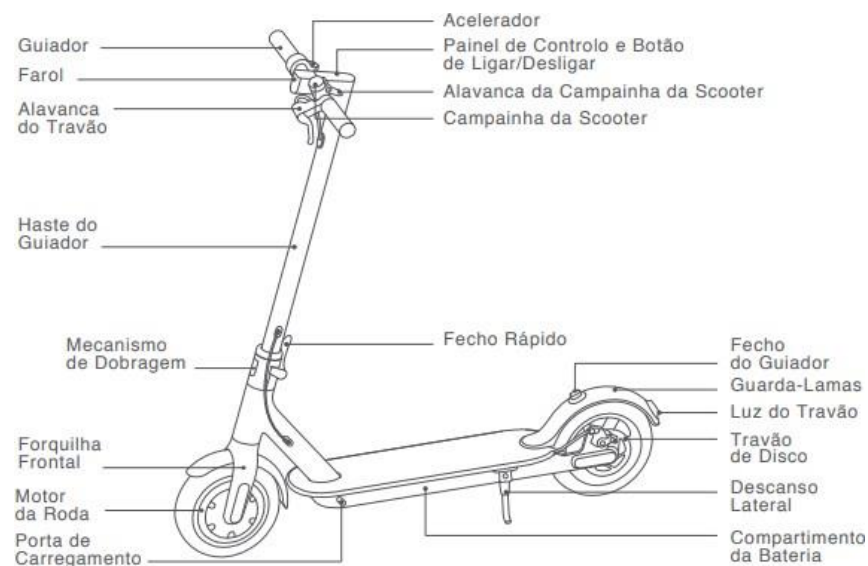


Figura 1-Visão geral patinete elétrico

Fonte: Manual do proprietário Mi Electric Scooter Pro Xiaomi®.

2.1.1 Guiador

O guiador é usado nos patinetes elétricos assim como nos patinetes convencionais e são controlados pela mão do usuário para indicar a direção do veículo. Além disso é estendido à roda dianteira por um elemento móvel em relação ao eixo vertical do patinete. (Hamm, 2020)

2.1.2 Plataforma

A plataforma da *scooter* elétrica deve ser robusta para suportar o peso dos passageiros, baterias e outros componentes, além das cargas projetadas para serem suportadas pelo patinete elétrico (Hamm, 2020).

2.1.3 Motores

De acordo com Hamm (2020), os motores convencionais de patinetes elétricos que necessitam de um sistema de câmbio ou de corrente, estão sendo substituídos por motores elétricos sem escova, pois o seu formato circular permite ser acoplados nas rodas eliminando a necessidade de caixa de câmbio reduzindo a quantidade de peças.

Não existem limitações, mas em geral os patinetes mais modernos são baseados no sistema de 24 volts, 36 volts ou 48 volts com motores que trabalham na faixa de 250 w a 500 w. Isso pode influenciar em todos os aspectos funcionais do patinete como torque a capacidade de subir declives, velocidade e autonomia.



Figura 2 - Motor elétrico sem escova
Fonte: produto.mercadolivre.com.br

2.1.4 Módulo de controle

O módulo de controle é o painel do patinete como pode se observar na Figura 3 e é responsável pela comunicação de todos os componentes: acelerador, bateria e motores controlando sua velocidade de rotação. Este recebe informações do acelerador e freios eletrônicos, quando pressionado pelo usuário, processa e controla o fluxo de energia providenciada pela bateria ao motor de forma digital. O módulo pode também conter sistema de segurança programado para proteger os demais componentes de possíveis avarias além de calcular a velocidade do patinete. (Hamm, 2020).



Figura 3 - Painel de controle
Fonte: produto.mercadolivre.com.br

2.1.5 Suspensão

A suspensão não é obrigatória e não equipara todos os patinetes elétricos, mas é uma parte importante para aumentar o conforto do produto além de evitar lesões nos joelhos e dores no corpo de acordo com Tanelli *et al* (2014). Também pode evitar danos no patinete em caso de estradas sem uniformidades ou sem asfalto. No subcapítulo 2.3 este assunto será abordado de maneira específica.



Figura 4 - Suspensão patinete elétrico
Fonte: magazineluiza.com.br

2.1.6 Bateria

As baterias de patinetes elétricos São normalmente compostas por uma série de pilhas de Li-íon. Baterias de Li-íon apresentam uma baixa relação carga-peso. Por isso se tornam uma ótima opção para esse tipo de veículo. Outros, utilizam baterias lítio-magnésio, que operam altas correntes em temperaturas mais baixas, sendo uma opção mais segura. É importante verificar o limite de ciclos de recarga de uma bateria, pois isso determina sua durabilidade. (Hamm, 2020).

2.2 Sistema de suspensão

Segundo Marshall (2006), as vibrações causadas pela estrutura do veículo são transmitidas pelos pneus, suspensão e ocupantes do veículo. Portanto, um modelo dinâmico de um patinete elétrico é necessário para estudar o comportamento deste veículo na frequência gerada pela auto-excitação do pneu quando está em uma pista desuniformes. A resposta de um patinete elétrico a essas frequências deve ser calculada levando-se em consideração a dinâmica da estrutura.

O bom funcionamento das suspensões de acordo com a fabricante Honda (Honda Motor Company, Limited, Hamamatsu, Shizuoka, Japão) é fundamental para qualquer tipo de motocicleta ou scooter. A questão não é apenas relativa ao conforto, mas principalmente ao fator segurança, item que engloba a estabilidade, maneabilidade e capacidade de frenagem.

Além disso, de acordo com Tanelli *et al* (2014), o sistema de suspensão contribui para a aderência do veículo / manuseio, mantendo o piloto confortável e razoavelmente bem isolado do ruído da estrada. Além disso, as suspensões afetam o acabamento do veículo. A escolha adequada da suspensão dianteira e traseira dependem de muitos parâmetros como: o peso do piloto e do veículo, a posição do centro de gravidade, as características de rigidez e amortecimento vertical dos pneus, a geometria da motocicleta, as condições de uso, a superfície da estrada, a frenagem desempenho, a potência do motor e a técnica de condução, entre outros. De acordo com Icaro (2017) alguns tipos de suspensão dianteira podem ser classificados através como estilingue, earles, telescópica e invertida como pode ser observado nos capítulos abaixo.

2.2.1 Estilingue

De acordo com JC MAXI (2019), a primeira suspensão, rudimentar, contava apenas com uma mola para absorver o impacto. A suspensão, mostrada na Figura 5, era formada por bengalas duplas paralelas, uma à frente da outra. A bengala traseira é imóvel e fixada na mesa do guidão. A bengala da frente é ligada a traseira por um link em baixo e em cima fica a mola.



Figura 5 - Exemplo de uma suspensão do tipo estilingue.
Fonte: JC MAXI (2019)

O eixo da roda é fixo na bengala dianteira. Ao passar por uma ondulação, a roda empurra a bengala dianteira contra a mola. A vantagem em relação ao garfo rígido foi nítida, à medida que as molas suavizavam o impacto recebido do solo para os chassis. Por sua constituição, essa suspensão foi denominada de estilingue. JC MAXI (2019)

A característica de uma mola é sua deformação elástica. Ela recebe uma carga que a deforma (encolhe), e depois a mola devolve essa carga quando volta a expandir ao seu formato original. Mas até a mola se estabilizar novamente em seu formato original, ela fica nesse processo de encolhe-expande diminuindo o percurso a cada ida e volta, até voltar ao seu tamanho natural. Essa oscilação acaba desestabilizando a frente da moto. JC MAXI (2019)

2.2.2 Earles

Segundo Icaro (2017) a necessidade de criar um sistema que, ao mesmo tempo permitisse a deformação da mola, mas impedisse sua oscilação, surgiu o amortecedor como pode ser visto na Figura 6. O funcionamento de um amortecedor é, basicamente forçar a passagem de um fluido hidráulico por pequenos orifícios criando assim uma resistência a essa passagem. Com isso, o amortecedor acaba inibindo a oscilação da mola. Quando a roda recebe o impacto, comprime a mola e o amortecedor gera a resistência para que esta volte de uma única vez a sua posição de repouso.



Figura 6- Exemplo de uma suspensão do tipo Earles.
Fonte: JC MAXI (2019)

Os primeiros modelos tinham o amortecedor separado da mola. Vários fabricantes criaram seus sistemas próprios. Assim, surgiu a suspensão denominada Earles. Consistia em um garfo rígido, curvado para trás e uma balança que era movimentada pela atuação das molas e dos amortecedores como pode se observar na figura.

2.2.3 Telescópica (ceriani)

O próximo passo de acordo com JC MAXI (2019) foi a evolução da suspensão telescópica, com a introdução da mola no tubo interno como pode ser visto na Figura 8. A vantagem foi a colocação de uma mola mais longa, mais estreita e mais eficiente. Essa suspensão também é chamada de Ceriani, pois é o nome da empresa italiana que a criou.

Suspensão Dianteira Telescópica

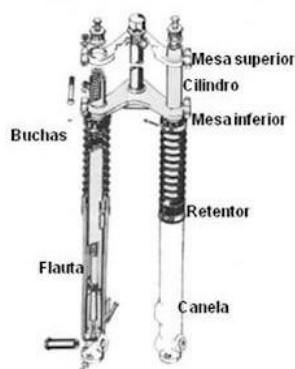


Figura 7 - Exemplo de uma suspensão do tipo Ceriani.
Fonte: Motos Clássicas 80

O garfo telescópico se movimenta para cima e para baixo com o acionamento vertical dos amortecedores, ao mesmo tempo em que, devido ao peso da moto (em uma freada) é deslocado para frente, gerando um efeito longitudinal. Como o perfeito funcionamento dos amortecedores depende do alinhamento das bengalas (entre elas e entre si – tubos externo e interno), esse desalinhamento compromete sua atuação de forma correta. Além disso, nas motos que tem apenas um freio dianteiro (somente de um lado da roda), existe uma torção entre as suspensões, pois uma bengala está ancorando e resistindo à pressão do freio, enquanto a outra está livre. JC MAXI (2019)

2.2.4 Suspensão Invertida (upside down)

O tradicional garfo tipo Ceriani vem gradativamente substituído por uma ideia bastante simples, mas igualmente muito eficiente: o garfo invertido como pode ser observado na Figura 8.



Figura 8 - Exemplo de uma suspensão do tipo invertida
Fonte: pedal.com.br

Nele, a parte mais pesada e de maior diâmetro do amortecedor é que fica presa as mesas. O pistão, mais fino e leve, se movimenta, fixo ao eixo da roda. O garfo upside-down tem muitas vantagens. A mais imediata é reduzir sensivelmente a massa não-suspensa na motocicleta, com vantagens para manobrabilidade e reduzir a ocorrência de flexões e torções na dianteira da moto, tornando a dirigibilidade mais segura JC MAXI (2019).

2.3 Vibração Mecânica

Segundo Rao (2008), as pessoas começaram a se interessar pela vibração quando foram descobertos os primeiros instrumentos musicais, provavelmente apitos ou tambores. Desde

então, elas vem aplicado engenhosidade e investigação crítica ao estudo do fenômeno da vibração.

Gillespie (1992) em seu livro Fundamentos de Dinâmica Veicular deixa claro que ambiente de vibração é um dos critérios mais importantes pelos quais as pessoas julgam o design e a “qualidade” de construção de um carro. Sendo um julgamento, e de natureza subjetiva, de onde surge uma das maiores dificuldades em desenvolver métodos objetivos de engenharia para lidar com o passeio como um modo de desempenho do veículo.

2.3.1 Sistema Vibratório

Um Sistema vibratório segundo Rao (2008) é um sistema dinâmico para o qual as variáveis como as excitações (entradas) e respostas (saídas) são dependentes do tempo. Em geral, a resposta de um sistema vibratório depende das condições iniciais, bem como das excitações externas. A maioria dos sistemas vibratórios encontrados na prática são muito complexos, e é impossível considerar todos os detalhes para uma análise matemática. Somente as características mais importantes são consideradas na análise para prever o comportamento do sistema sob condições de entradas especificadas. Muitas vezes, o comportamento global do sistema pode ser determinado considerando até mesmo um modelo simples do sistema físico complexo. Assim, a análise de um sistema vibratório normalmente envolve modelagem matemática, obtenção de equações governantes, soluções das equações e interpretação dos resultados (Tanelli *et al*, 2014).

2.3.2 Modelo Patinete Elétrico

Do ponto de vista da dinâmica de acordo com Tanelli *et al* (2014), o veículo de duas rodas pode ser considerado como uma carroçaria principal com molas (chassis e piloto) conectado a dois corpos não suspensos (rodas) com dois sistemas elásticos (dianteiro e suspensão traseira). Além disso, em vez das características das unidades de amortecimento de mola, é importante considerar as características das suspensões em termos de deslocamento vertical da roda em função da força vertical aplicada. Portanto, é útil reduzir as suspensões reais a suspensões equivalentes, mais simples, representadas por dois elementos verticais de mola-amortecedor que conecte as massas não suspensas à massa suspensa. Os parâmetros que definem a suspensão equivalente são: rigidez reduzida, amortecimento reduzido, dependência da rigidez reduzida do deslocamento vertical (suspensão progressiva / regressiva), curso máximo e pré-carga. (Tanelli *et al*, 2014)

2.3.3 Vibração Livre

Segundo Rao (2008) o estudo da vibração livre de sistemas, amortecidos e não amortecidos é fundamental para o entendimento de questões mais avançadas de vibrações. No sistema não amortecido não há amortecimento, representando uma vibração livre e ideal. A equação 1 mostra como se dá esse movimento.

$$x(t) = x_0 \cos \omega_n t + \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \operatorname{sen} \omega_n t \quad (1)$$

2.3.4 Amortecimento

A vibração livre de acordo com Rao (2008) desaparece com o tempo sob cada uma das três possíveis condições de amortecimento (subamortecimento, amortecimento crítico e superamortecimento) como será visto nos próximos itens.

Para qualquer sistema amortecido, o fator de amortecimento Zeta é definido como a razão entre a constante de amortecimento e a constante de amortecimento crítico: (Rao, 2008)

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2)$$

Na Figura 9 pode ser observado a resposta temporal em relação ao tipo de amortecimento.

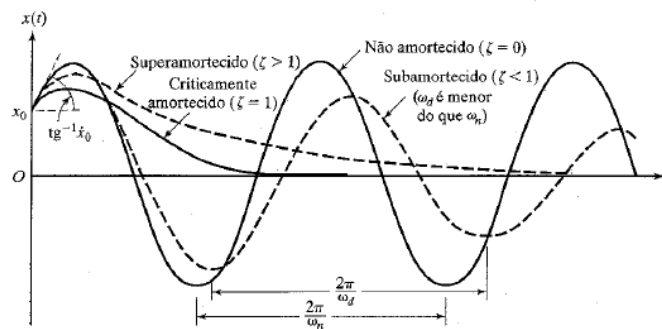


Figura 9 - Comparação entre os movimentos com diferentes tipos de amortecimento. Fonte: Rao, 2008.

O decremento logarítmico visto na figura 10 representa a taxa de redução da amplitude de uma vibração livremente amortecida. É definido com o logaritmo natural da razão entre duas amplitudes sucessivas.

2.3.5 Transmissibilidade

De acordo com Rao (2008), a base ou o suporte de um sistema massa mola- amortecedor sofre movimento harmônico, como mostra a Figura 10 (a). Seja $y(t)$ o deslocamento da base e $x(t)$ o deslocamento da massa em relação a sua posição de equilíbrio estático no tempo t . Então, a elongação líquida da mola é $x - y$ e a velocidade relativa entre as duas extremidades do amortecedor é $\dot{x} - \dot{y}$. Pelo diagrama de corpo livre mostrado na Figura 10(b), obtemos a equação o de movimento:

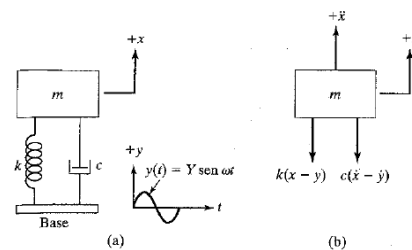


Figura 10 - Excitação de base
Fonte: Rao (2008)

Pelo diagrama de corpo livre mostrado na Figura 10(b), obtém-se a equação o de movimento:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (3)$$

Além disso é valido enfatizar a razão entre a amplitude da resposta $x_p(t)$ a do movimento da base movimento $y_p(t)$, x/y , é denominada transmissibilidade de deslocamento. As variações de $x/y = T_d$, dadas pelas equações abaixo e podem ser representadas em forma gráfica de acordo com a relação r e T_d de acordo com a Figura 11.

$$\frac{x}{y} = \left[\frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

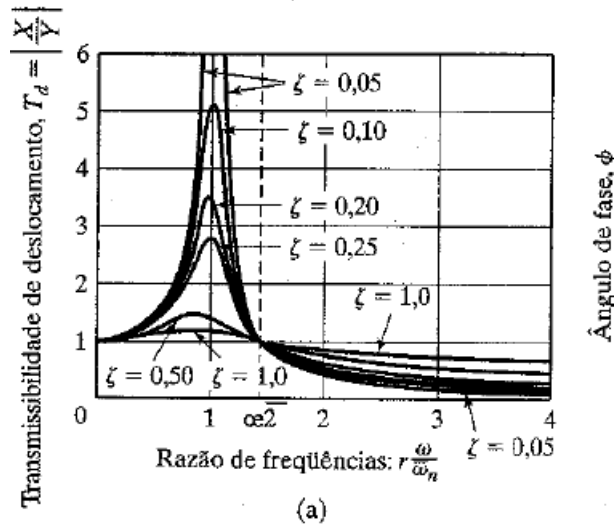


Figura 11 - Razão de frequência (ω/ω_n) x Transmissibilidade
 Fonte: Rao (2008)

2.3.6 Conforto veicular

De acordo com Gillespie (1992), o estudo do assunto indica que não existe um padrão absoluto de conforto ou desconforto expresso em termos físicos, como amplitudes ou aceleração em determinada frequência. No entanto, há concordância suficiente entre os dados de teste de vários investigadores para que uma zona possa ser delineada, acima cuja vibração é certamente intolerável e abaixo da qual é tolerável como pode ser observado na Figura 12.

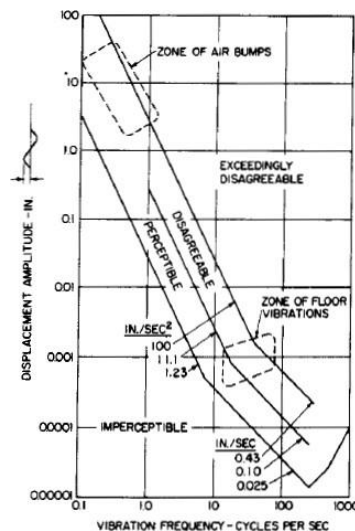


Figura 12 - Resposta a vibrações verticais
 Fonte: Gillespie (1992)

A Figura 12 avalia dez estudos originais que vão desde enjoo de movimento e estudos de mesa de vibração comum até a sensibilidade na ponta dos dedos experimentos. A suposição de que a classificação de conforto é contínua ao longo de uma ampla gama de frequências e amplitudes, embora para o fisiológico as respostas podem diferir dentro desses intervalos.

Ademais, de acordo com Icaro (2017) uma forma de quantificar a vibração é usar o parâmetro aceleração, que serve de base para a norma ISO 5349-1 (2001). A norma utiliza os valores eficazes de aceleração, ou valores *rms* (*root mean square*) que pode ser utilizada para avaliar a energia media contida no movimento de oscilação presente, avaliando assim, o possível potencial danoso da vibração como pode ser observado na Figura 13.

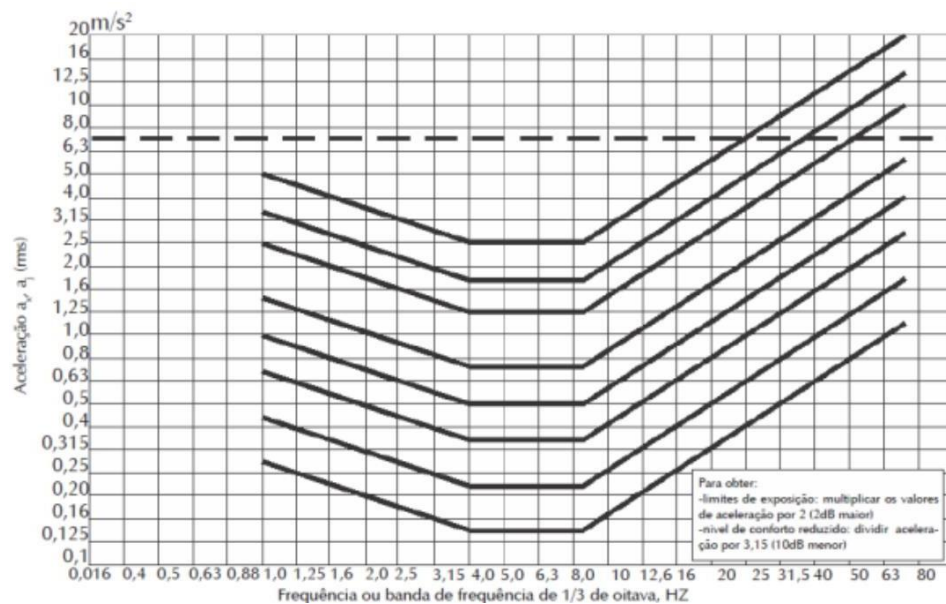


Figura 13- Limites para fadiga, saúde e conforto ponderados em função da frequência
 Fonte: Icaro (2017)

Como é mostrado na Figura 13, a norma ISO 5349-1 (2001) existe uma faixa de aceleração *rms* aceitável, representando o limite de exposição, indicado pela linha pontilhada, e indica que os valores de risco só é presente para valores acima de 6,3 m/s².

O valor eficaz possui diversas formas de ser calculado dependendo da distribuição dos valores. Para uma distribuição discreta, valores definidos x₁ a x_n, usa-se a fórmula especificada na Equação 5 (Icaro, 2017)

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (5)$$

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve as características do desenvolvimento do projeto, como tipos de pesquisa, recursos e uso. São apresentados a natureza do estudo utilizado ,e os indicadores e, ferramentas de coleta e agregação dos dados.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Gil (2008), a pesquisa é um processo formal e sistemático de desenvolvimento de métodos científicos, cujo objetivo básico é usar processos científicos para encontrar respostas para problemas.

Além disso, Demo (1995) designa a investigação como uma atividade cotidiana, crítica e criativa de investigação, sendo a uma intervenção potente na realidade, ou no sentido teórico e prático.

Ter um diálogo constante e crítico com a realidade de estudos podem ser categorizados em dois métodos: estudos quantitativos e estudos qualitativos. Estudo quantitativo para Polit et al. (200) tende a enfatizar o raciocínio dedutivo, regras lógicas e características mensuráveis da experiência humana. Segundo Gil (2008), por meio de testes estatísticos, é possível determinar numericamente a probabilidade de uma determinada conclusão ser verdadeira e a margem de erro do valor obtido.

Segundo Oliveira (2011), a pesquisa qualitativa tem uma abordagem baseada na percepção dos fenômenos em seu contexto. O uso de explicações visa captar a essência do fenômeno, explicar sua origem e compreender visualmente os resultados sem recorrer a cálculos numéricos.

Pela abordagem apresentada, a natureza deste trabalho é considerada quantitativa, uma vez que foram feitos estudos e análises numéricas através de simulação computacional em um modelo de patinete elétrico.

3.2 Materiais e Métodos

A princípio, foi feito um estudo bibliográfico sobre veículos de duas rodas, onde foi analisado em específico a suspensão dianteira de motocicletas. Mais parâmetros foram encontrados para para serem considerados no modelo.

A pesquisa foi desenvolvida pelo método experimental, utilizando o Simulink como software.

O modelo utilizado (Figura 14) é conhecido como modelo de meio veículo que, de acordo com Tanelli et al (2014), são ideais para analisar o suspensão-dinâmica do pneu. O nome se deve ao fato de que apenas um pneu e uma suspensão são considerados.

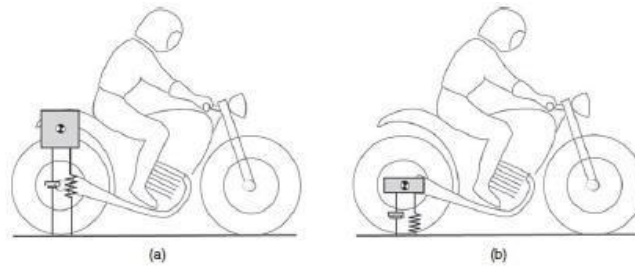


Figura 14 - Modelo de meio veículo com (a) um GDL para massa suspensa e (b) para massa não suspensa
Fonte: Tanelli et al (2014)

Como pode se observar na Figura 14, é possível analisar dois modelos, o modelo de massa suspensa e o de massa não suspensa. No primeiro caso, o amortecedor de mola elemento representa a suspensão, enquanto a conformidade do pneu é negligenciada (Figura 14a), no segundo caso, o elemento amortecedor de mola representa a conformidade do pneu, enquanto a dinâmica da suspensão é desprezada (Figura 14b). Além disso, outros parâmetros importantes para se entender melhor o problema é a frequência natural não amortecida f_0 , frequência amortecida f e razão de amortecimento ζ são descritos pelas fórmulas:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K_z}{m}} \quad (6)$$

$$f = f_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{c_z}{2m(2\pi f_0)} \quad (8)$$

Onde k_z é a rigidez, c_z o coeficiente de amortecimento e m a massa.

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (2008), as variáveis são definidas por diferentes aspectos e valores, dependendo da situação e do caso particular.

Para o presente trabalho, a Tabela 1 apresenta a variável utilizada e seus respectivos indicadores.

Tabela 1 - Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Conforto	Amortecimento Aceleração Deslocamento devido á vibração
Saúde	Aceleração rms

Fonte: Pesquisa direta, 2021

3.4 Coleta de Dados

Os instrumentos de coleta de dados utilizados na pesquisa foram através de um fornecedor no mercado atual e comparados com o modelo desenvolvido neste trabalho. No próximo tópico será abordado com mais detalhes.

3.5 Especificações do Patinete Elétrico

O patinete elétrico usado como base para estudo é o modelo Ultra da fabricante *Dual-Tron* que possui as especificações técnicas como pode se observar na Tabela 2

Tabela 2 - : Especificações técnicas do patinete elétrico Dual-Tron Ultra

Motor	Max 5.400W BLDC DUAL HUB MOTOR
Bateria	Li-Ion
Capacidade da Bateria	1,894Wh – 60V, 32 Ah
Peso seco	Aproximadamente 37 Kg
Suspensão dianteira	Suspensão invertida (upside down)
Pneu	11 Polegadas – 90 mm de largura
Largura	600 mm
Altura	1219 mm
Comprimento	1235 mm
Distância entre eixos	956 mm

Ângulo de câster	20°
Velocidade máxima	75~80Km/h
Carga máxima	120~160 Kg

Fonte: *Dual-Tron*, 2021

Os parâmetros mostrados na tabela 2 foram utilizados para o desenvolvimento do estudo de conforto da suspensão dianteira do patinete elétrico.

3.6 Tabulação de Dados

Seguindo a pesquisa bibliográfica, a tabulação de dados foi realizada através do *software Simulink* que analisa o comportamento dinâmico da suspensão do patinete elétrico proposto, como pode se observar na Figura 15.

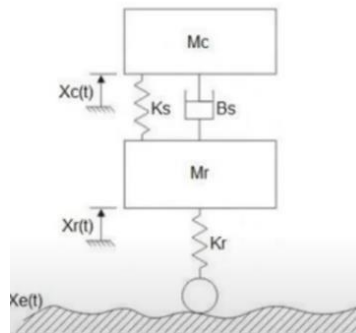


Figura 15 - Modelo físico proposto
Fonte: Sousa (2016)

Para se compreender o dimensionamento da suspensão dianteira de um patinete elétrico, foi considerada a porção dianteira do patinete como pode ser observado na Figura 15 que representa a suspensão e roda dianteiras.

Para o presente trabalho os parâmetros utilizados como pode se observar na Figura 15 inicialmente foram:

- Massa suspensa do patinete referente à porção frontal, M_c ;
- Rigidez da mola da suspensão, K_s ;
- Coeficiente de amortecimento, B_s ;
- Rigidez da roda, K_r ;
- Massa da roda (massa não-suspensa), M_r .

3.6.1 Modelagem do Chassi (Mc)

A modelagem do chassi pode ser representada pelos seguintes vetores apresentados na Figura 16:

$$K_s(x_c - x_r) \quad (9)$$

$$B_s(\dot{x}_c - \dot{x}_r) \quad (10)$$

Onde K_s e B_s expostos anteriormente representam respectivamente a rigidez da suspensão e o coeficiente de amortecimento.

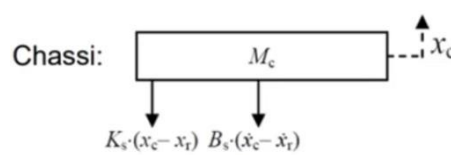


Figura 16 - Modelagem do Chassi

3.6.2 Modelagem da Roda (Mt)

A modelagem da roda pode ser representada além dos vetores 14 e 15 pelos seguintes vetores apresentados na Figura 17:

$$K_t(x_r - x_c) \quad (11)$$

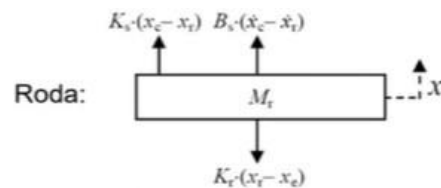


Figura 17 - Modelagem da Roda

Onde K_t exposto na Figura 17, representa a rigidez da roda.

3.6.3 Parâmetros Iniciais do Trabalho

Como esses parâmetros não são encontrados facilmente em especificações de patinetes elétricos, foram considerados alguns valores de fornecedores encontrados no mercado e em fóruns da internet.

Para o cálculo da massa suspensa do patinete referente à porção frontal M_c , foi realizado um estudo de centro de gravidade baseado em uma análise de massa total (massa do usuário e

do patinete elétrico) de 150 Kg como pode se observar na Figura 18.

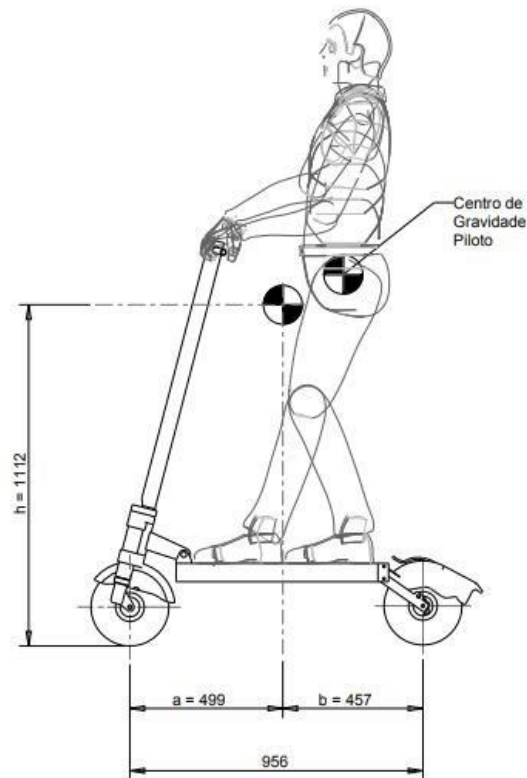


Figura 18 - Centro de gravidade (piloto e patinete elétrico)
Fonte: Cadrolino (2021)

A partir da análise da Figura 18 de acordo com Apicella, M (2015), tem se que a massa relativa à porção frontal, considerando o somatório da massa do patinete e a massa do piloto de 150 Kg, é:

$$m_{pt} = \frac{M_t \cdot a}{a + b} = \frac{150 \cdot 499}{956} = 78 \text{ Kg} \quad (13)$$

Sendo assim, M_c pode ser definido por:

$$\begin{aligned} M_c &= m_{pf} \\ M_c &= 71 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (14)$$

A rigidez da mola da suspensão K_s foi calculada a partir da Força peso como pode se observar na Figura 19.

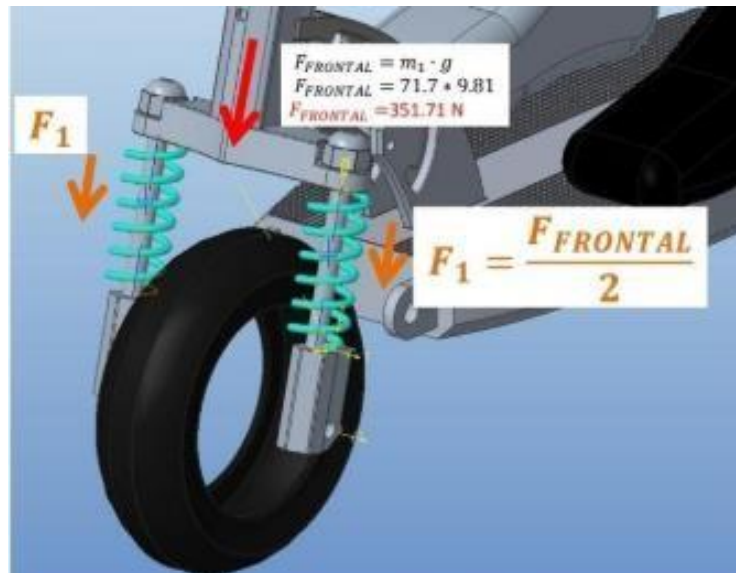


Figura 19 – Força peso exercida no patinete
 Fonte: <https://electricscooterparts.com/shocks.html>

Como pode ser observado na Figura 19 a Força Peso exercida na suspensão é de 351,7N

A partir desses cálculos é possível mensurar a rigidez da mola da suspensão pela equação 15

$$F = Ks \cdot x \quad (15)$$

Como mostra a Figura 20, foi considerado um comprimento de 115 mm da mola da suspensão e um deslocamento máximo da mola de 0,4L. Ou seja $x = 0,4 \cdot 115 = 46$ mm

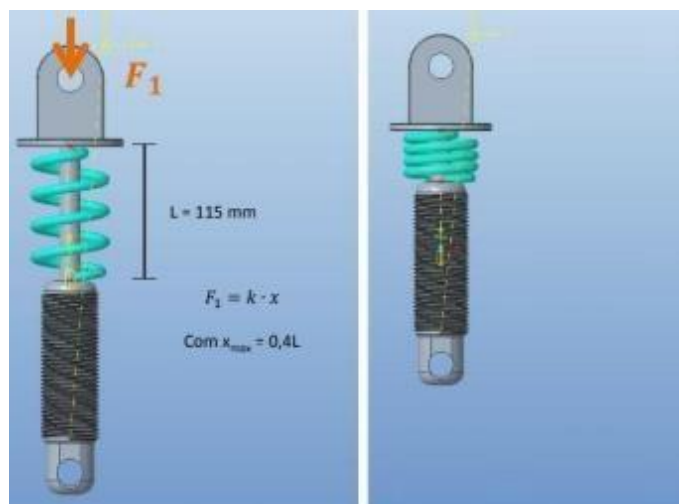


Figura 20 - Dimensionamento da Rigidez
 Fonte: Pesquisa direta (2021)

Assim, a rigidez da mola pode ser expressa por:

$$K_s = \frac{F_1}{x} \quad (16)$$

$$K_s = \frac{351,7}{0,046} = 7645,6 \text{ N/m}$$

Outro fator importante para o controle das oscilações da suspensão é o fator de amortecimento (ξ), que é uma relação entre o coeficiente de amortecimento B_s [Ns/m] e o coeficiente de amortecimento crítico C_{crit} [Ns/m]. O amortecimento crítico é definido como nível de amortecimento que permite que uma massa, ao ser liberada de uma posição diferente do original, retorne à sua posição em estado permanente sem ultrapassá-la. Pode ser matematicamente representada por:

$$\xi = \frac{B_s}{c_{crit}} = \frac{B_s}{\sqrt{2Km}} \quad (17)$$

$$B_s = \xi \sqrt{2K_s m}$$

O fator de amortecimento caracteriza a resposta do veículo no tempo durante uma perturbação inicial e serve de importante ferramenta para analisar o comportamento das oscilações no domínio do tempo. A Figura 21 a seguir demonstra o comportamento do sistema diante de um pulso unitário para 12 diferentes fatores de amortecimento.

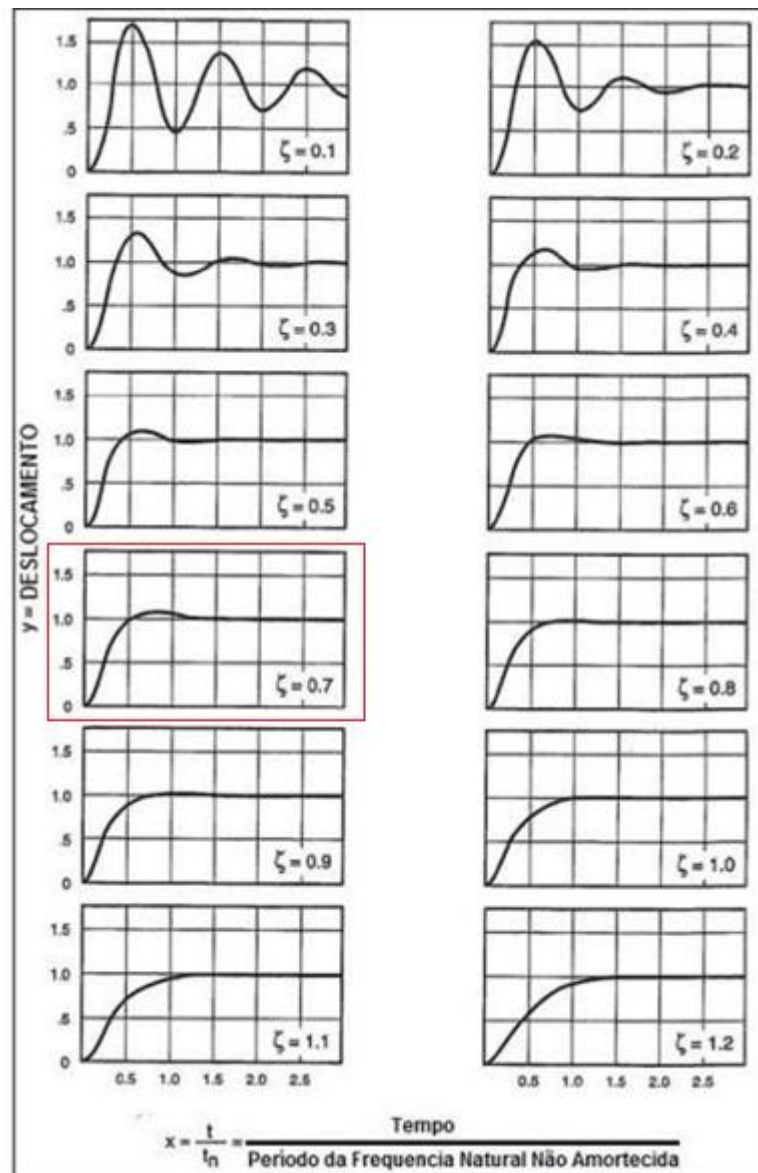


Figura 21 - Resposta do sistema para diferentes Fatores de Amortecimento
 Fonte: Sarabando (2014)

Ao analisar Figura 21, nota-se que o primeiro fator de amortecimento que proporciona uma única oscilação antes da estabilização é em $\xi = 0.7$, como pode ser observado na figura 21, em que segundo Sarabando (2014) é o ideal para o deslocamento vertical do veículo, pois proporciona o melhor tempo de resposta evitando oscilações excessivas durante o tempo de estabilização.

Assim, substituindo na Equação 16 tem-se o valor do coeficiente de amortecimento de:

$$B_s = 0,7\sqrt{2 \cdot 7645,6 \cdot 71} = 729,3\text{Ns/m} \quad (17)$$

A massa da roda M_r foi fornecida pelo cliente em uma faixa entre 5 a 6 Kg. Sendo assim, será considerado uma massa de 6 Kg para o pneu.

3.7 Software Simulink

O Simulink, desenvolvido pela empresa MathWorks, é uma ferramenta para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos. Sua interface principal é uma ferramenta gráfica de blocos e bibliotecas de blocos personalizáveis. O software oferece integração com o ambiente MATLAB e é amplamente utilizado em teoria de controle e processamento digital de sinais para simulação e projeto de múltiplos domínios.

3.7.1 Diagrama de blocos

Diagrama de blocos é a modelagem por meio de blocos utilizando-se a transformada de Laplace nas equações do sistema. São as entradas do sistema e estão presentes na biblioteca de fontes (*sources*). A seguir, apresentamos as fontes utilizadas no trabalho:

- Bloco Elemento de Ganho (*Gain*): realiza a multiplicação de valores da equação matemática.
- Bloco Degrau (*Step*): produz uma função degrau. Pode-se configurar o instante em que se aplica o degrau, assim como sua magnitude antes e depois da transição.
- Bloco de adição (*add*): realiza as operações matemáticas básicas de multiplicação e subtração.
- Bloco integrador (*Integrator*): realiza a integração da equação matemática.
- Osciloscópio (*Scope*): produz gráficos a partir de dados do modelo.

3.7.2 Modelagem numérica computacional

O modelo realizado no Simulink, através da análise da Figura 15, considera um modelo análogo ao modelo de meio veículo proposto por Tanelli et al (2014), com massa do patinete (porção relativa a parte frontal), rigidez e amortecimento do sistema de suspensão, massa da roda e rigidez do pneu.

3.7.2.1 Montagem do modelo original

Utilizando os elementos descritos na metodologia, o modelo da suspensão dianteira do patinete elétrico foi desenvolvido no *software* Simulink conforme a Figura 15, e é demonstrado na figura abaixo.

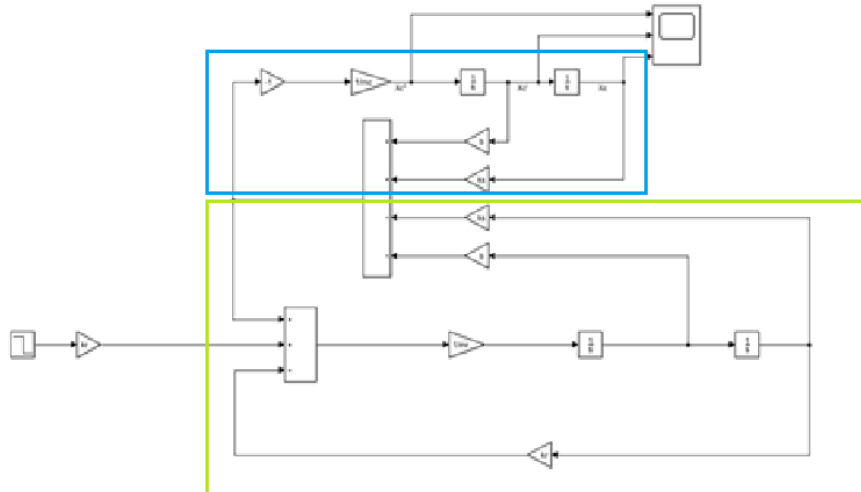


Figura 22 – Modelo da Suspensão
 Fonte: Pesquisa direta (2021)

Na Figura 22 pode se observar a união dos blocos para a resolução da equação de modelo de meio veículo proposto por Tanelli et al (2014). Sendo que a área representada em azul refere-se ao dimensionamento da massa suspensa do patinete referente à porção frontal, M_c ; rigidez da mola da suspensão, K_s e o coeficiente de amortecimento, B_s ; já a região delimitada por verde diz respeito a rigidez da roda, K_r e a massa da roda (massa não-suspensa), M_r . Além disso é possível observar o degrau do lado esquerdo da figura que representa a excitação do sistema e na parte superior da imagem é possível perceber a placa coletora de sinais.

3.8 Considerações Finais

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para desenvolver este trabalho. Os tipos de investigação e metodologias utilizadas, as variáveis e indicadores utilizados no processo de desenvolvimento, os meios de recolha e análise dos dados examinados.

4. RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos pela modelagem do sistema de suspensão de um patinete elétrico.

Os métodos utilizados, procedimentos adotados conforme as bibliografias utilizadas serão abordadas a fim de aprofundar a teoria revisada no sistema em questão.

4.1 Modelagem numérica computacional do modelo proposto

O modelo realizado no Simulink considera o modelo de meio veículo, análogo ao modelo de Tanelli et al (2014).

A partir da Tabela 3, é possível observar os parâmetros utilizados na modelagem da suspensão dianteira de um patinete elétrico neste trabalho. Sendo que a rigidez da mola considerada foi o somatório das duas observadas na Figura 19.

Tabela 3- Parâmetros utilizados na simulação do modelo

Massa [Kg]	71.7
Coefficiente de amortecimento [N.s/m]	1036,6
Rigidez da mola do amortecedor [N/m]	15291,2
Rigidez do pneu [N/m]	180000
Massa da roda [Kg]	6
Degrau de excitação	-0.04

Fonte: Pesquisa direta (2021)

O valor de maior incerteza desse trabalho foi o da rigidez do pneu. Assim, o valor usado foi de 180000 N/m considerado também por Icaro (2017).

4.1.1 Análise do modelo proposto

A partir dessa modelagem foram obtidos os resultados de variação de aceleração que podem ser observados na Figura 23.

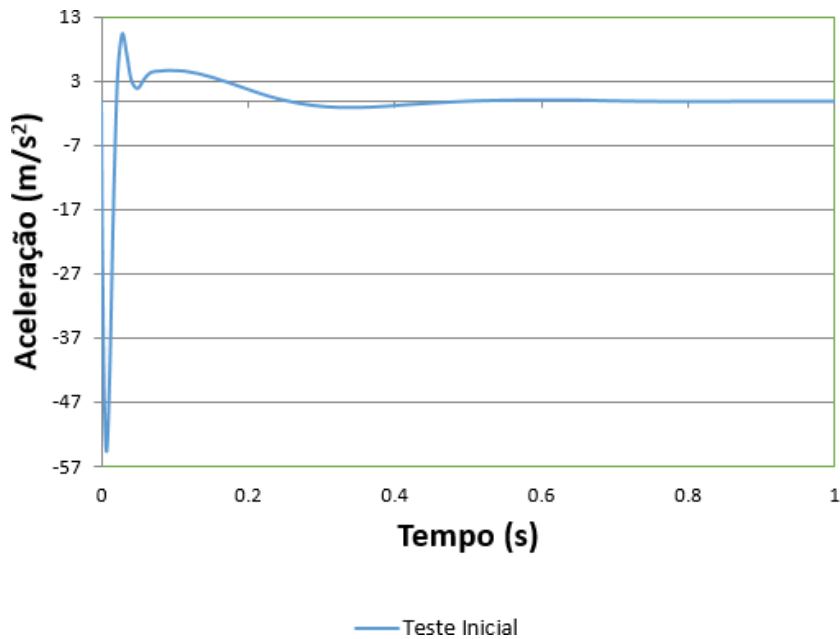


Figura 23 - Resposta da suspensão modelada no software Simulink.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

A partir da análise da Figura 23 é possível observar o efeito do degrau entre 0 e 1s, a uma excitação de -0.04m criando uma aceleração inicial de aproximadamente $-55\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ e posteriormente de $10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ até se estabilizar em 0.4s

Ao calcular os valores de *RMS* e compará-los com a norma ISO 5349-1 (2001), é possível encontrar os valores que estão presentes no gráfico da Figura 24.

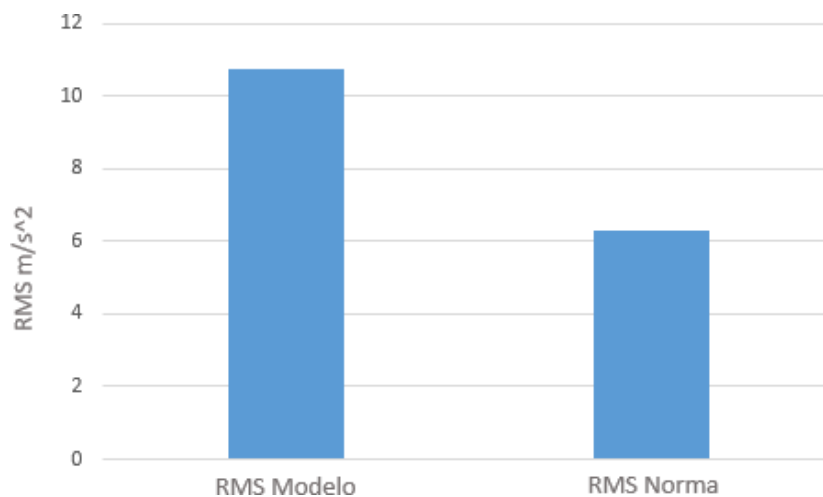


Figura 24 - Comparação dos valores de *RMS* do modelo com a norma
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Como é possível observar no Gráfico acima, os valores de *RMS* do modelo apresenta uma *RMS* de quase 2x maior quando comparado à norma, representando inconsistência nos valores propostos.

4.2 Modelagem computacional do modelo proposto com variação nos parâmetros

A fim de encontrar valores referentes a norma, e encontrar uma rigidez do pneu apropriada para o patinete elétrico, foi realizado testes variando a rigidez e assim, encontrar um *RMS* inferior a 6.3 m/s^2 . Assim, foi possível encontrar os valores encontrados na Tabela 4 referente a rigidez do pneu adequada ao patinete elétrico.

Tabela 4 – Cálculo da *RMS* alterando a rigidez do pneu

Massa [Kg]	71.7
Coefficiente de amortecimento [N.s/m]	1036,6
Rigidez da mola do amortecedor [N/m]	15291,2
Rigidez do pneu [N/m]	76456
Massa da roda [Kg]	6
Degrau de excitação	-0.04

Fonte: Pesquisa direta (2021)

4.2.1 Análise do modelo proposto com alteração nos parâmetros

Para a análise do modelo proposto com alteração no parâmetro da rigidez do pneu pode se observar na Figura 25, o valor de *RMS* norma, representando valores dentro dos parâmetros e a melhoria do conforto do piloto no novo modelo proposto.

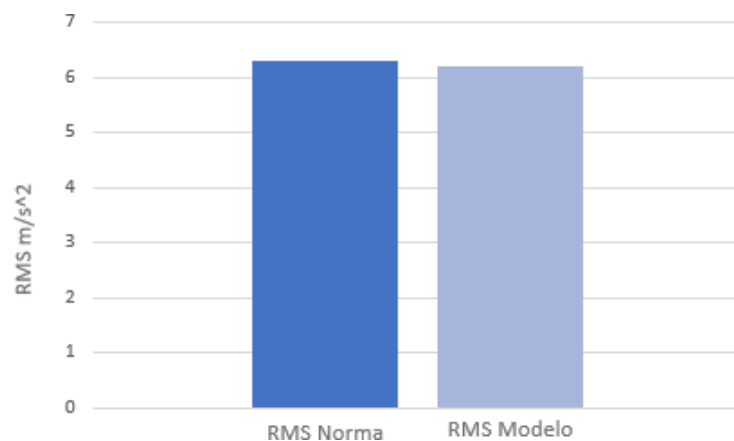


Figura 25 - Comparação dos valores de *RMS* do novo modelo com a norma
Fonte: Pesquisa direta (2021)

A partir dos parâmetros encontrados é possível fazer a análise da aceleração vs tempo do modelo da suspensão, como pode ser observado na Figura 25.

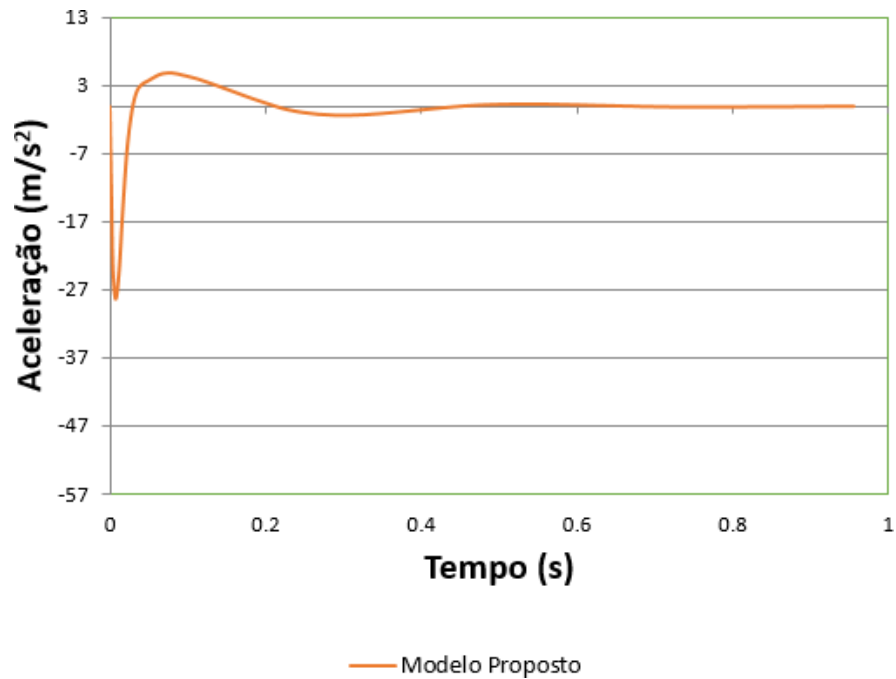


Figura 26 - Resposta da nova suspensão modelada no software Simulink.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

A partir da análise da Figura 26 é possível observar que a suspensão atinge seu valor de aceleração máximo no início do movimento de degrau no segundo 0,01s e se estabiliza no tempo de 0,5s com o *RMS* igual a $6,2 \text{ m/s}^2$.

4.3 Comparação de resultados dos modelos

A fim de validar a melhoria de conforto e os resultados obtidos nos modelos a aceleração causada pelo degrau foi comparada. Ao perceber uma diferença significativa de valores gráficos dos parâmetros pode-se comparar os valores numéricos *RMS* conforme a bibliografia e as normas ISO indicam.

4.3.1 Aceleração

A Figura 27 representa a comparação dos modelos. Sendo o gráfico em laranja o adequado à norma.

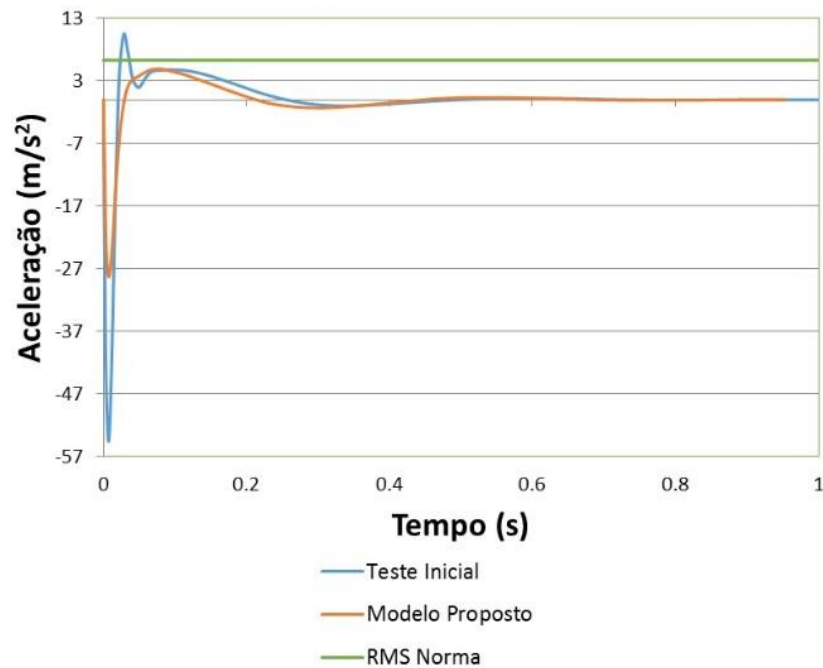


Figura 27 - Comparação da aceleração dos modelos
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Como pode se observar na Figura 27, há uma diminuição significativa nos valores de aceleração no modelo, e se dá de maneira mais suave, representando uma melhoria significativa no conforto do piloto.

4.4 Valores eficazes

Para validar a melhoria de conforto do modelo proposto observada nas comparações dos valores de aceleração, conforme a norma ISO 5349-1, deve-se usar valores eficazes de aceleração, ou *RMS*.

A partir dos valores de aceleração por tempo obtidos nas simulações, os valores eficazes foram calculados e são mostrados na Figura 28.

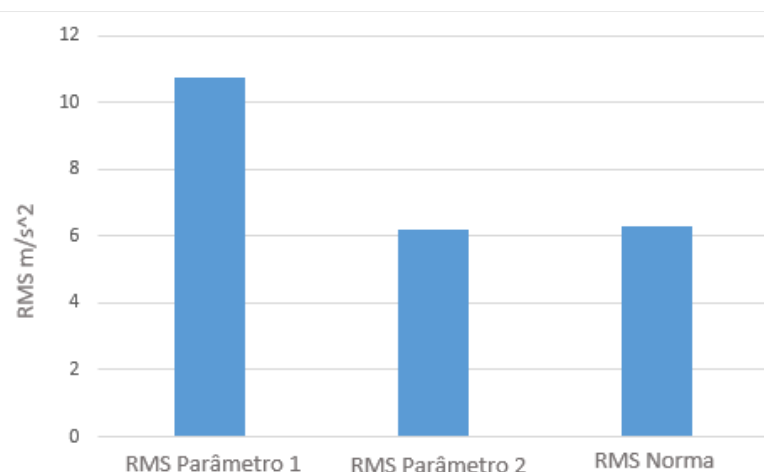


Figura 28- Comparação nos valores de RMS
Fonte: Pesquisa direta

Através da análise do gráfico é possível observar uma considerável diferença nos valores eficazes de aceleração, como mostrado na Figura 28, confirmando a melhoria do conforto através do parâmetro proposto. Sendo que o modelo com dados do segundo parâmetro apresenta o valor limite especificado pela norma ISO 5349-1 de $6,3 \text{ m/s}^2$.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

5.1 Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao presente trabalho e as recomendações apropriadas, considerando os resultados e discussões acerca do dimensionamento dianteiro da suspensão de um patinete elétrico e como pode contribuir para o dimensionamento de toda sua estrutura.

Os resultados obtidos com o *software* Simulink e tabulados no *software* Excel foram usados como base de comparação entre os modelos propostos. Além disso, um fator importante de comparação foi usado, a norma ISO 53494-1 (2001), no qual trata que existe uma faixa de aceleração *rms* aceitável, representando o limite de exposição do piloto do patinete elétrico.

A partir da análise dos resultados foi possível concluir que o modelo proposto para a melhoria do conforto da suspensão dianteira do patinete elétrico representou uma melhoria de $10,73 \text{ m/s}^2$ para $6,2 \text{ m/s}^2$, se adequando à norma.

Por fim, conclui-se que, embora a indústria automobilística esteja avançada no conforto dos veículos, ainda pode-se desenvolver novas pesquisas focadas em patinetes elétricos, que além de estarem em crescimento no mundo inteiro, são veículos que no momento atual podem causar risco ao piloto.

5.2 Recomendações

Diante do estudo realizado, sugere-se como trabalhos futuros:

- Coleta de dados obtidos em ensaios e testes no modelo real de da suspensão de um patinete elétrico para a afirmação do modelo proposto.
- Construção de um protótipo dos parâmetros propostos para análise experimental e validação dos resultados obtidos.
- Realizar o estudo no domínio da frequência para o modelo experimental.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Apicella, M. Ride Model Analysis – The Development of Motorcycle Suspension Damping to Optimise Vehicle Grip Through Vehicle Dynamics Fundamental Model Formulations.

BBC NEWS. Patinetes elétricos: revolução no transporte ou novo pesadelo urbano? . Disponível em <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46551499>. Acesso em Novembro de 2021

CADROLINO. Design of a Front Suspension for an Electric Scooter. Disponível em <https://cadrolino.com/design-of-a-front-suspension-for-an-electric-scooter/>. Acesso em Dezembro de 2021

DEMO, Pedro. Metodologia científica em ciências sociais. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1995.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008

HAMM, EDUARDO ANDREAS. Proposta para Patinetes Elétricos na Micro mobilidade Brasileira. Curitiba. 2020

JC MAXI. EVOLUÇÃO DA SUSPENSÃO NAS MOTOS. 2019. Disponível em <https://www.jcmaxi.com.br/post/evolu%C3%A7%C3%A3o-da-suspens%C3%A3o-nas-motos>. Acesso em Novembro de 2021.

PEREIRA, J.G.S. Relações com o skatismo em Florianópolis: um estudo sobre a formação do campo e do habitus.

POLIT, D.F. *et al.* Fundamentos de Pesquisa em Enfermagem: Métodos, avaliação e utilização. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

PROMOB-e. Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente. Impacto de sistemas de compartilhamento de bicicletas e patinetes elétricos: Caracterização do desafio.

RIBEIRO, C.H.C. MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL: CONCEITOS, TENDÊNCIAS E REFLEXÕES. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA 2016

SOUSA. Otimização dos parâmetros da suspensão para um modelo de um quarto de veículo. Universidade de Brasília (UnB/FGA).

OLIVEIRA, M. F. Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração. 2011. 72f. Manual (Pós-Graduação) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2011.

GILLESPIE, T.D., (Thomas D.); Fundamentals of Vehicle dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc., 1992, 1st edition.

RAO, Singiresu S., *Vibrações Mecânicas*, 4a Ed., Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.

TANELLI, M. *Modeling, simulation and control of two-wheeled vehicles*. 1. ed. Itália: Editora Wiley. 2014.

Xiaomi Inc., *Manual do proprietário Mi Eletric Scooter Pro Xiaomi®*.

