



**MODELAGEM DINÂMICA DO COMPORTAMENTO
DE AMORTECEDORES MAGNETOREOLÓGICO PARA
APLICAÇÃO EM SUSPENSÃO VEICULAR SEMI-ATIVA**

LEONARDO DA COSTA RODRIGUES FERREIRA

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELAGEM DINÂMICA DO COMPORTAMENTO
DE AMORTECEDORES MAGNETOREOLOGICO PARA
APLICAÇÃO EM SUSPENSÃO VEICULAR SEMI-ATIVA**

LEONARDO DA COSTA RODRIGUES FERREIRA

Orientador: PROF. DR. MARCUS VINÍCIUS GIRÃO DE MORAIS

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PUBLICAÇÃO ENM.PG - XXX/2022
BRASÍLIA-DF, 10 DE MAIO DE 2022.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELAGEM DINÂMICA DO COMPORTAMENTO
DE AMORTECEDORES MAGNETOREOLOGICO PARA
APLICAÇÃO EM SUSPENSÃO VEICULAR SEMI-ATIVA**

LEONARDO DA COSTA RODRIGUES FERREIRA

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Marcus Vinícius Girão de Moraes
Orientador

Prof. Dr. Suzana Moreira Avila
Coorientador

Prof. Dr. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz
Examinador interno

Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira
Examinador externo

BRASÍLIA, 10 DE MAIO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

LEONARDO DA COSTA RODRIGUES FERREIRA

TÍTULO COMPLETO DO PG

2022xv, 147p., 201x297 mm

(ENM/FT/UnB, Engenheiro Mecânico, Engenharia Mecânica, 2022)

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEONARDO DA COSTA RODRIGUES FERREIRA (2022) TÍTULO COMPLETO DO PG. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação xxx/2022, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Leonardo da Costa Rodrigues Ferreira

TÍTULO: TÍTULO COMPLETO DO PG.

GRAU: Engenheiro Mecânico ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Leonardo da Costa Rodrigues Ferreira
rodrigues.ferreira@aluno.unb.br

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por me sustentarem durante a execução do curso.

Agradeço ao professor Marcus Vinícius Girão de Moraes e a professora Suzana Moreira Avila por me guiarem na execução do projeto.

Agradeço aos meus colegas de curso que me emprestaram sua experiência e auxiliaram no projeto.

Agradeço aos professores dos diversos departamentos que me ensinaram ao longo do curso.

Resumo

O programa Rota 2030 visa incentivar a inovação brasileira por meio do financiamento da pesquisa em temas de relevância no setor. Reconhecendo a importância do aperfeiçoamento do sistema de suspensão para os aspectos de conforto e segurança de um veículo, a busca por novos métodos e tecnologias na área de suspensões veiculares se apresenta como uma escolha viável de pesquisa. Nesse contexto entram os amortecedores semi-ativos. Aliados a uma estratégia de controle adequada, eles podem modificar as características de amortecimento em tempo real para fornecer uma viagem com segurança e conforto superiores as possíveis com suas contra-partes passivas.

Com base nas razões explicadas, esse trabalho se buscou entender melhor a escolha de parâmetros de rigidez de mola e coeficientes de amortecimento, como são impostos seus limites baseado nas estratégias de controle utilizadas. Para esse fim criou-se um mapa de resposta para as propriedades usuais de um carro de passeio e um amortecedor semi-ativo baseado na família de amortecedores magneto-reológicos, o tipo de amortecimento semi-ativo identificado como a escolha mais razoável para esse propósito. Por conta dessa escolha, também foi investigado o desempenho obtido pela aplicação dessas estratégias de controle num sistema com um modelo de um amortecedor magneto-reológico realista.

A primeira etapa foi identificar métricas adequadas para medir as qualidades de conforto e segurança, tendo sido selecionadas "*Ride RMS*" e "*Road Holding*" respectivamente, dois valores comumente utilizados na literatura para esses fins.

A segunda etapa foi identificar as equações que regem o modelo de 1/4 de veículo, o modelo mais simples capazes de avaliar as métricas escolhidas, e utilizar a já existente solução analítica no caso do amortecimento passivo para criar um mapa de resposta. Elaborou-se também a solução numérica das equações e usou-se a solução analítica para validar os resultados. Também nessa etapa se elaborou o modelo de 1/2 de veículo, para uso em etapas posteriores.

Na terceira etapa identificou-se quais esquemas de controle para suspensão semi-ativa eram de grande relevância, tendo sido escolhidos os esquemas de controle *Skyhook* e *Groundhook*. Alterou-se a solução numérica passiva para incluir o comportamento de uma suspensão semi-ativa que obedece a esses esquemas de controle. Validou-se a solução com base em resultados existentes na literatura, e elaborou-se o mapa de resposta para cada esquema de controle empregado no trabalho.

O quarto passo foi comparar os resultados do semi-ativo com o passivo. O quinto passo foi modelar as dinâmicas do amortecedor magneto-reológico e validar os resultados com a literatura. O sexto passo foi observar as diferenças entre os modelos que utilizam um amortecimento tradicional e um magneto-reológico. O último passo foi estender a análise do amortecedor magneto-reológico para um modelo de 1/2 veículo.

Concluiu-se que as regiões de mínimo estão em lugares diferentes no mapa de resposta e que há um ganho generalizado no uso de suspensões semi-ativas com esquemas de controle *Skyhook* e *Groundhook*. Também concluiu-se que os amortecedores magneto-reológicos são mais difíceis de controlar, e isso levou a uma degradação de performance comparado ao amortecimento passivo comparado. Os esquemas de *Groundhook* e *Skyhook* não foram capazes de reduzir as vibrações tão bem quanto esperado no modelo de 1/2 veículo testado. Porém, essas características foram avaliadas em apenas uma configuração de veículo, com a possibilidade de um ganho de desempenho pelo uso desses sistemas existindo caso se troque a configuração.

Palavras-chaves: Suspensão semi-ativa. 1/4 de veículo. Skyhook. Groundhook. Mapa de resposta.

Abstract

The Rota 2030 program seeks to encourage Brazilian-led innovation by funding research on topics of commercial relevance to the sector. Taking into account the importance of the suspension system for the comfort and safety aspects of a vehicle, the search for new methods and technologies that can be employed in vehicle suspensions systems presents itself as a viable research choice. It is in this context that semi-active dampers come into play. Coupled with a proper control strategy, they can modify damping characteristics in real time to provide a ride with greater safety and comfort than possible with their passive counterparts.

Given the stated reasons, this work sought to better understand how the choice of spring stiffness parameters, damping coefficients and imposed limits affects the performance of a vehicle based on the control strategies used. For the first purpose a response surface was created using the usual properties of a passenger car and a semi-active damper based on the family of magneto-rheological dampers, identified as a reasonable choice for this purpose. Due to this choice, the performance of the control schemes used was also studied on a system with a realistic magneto-rheological damper model.

The first step consisted in identifying adequate metrics to measure the qualities of comfort and safety, with "Ride RMS" and "Road Holding" having been respectively selected, two values commonly used in the literature for these purposes.

The second step was identifying the equations that govern the 1/4 vehicle model, the simplest model capable of evaluating the chosen metrics, and use the existing analytical solution for the case of passive damping to create a response surface. The numerical solution of the equations was also elaborated, and the analytical solution was used to validate the results. At the same step, a 1/2 vehicle model was prepared for later stages.

The third step was to identify which control schemes for semi-active suspension were of great relevance, with the *Skyhook* and *Groundhook* control schemes having been chosen. The passive numerical solution was modified to include the behavior of a semi-active suspension obeying these control schemes. The solution was validated based on existing results in the literature, and a response surface was prepared for each control scheme used in the work for both metrics chosen.

The fourth step was to compare the semi-active and passive results. The fifth step was to

model the MR damper dynamics and validate it with the literature. The sixth step was to see the difference between a model using a passive damper and an MR one with different control strategies. The last step was to extend the MR damper analysis to a 1/2 vehicle model.

It was concluded that the regions of minima occur in different places of the response surface for the parameters studied and that there is a general gain of performance in the use of semi-active suspensions with the Skyhook and Groundhook control schemes. It was also concluded that the magneto-reological dampers are harder to control, and lead to a performance degradation when compared to the chosen passive damper. The Skyhook and Groundhook schemes weren't able to reduce vibrations as well as expected on the tested 1/2 vehicle model. However, these characteristics were evaluated on a single vehicle configuration, with the possibility of improvements on different configurations existing.

Keywords: Semi-active suspension. 1/4 vehicle. Skyhook. Groundhook. Response surface.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO GERAL	1
1.2	HIPÓTESES	2
1.3	OBJETIVO	3
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	SUSPENSÃO PASSIVA	4
2.2	SUSPENSÃO SEMI-ATIVA	6
2.2.1	AMORTECEDOR MAGNETO-REOLÓGICO	6
2.2.2	ESQUEMAS DE CONTROLE	7
2.3	MODELAGEM DO VEICULO	8
2.4	PERFIL DE ESTRADA	11
2.5	ESTADO DA ARTE	13
3	METODOLOGIA E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	17
3.1	SISTEMA DE EQUAÇÕES E SOLUÇÃO ANALÍTICA	17
3.1.1	1/4 DE VEÍCULO	17
3.1.2	1/2 DE VEÍCULO	18
3.2	SOLUÇÃO NUMÉRICA	19
3.3	MODELOS DE CONTROLE <i>Skyhook</i> E <i>Groundhook</i>	21
3.4	MÉTRICAS	24
3.5	MODELO DE AMORTECIMENTO MAGNETO-REOLÓGICO	24
3.6	TRATAMENTO NUMÉRICO	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	1/4 DE VEÍCULO	29
4.1.1	SISTEMA PASSIVO	29
4.1.2	SISTEMA SEMI-ATIVO	32
4.1.3	VALIDAÇÃO DO MODELO DO AMORTECIMENTO MAGNETO-REOLÓGICO	36
4.1.4	EFEITOS DO SISTEMA MAGNETO-REOLÓGICO	37
4.2	1/2 DE VEÍCULO	46

5	CONCLUSÃO	72
5.1	CONCLUSÕES.....	72
5.2	TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
5.3	CODIGOS DE VALIDAÇÃO	77
5.4	SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	84
5.4.1	MAPA DE RESPOSTA	85
5.4.2	SOMATÓRIO DE FORÇAS UTILIZADO PARA SISTEMA COM INTEGRAÇÃO DE EULER	87
5.4.3	ENTRADA DA FUNÇÃO PARA OS SISTEMAS MR COM 2 GRAUS DE LIBERDADE E FUNÇÃO PRINCIPAL	88
5.4.4	ENTRADA DA FUNÇÃO PARA OS SISTEMAS MR COM 4 GRAUS DE LIBERDADE.....	99
5.4.5	SOMATÓRIO DE FORÇAS COM 2 GRAUS DE LIBERDADE, AMORTECIMENTO MR E INTEGRAÇÃO CRANK-NICHOLSON COM FUNÇÕES FILHAS	113
5.4.6	SOMATÓRIO DE FORÇAS COM 4 GRAUS DE LIBERDADE, AMORTECIMENTO MR E INTEGRAÇÃO CRANK-NICHOLSON COM FUNÇÕES FILHAS	114
5.4.7	CONTROLE DA SUSPENSÃO E SISTEMAS MR.....	118

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução das empresas produtoras de veículos que tomam parte na fabricação de suspensões controláveis. Adaptado de [Soliman and Kaldas 2021].	2
2.1	Exemplo do comportamento não linear de uma suspensão. Adaptado de [Gillespie 1992].....	5
2.2	Suspensão magneto-reológica com seu principio de funcionamento esquematizado. Adaptado de [Soliman and Kaldas 2021].	7
2.3	Idealização dos sistemas <i>Groundhook</i> e <i>Skyhook</i> . Adaptado de [Soliman and Kaldas 2021].	8
2.4	Modelo esquemático de 1/4 de veículo com suspensão semi-ativa. Reproduzido de [Melo 2017].	9
2.5	Oscilação para 1/2 de veículo no caso dos pares laterais. Adaptado de [Gillespie 1992].....	10
2.6	Classes de estrada ISO. Reproduzido de [ISO 8608:2016 2016], figura C.2.....	12
3.1	Modelo de amortecimento utilizado junto com as funções dos coeficientes expostas de forma gráfica.....	25
3.2	Equacionamento para as forças do modelo magneto-reológico. Reproduzido de [Wang et al. 2004].....	26
3.3	Equacionamento para os termos utilizados no modelo magneto-reológico da figura (3.2). Adaptado de [Wang et al. 2004].....	26
3.4	Exemplo de vazamento de potência devido a uma transformada de Fourier discreta num sinal de tempo finito. Adaptado de [Proakis and Manolakis 1996].	27
4.1	Solução analítica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, <i>Ride RMS</i> ..	30
4.2	Solução numérica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, <i>Ride RMS</i> .	30
4.3	Solução analítica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, <i>Road Holding</i>	31
4.4	Solução numérica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, <i>Road Holding</i>	31
4.5	Resultados para a entrada de senoide de 0,5 Hz utilizando os mesmos parâmetros que [Melo 2017].....	32
4.6	Resultados para a função degrau utilizando os mesmos parâmetros que [Melo 2017].....	33

4.7	Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle <i>Skyhook</i> , vista de topo, <i>Ride RMS</i>	34
4.8	Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle <i>Skyhook</i> , vista de topo, <i>Road Holding</i>	34
4.9	Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle <i>Groundhook</i> , vista de topo, <i>Ride RMS</i>	35
4.10	Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle <i>Groundhook</i> , vista de topo, <i>Road Holding</i>	35
4.11	Resultados do amortecimento utilizando os dados de [Wang et al. 2004].	37
4.12	Resultados do amortecimento utilizando os dados de [Wang et al. 2004], com alterações em k_{1e} e k_{1c}	37
4.13	Resultados da entrada senoidal.	39
4.14	Resultados da entrada senoidal, zoom nos primeiros segundos.	40
4.15	Resultados da entrada senoidal no domínio da frequência.	41
4.16	Resultados da entrada step.	42
4.17	Resultados da entrada step.	43
4.18	Resultados da entrada step.	44
4.19	Resultados da entrada de ruído branco.	45
4.20	Resultados da entrada de ruído branco.	46
4.21	Resultados da entrada senoidal para a salto.	48
4.22	Resultados da entrada senoidal para a salto, zoom nos primeiros segundos. ...	49
4.23	Resultados da entrada senoidal para a salto no domínio da frequência.	50
4.24	Figura da resposta em frequência do sistema tradicional com controle <i>Skyhook</i> , ampliação no eixo y	51
4.25	Figura da resposta em frequência do sistema MR com controle <i>Skyhook</i> , ampliação no eixo y	52
4.26	Resultados da entrada senoidal para a arfagem.	53
4.27	Resultados da entrada senoidal para a arfagem, zoom nos primeiros segundos.	54
4.28	Resultados da entrada senoidal para a arfagem no domínio da frequência.	55
4.29	Resultados da entrada step para a arfagem.	57
4.30	Resultados da entrada step para a salto, com ampliação nos primeiros 5 s.	58
4.31	Resultados no domínio da frequência da entrada step para a salto.	59
4.32	Resultados da entrada de degrau para a arfagem.	60
4.33	Resultados da entrada de degrau para a arfagem, zoom nos primeiros 5 segundos.	61
4.34	Resultados da entrada de degrau para a arfagem no domínio da frequência. ...	62
4.35	Resultados da entrada de ruído branco para a salto.	64
4.36	Resultados no domínio da frequência entrada de ruído branco para a salto.	65
4.37	Ampliação do resultado da frequência para o caso do salto. Amortecimento tradicional sem esquema de controle semi-ativo.	66

4.38	Resultados da entrada de ruído branco para a arfagem.	67
4.39	Resultados da entrada de ruído branco para a arfagem no domínio da frequência.	68
4.40	Ampliação do resultado da frequência para o caso da arfagem. Amorteci- mento tradicional sem esquema de controle semi-ativo.	69
4.41	Sobreposição dos resultados da frequência para os casos do salto e da arfa- gem. Amortecimento tradicional sem esquema de controle semi-ativo.	70

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela contendo análise do desempenho de diversos tipos de amortecimento com base na categoria de performance analisada. Adaptado de [Gillespie 1992].	4
2.2	Tabela com referências bibliográficas e ponderação das vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas nos artigos.	14
2.3	Segunda tabela com referências bibliográficas e ponderação das vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas nos artigos.	15
2.4	Terceira tabela com referências bibliográficas e ponderação das vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas nos artigos.	16
3.1	Dados das constantes do amortecedor magneto-reológico assimétrico de [Wang et al. 2004].	25
4.1	Tabela de valores utilizados na simulação.	28
4.2	Desvios padrões máximos como percentuais da média para um intervalo de confiança de 95% na simulação numérica passiva.	29
4.3	Comparação das métricas obtidas para as amplitudes máximas da massa superior no trabalho original de [Melo 2017] e a replica feita nesse trabalho.	32
4.4	Desvios padrões para intervalo de 95% de confiança como porcentagem do valor médio para os controles semi-ativos em função do tempo de simulação.	33
4.5	Ponto de mínimo para cada caso, como porcentagem do mesmo valor no sistema passivo.	33
4.6	Posição do mínimo da tabela 4.6 em cada caso.	34
4.7	Dados das constantes do amortecedor magneto-reológico assimétrico de [Wang et al. 2004].	36
4.8	Tabela de valores utilizados na simulação.	38
4.9	Tabela de valores utilizados na simulação.	47

LISTA DE CÓDIGOS FONTE

codigos/main.m.....	77
codigos/skyhook_dominio_tempo.m.....	84
codigos/runge_kutta_2gdl_carro_fitness.m.....	85
codigos/somatorioForcas.m	87
codigos/gera_dados_MR.m.....	88
codigos/implicito_2gdl_carro_fitness.m	94
codigos/gera_dados_MR_4gdl.m	99
codigos/implicito_4gdl_carro_fitness.m	107
codigos/funcao_forcas.m.....	113
codigos/funcao_forcas_aux.m	113
codigos/funcao_forcas_aux2.m.....	114
codigos/funcao_forcas_4gdl.m	114
codigos/funcao_forcas_aux_4gdl.m.....	115
codigos/funcao_forcas_aux2_4gdl.m	118
codigos/controleC.m	118
codigos/validacao_wang.m	121
codigos/wang.m	123
codigos/wang2.m	124

Lista de símbolos

Símbolos Gregos

ω	Frequência
χ	Razão entre as massas
σ	Matriz de coeficientes da variável estocástica.
α	Coefficiente de peso para o termo do <i>Groundhook</i> .
β	Coefficiente de peso para o termo do <i>Skyhook</i> .

Símbolos Latinos

K	Rigidez de mola
C	Coefficiente de amortecimento
M	Massa
k	Rigidez de mola dividida pela massa superior
c	Coefficiente de amortecimento dividido pela massa superior
x	Posição em função do tempo
\dot{x}	Derivada da posição em função do tempo
\ddot{x}	Segunda derivada da posição em função do tempo
z	Valor da posição vertical da estrada em função do tempo
X	Transformada do domínio de Laplace para x
Z	Transformada do domínio de Laplace para z
R	Determinante da transformada do sistema
j	Unidade imaginária.

H	Função de ganho
t	Tempo
W	Processo de ruído branco
F	Matriz de coeficientes da variável não estocástica
rh	<i>Road Holding</i>
RMS	<i>Ride RMS</i>
P	Potência em Watts.
CG	Centro de gravidade
J	Momento de inércia
MR	Magneto-reológico
N.D.	Não disponível

Subscritos

s	Corpo superior
i	Corpo inferior
f	Pneu frontal
t	Pneu traseiro
t	Tempo
sky	Skyhook
ground	Groundhook
max	Máximo
min	Mínimo

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto geral

A indústria automotiva tem como um de seus motores a melhoria da experiência do usuário, seja isso obtido na performance do veículo ou no bem estar e conforto do passageiro. Tendo em vista a importância da inovação constante para esse setor, constatou-se a vantagem de iniciativas estatais que capacitassem os profissionais brasileiros do setor a tomar parte desse processo.

Em 2013, criou-se com a Lei 12.715 o programa de incentivos Inovar Auto ([Brasil 2012]), com um de seus objetivos ser o incentivo da pesquisa e desenvolvimento na indústria automotiva do país. Sua duração prevista era até o começo de 2018, onde se planejava adotar um novo programa com base nas vantagens e desvantagens do modelo identificadas durante o período. Nesse contexto entra a lei 13.755 ([Brasil 2018]), também chamada de Rota 2030. Ela é a sucessora da Inovar-Auto, é almeja tornar concreta a ideia de introduzir o profissional brasileiro na cadeia inovativa do setor.

O programa Rota 2030 é um programa que busca, assim como seu antecedente, tornar disponível os recursos necessários para o desenvolvimento de tecnologias automotivas no país e capacitar mais profissionais para o setor nacional. Ele realiza isso através de incentivos fiscais. Muitos são os objetivos do programa, e além do desenvolvimento tecnológico e inovação busca-se estimular tecnologias que respeitem o meio ambiente, que tenham maior eficiência energética, que aumentem a segurança dos veículos e também a qualidade. Mas mais especificamente, do seu artigo 8, destaca-se os incisos II, III e VI:

- II - aumento dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação no País;
- III - estímulo à produção de novas tecnologias e inovações, de acordo com as tendências tecnológicas globais;
- VI - garantia da capacitação técnica e da qualificação profissional no setor de mobilidade e logística;

Esses incisos demonstram que ainda é reconhecida a necessidade de robustecer o processo de P&D observadas durante a criação do programa Inova Auto.

O programa Rota 2030 estipula que novas tecnologias não de ser produzidas com base nas tendências globais. No contexto específico das tecnologias que aumentam a qualidade e segurança dos automóveis, uma das tendências está no uso de suspensões semi-ativas. Elas vem ganhando cada vez mais atenção no mercado por conta de sua capacidade de melhorar diversas características de importância no veículo, como a segurança e o conforto, sem incorrer no oneroso sistema que uma suspensão ativa requer. Seu desempenho é inferior a suspensão ativa, mas a indústria considerou aceitável ter uma performance reduzida para reduzir a complexidade do projeto do veículo e seu preço, demonstrado pelo crescimento na fabricação de suspensões controladas na figura (1.1).

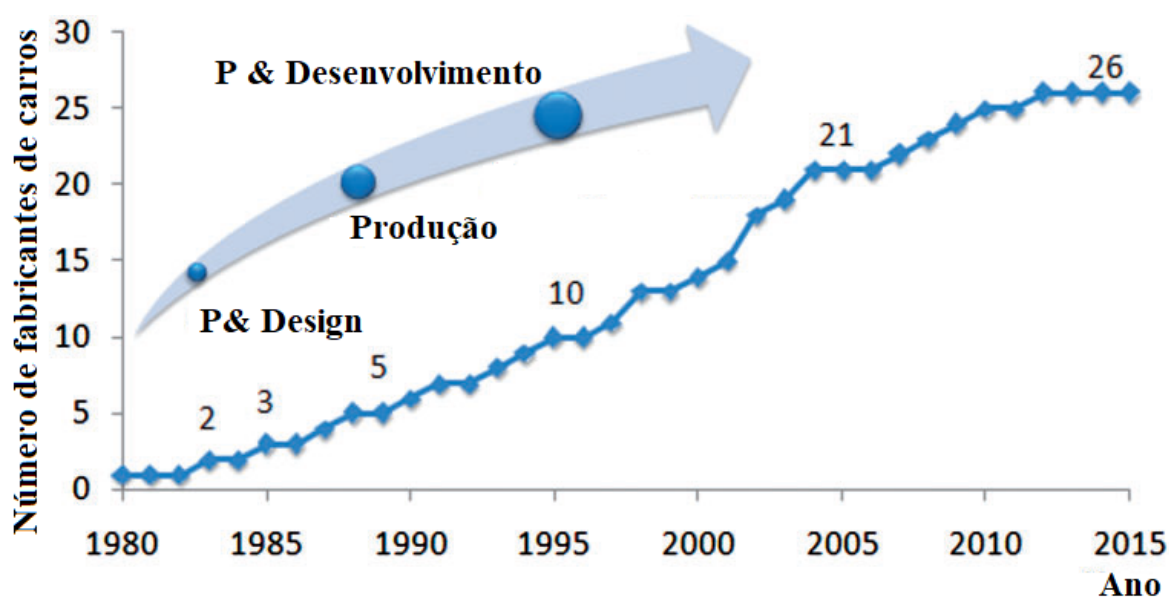


Figura 1.1: Evolução das empresas produtoras de veículos que tomam parte na fabricação de suspensões controláveis. Adaptado de [Soliman and Kaldas 2021].

O problema de qual é o esquema de controle ideal da suspensão semi-ativa ainda não está resolvido. Portanto, existe a perspectiva que ganhos reais podem ser obtidos refinando os esquemas de controle da suspensão semi-ativa e os sistemas físicos que a compõe.

1.2 Hipóteses

Para a resolução do problema, são adotadas algumas simplificações físicas. A principal é a do uso do modelo de 1/4 de veículo. Essa simplificação é justificada porque, na literatura, é explicado que o comportamento nas métricas de interesse pode ser avaliado com boa precisão utilizando esse modelo. A vantagem de utilizar essa simplificação é que sua simplicidade ajuda a evitar erros na elaboração da solução do modelo, além de facilitar a validação de resultados e interpretação de dados. Assim, ele serve como um excelente primeiro passo

que fornece uma base para a construção de modelos mais complexos ao mesmo tempo em que responde alguns dos problemas propostos. Posteriormente, será utilizado o modelo de 1/2 veículo. Esse modelo é mais complexo, porém tem seu processo de desenvolvimento simplificado ao utilizar o modelo de 1/4 de veículo como base. Seus resultados permitem responder a mais questionamentos da dinâmica veicular, com uma melhora na precisão dos resultados obtidos de fenômenos estudados no modelo de 1/4 de veículo.

Outra hipótese é que uma suspensão semi-ativa veicular é capaz de fornecer um desempenho superior ao passivo. Isso já foi demonstrado na literatura como em [Melo 2017], mas esse trabalho busca analisar os resultados para diversas configurações de forma averiguar que o desempenho relativo será consistentemente superior.

1.3 Objetivo

O objetivo desse trabalho é dividido nas análises para 1/4 e 1/2 de veículo. Para o modelo de 1/4 de veículo apenas, objetiva-se analisar a performance das suspensões semi-ativas utilizando os esquemas de controle *Groundhook* e *Skyhook* nos critérios *Ride RMS* e *Roadhold* com diversas combinações de amortecimento e rigidez de mola e comparar os resultados obtidos com a configuração passiva. Para ambos os sistemas, objetiva-se analisar os efeitos da introdução de um amortecimento MR na suspensão para os casos onde se utilizam os esquemas de controle *Groundhook* e *Skyhook* e onde não se utiliza esquema de controle algum.

Os objetivos parciais que serão realizados para atingir esses objetivos são modelar numericamente um sistema de 1/4 e 1/2 de veículo com suspensão passiva, validar os resultados com os resultados analíticos do problema, incrementar o modelo para incluir uma suspensão semi-ativa com os esquemas de controle desejados, validar o controle *Skyhook* com base no trabalho de [Melo 2017] e modelar o amortecedor magneto-reológico com base no trabalho de [Wang et al. 2004].

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho é organizado como se segue. No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica do assunto, com explicação dos conceitos básicos do problema e uma breve revisão bibliográfica. No capítulo 3 é explicada a metodologia utilizada para analisar as questões propostas e demonstrada a modelagem matemática dos sistemas relevantes. No capítulo 4 são apresentados os resultados da resolução dos sistemas de interesse por meio das metodologias e métodos numéricos postulados. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas com base nos resultados e possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Suspensão passiva

A suspensão passiva é a configuração mais utilizada atualmente de acordo com [Manolache-Rusu et al. 2020], e tem como característica a ausência de elementos de controle ativos em sua construção. Ela tem seu amortecedor representado matematicamente por um termo dissipativo proporcional a uma constante, denominada coeficiente de amortecimento, vezes a velocidade relativa entre os componentes aos quais ela é ligada.

A otimização da suspensão passiva, de acordo com [Gillespie 1992], é feita com base no compromisso entre diversas modalidades de performance, como demonstrado na tabela (2.1).

Tipo de suspensão	Modalidade de performance					
	Ride	Height	Roll	Dive	Squat	Road-holding
Passiva	A performance é um comprometimento entre todos os modos					
Autonivelante	Alta	Alta	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Semi-ativa	Média	N.D.	Baixa	Baixa	Baixa	Média
Ativa	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

Tabela 2.1: Tabela contendo análise do desempenho de diversos tipos de amortecimento com base na categoria de performance analisada. Adaptado de [Gillespie 1992].

O significado de ser um "compromisso" é que uma suspensão passiva precisa abandonar performance em uma categoria para melhorar a outra, existindo portanto suspensões que buscam ter uma performance aceitável em todos os aspectos e suspensões especializadas, que buscam serem excepcionais em uma modalidade em detrimento de outras.

Algumas características da suspensão passiva podem ou não serem levadas em conta. Uma dessas características é a da suposição do comportamento linear dos componentes da suspensão. [Gillespie 1992] menciona que existem não linearidades na suspensão devido a fricção, como mostrado na figura 2.1. Outras peças também apresentam não linearidades. Em [Norton 2004] é demonstrado o caso da mola, que se comprimida a ponto de suas espiras

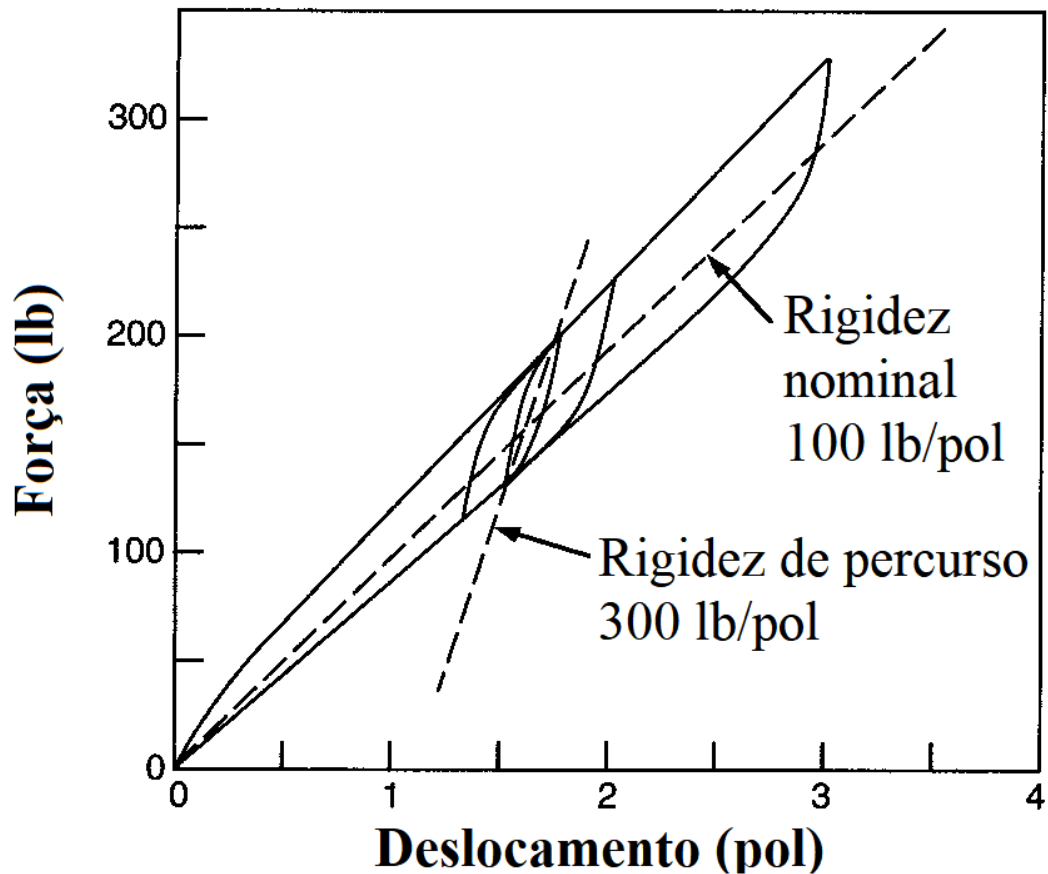


Figura 2.1: Exemplo do comportamento não linear de uma suspensão. Adaptado de [Gillespie 1992]

tocarem passa a se deformar diferente, ou se estendida demais não conseguem retornar a sua forma original. Porém, esses casos são muito extremos, com a maioria dos veículos tendo seus componentes dimensionados de tal forma que essas situações nunca ocorram em condições razoáveis.

Outra característica que pode ou não ser considerada é a das propriedades menores dos componentes. Um elemento de mola também apresenta um pequeno comportamento de dissipação de energia, e um amortecedor possui um pequeno comportamento elástico. Porém, esses comportamentos são normalmente descritos por constantes que afetam muito pouco o comportamento do sistema em comparação com os componentes instalados especificamente para isso. Portanto, eles são normalmente desconsiderados. O coeficiente de amortecimento do pneu é um exemplo que se faz presente em alguns trabalhos da literatura, como em [Wang et al. 2004] e [Wei and Taghavifar 2017], mas não em outros, como em [Shirahatti et al. 2008].

2.2 Suspensão semi-ativa

De acordo com [Soliman and Kaldas 2021], as suspensões semi-ativas surgiram como a resposta para a busca por uma suspensão que superasse as opções passivas mantendo eficiência energética. Elas tem como característica a capacidade de variar seus coeficientes de amortecimento no tempo.

Observando a tabela da figura (2.1), vemos que a suspensão semi-ativa é dita como possuindo uma performance mediana nos critérios *Ride* e *Road-Holding* e uma performance baixa nos outros critérios. É importante notar que esse livro é de 1992, e que a tecnologia passou por um processo de amadurecimento nesse período. Em [Soliman and Kaldas 2021], é mostrado que em 1990, apenas 5 empresas no ramo de automóveis trabalhavam com suspensões controladas, enquanto em 2015 o número já era 26. O artigo também caracteriza a tecnologia como numa fase menos madura durante o período.

Ainda no artigo, são dispostos 3 tipos de amortecedores semi-ativos: amortecedores de válvula com servo ou solenoide, eletro-reológicos ou magneto-reológicos e eletromagnéticos. Apesar das três cumprirem as funções relevantes de maneira razoavelmente igual, o foco será feito na suspensão magneto-reológica.

2.2.1 Amortecedor magneto-reológico

O amortecedor magneto-reológico é um tipo de amortecedor semi-ativo que controla o seu coeficiente de amortecimento com base na corrente aplicada em sua bobina. O fluido no amortecimento possui partículas magnéticas que reagem ao campo induzido pela corrente, aumentando ou diminuindo a viscosidade do fluido. Isso está representado esquematicamente na figura (2.2).

O modelamento de uma suspensão magneto-reológica é complexo devido a suas características de não linearidade com a corrente, apresentando fenômenos de histerese.

Existem múltiplos modelagens do comportamento observado nas suspensões. O modelo de Bouc-wen é a base para diversos modelos histeréticos. [Wang et al. 2004] propõe um modelo com 16 parâmetros com base em dados coletados experimentalmente, e [Santade 2017] também calcula os parâmetros para esse modelo usando dados experimentais de diversos amortecedores magneto-reológicos. Esses parâmetros são necessários para modelar o comportamento da equação considerando que há as seguintes possibilidades:

- Assimetria em relação a origem tanto em relação a zero velocidade quanto a zero força
- Mudança na inclinação da curva força-velocidade acima de certas velocidades
- Fenômeno de histerese onde o sinal da aceleração modifica a força

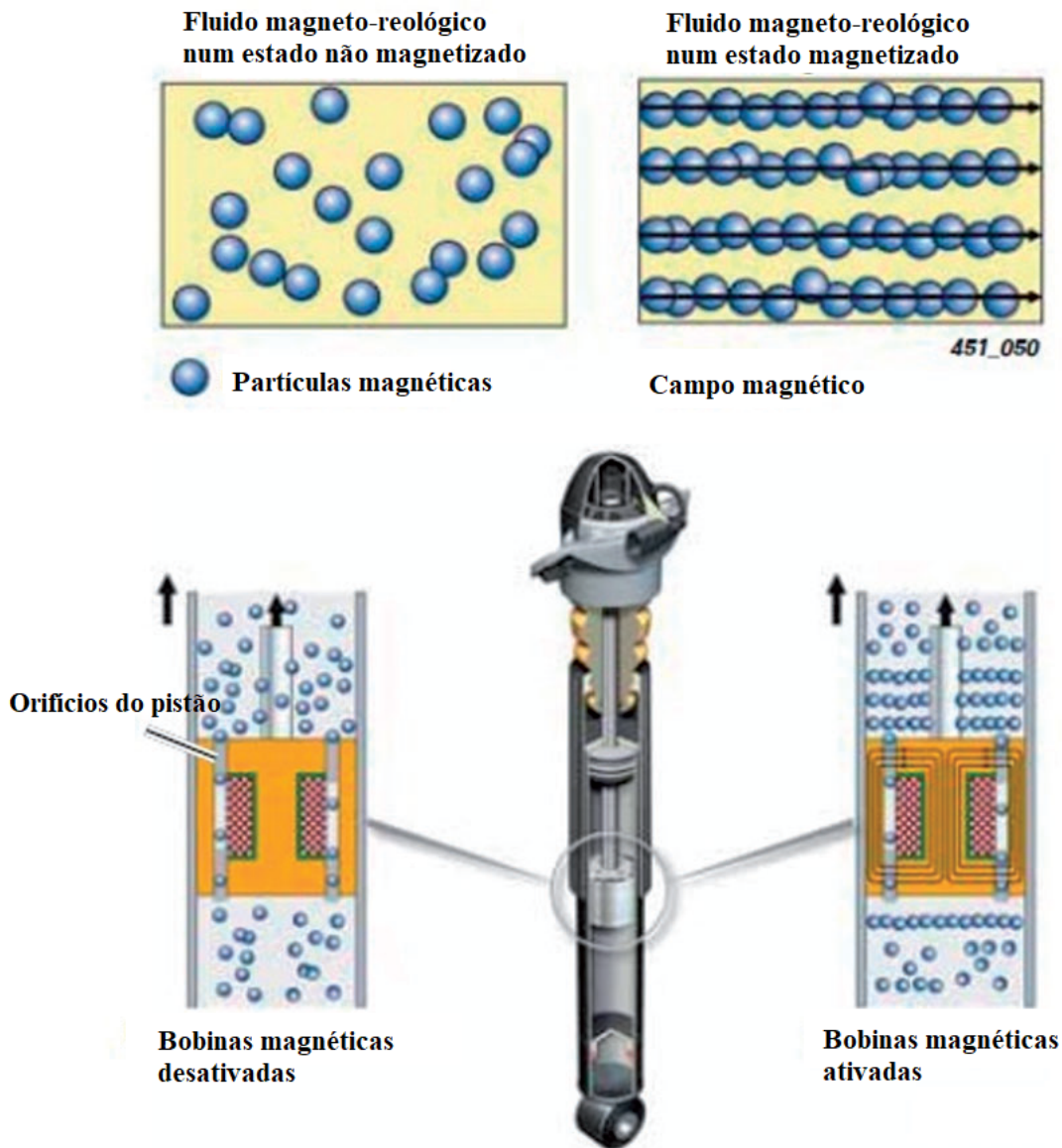


Figura 2.2: Suspensão magneto-reológica com seu princípio de funcionamento esquematizado. Adaptado de [Soliman and Kaldas 2021].

- Todos esses comportamentos são dependentes da tensão elétrica aplicada nos terminais do amortecedor

O modelo em [Wang et al. 2004] é acompanhado de 16 parâmetros experimentais para dois tipos de amortecedores: um simétrico e outro assimétrico.

2.2.2 Esquemas de controle

[Soliman and Kaldas 2021] faz uma revisão compreensiva dos esquemas de controle para suspensões semi-ativas existentes, com indicação de quais são utilizados na indústria. Os esquemas de controle explicados se dividem entre os clássicos e os modernos. Os controles clássicos abrangem o *Skyhook*, o *Groundhook* e o híbrido entre os dois. Os esquemas de

controle moderno são denominados *Linear quadratic control* - controle linear-quadrático, *Model predictive control* - Controle de modelo preditivo, *H ∞ clipped control* - controle H ∞ cortado e *Fuzzy logic control* - controle de lógica Fuzzy.

Os esquemas de controle clássico são mais simples e, de acordo com o autor, são a base da maioria das aplicações industriais na forma do controle *Skyhook*. Portanto, se dará foco a família de regras de controle do *Skyhook*. Essa família é baseada na formulação de um sistema físico onde se é possível ligar um dos elementos de massa do sistema a referencial inerte pelo amortecedor, como na figure (2.3).

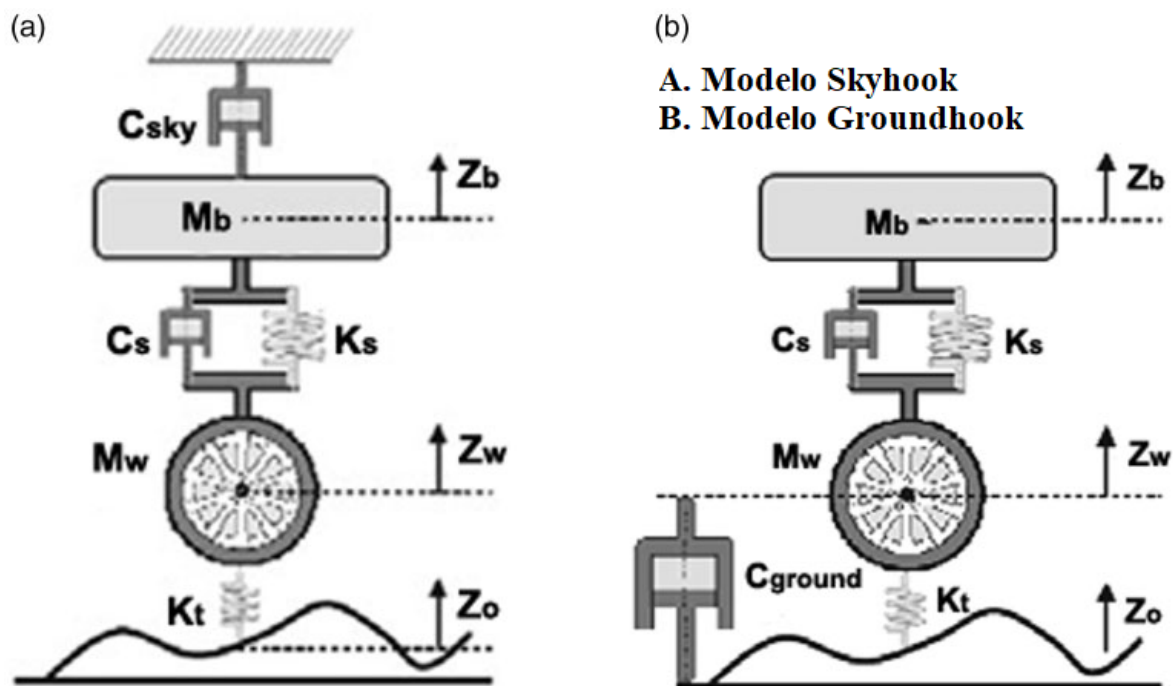


Figura 2.3: Idealização dos sistemas *Groundhook* e *Skyhook*. Adaptado de [Soliman and Kaldas 2021].

O objetivo dos controles é replicar o comportamento desses sistemas no sistema físico real. Isso é obtido por meio de regras de controle que buscam igualar, quando possível, as forças aplicadas pelo amortecedor real as forças aplicadas do amortecedor idealizado. Não é possível fazer isso em todos os momentos, e regras quanto ao que fazer nesses casos também são aplicadas.

2.3 Modelagem do veículo

A modelagem de um veículo terrestre consiste em elaborar um conjunto de equações matemáticas que, quando resolvidas, descrevem o comportamento do veículo nas condições desejadas. Esse conjunto de equações pode ser feito levando em conta todo o veículo e suas interações ou utilizando simplificações.

Simplificações incluem a omissão de forças atuando no corpo do veículo, como forças

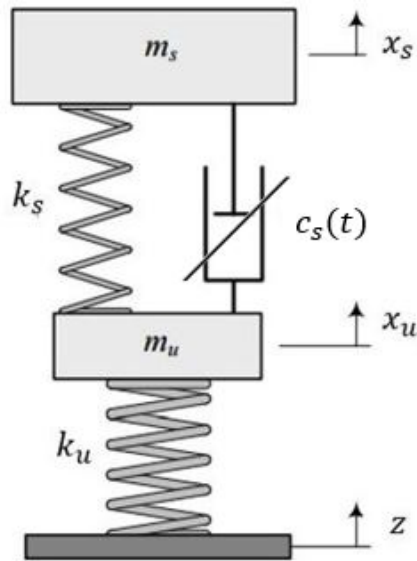


Figura 2.4: Modelo esquemático de 1/4 de veículo com suspensão semi-ativa. Reproduzido de [Melo 2017].

aerodinâmicas, a suposição do comportamento linear dos elementos do veículo, ou o estudo de seções isoladas do veículo, como nos modelos de 1/4 ou 1/2 de veículo. O custo de simplificar a descrição do veículo para elaborar o modelo pode ser, além de uma redução na acurácia, a incapacidade de descrever movimentos que dependem do movimento relativo entre componentes que foram excluídos do modelo.

O modelo de 1/4 de veículo é uma simplificação de significância. Em [Gillespie 1992] é explicado que esse modelo é capaz de descrever duas características de importância para a análise de um veículo, sendo denominadas *Road holding* e *Ride RMS*. Elas medem, respectivamente, a dirigibilidade do veículo e o conforto do passageiro. Um diagrama esquemático do modelo de 1/4 de veículo está disponível na imagem (2.4). O estudo de [Karnopp 1995] também suporta que esse modelo é adequado, mostrando que diversas análises de desempenho tanto para suspensões semi-ativas como para ativas foram realizadas em modelos de 1/4 de veículo.

O modelo de 1/2 de veículo também é importante. Um modelo de 1/2 de veículo inclui duas rodas e a carroceria, com as rodas podendo ser o par de rodas frontais ou traseiras ou o par de rodas esquerdas ou direitas. Ambos os modelos, além de descreverem a oscilação da carroceria melhor por simularem mais partes do veículo, permitem avaliar uma nova variável, a oscilação rotacional da massa suspensa.

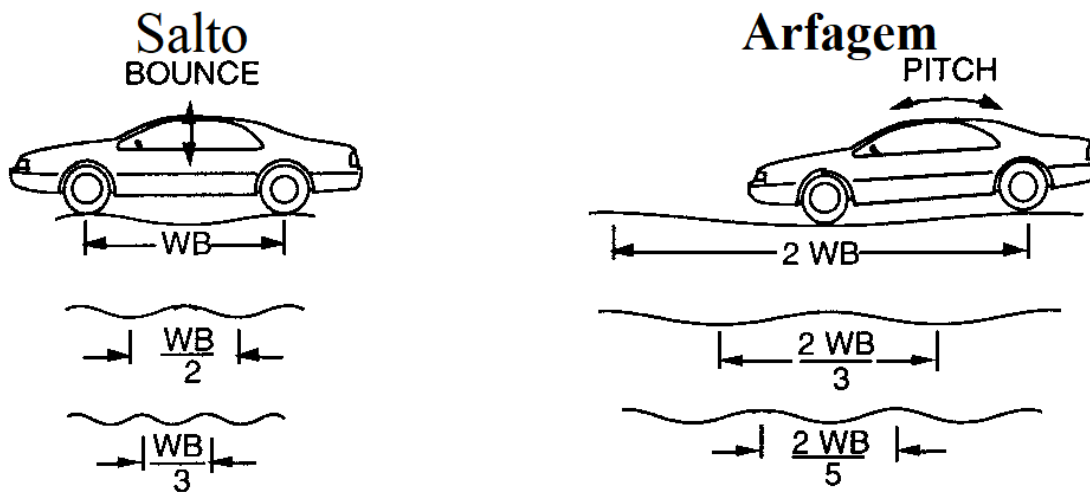


Figura 2.5: Oscilação para 1/2 de veículo no caso dos pares laterais. Adaptado de [Gillespie 1992].

Essa oscilação surge do movimento relativo das pontas da massa suspensa em cada uma das rodas. De acordo com [Gillespie 1992], esse movimento é denominado *rolling* ou rolagem quando nos pares de rodas frontais ou traseiras e denominada *pitch* ou arfagem quando nos pares de roda laterais.

Nesse trabalho, será adotado o modelo de 1/2 de veículo lateral, e portanto a descrição do modelo de 1/2 de veículo será feita considerando tal configuração. Desse ponto em diante, será compreendido que a menção do modelo de 1/2 de veículo implicitamente se refere ao modelo de 1/2 de veículo lateral.

Outro aspecto importante do modelo de 1/2 de veículo é que o movimento do centro de massa da carroceria passa a ser denominado *Bounce* ou salto. Esse movimento possui maior ressonância quando um perfil de pista tem um comprimento de onda múltiplo da distância entre os eixos da roda. Isso causa uma oscilação conjunta das rodas, aumentando a resposta. Ademais, o movimento de arfagem e balanço são opostos: um perfil de pista que maximiza o balanço minimiza a arfagem e vice-versa.

A desvantagem desse modelo em relação ao modelo de 1/4 de veículo é que sua modelagem é mais complexa, e seu sistema de equações é mais oneroso computacionalmente.

Para o modelo de 1/4 de veículo, é necessário definir o valor da massa suspensa e não suspensa, da rigidez das molas do pneu e do amortecimento, e os coeficientes de amortecimento do pneu e da suspensão. Já para o modelo de 1/2 de veículo, além de definir as características de massa para as rodas frontais e traseiras, também é necessário definir a massa, a distancia das rodas ao centro de massa e o momento de inércia da carroceria. Assim, a mudança de modelo provoca não só uma modificação no sistema de equações, mas introduz três variáveis completamente novas e duplica as variáveis existentes com exceção do valor da massa suspensa. Isso traz como consequência um maior espaço de variáveis para otimizar o movimento.

2.4 Perfil de estrada

Um perfil de estrada usual é definido pelas normas da ISO, como em [ISO 8608:2016 2016]. As classes seguem uma denominação numérica, com uma queda de potência logarítmica na frequência. As classes estão expostas no diagrama de densidade de potência espectral na figura (2.6).

Porém, outros perfis podem ser utilizados. Um perfil de relevância para esse estudo é aquele que segue uma distribuição de ruído gaussiano, devido a suas propriedades úteis ao analisar o sinal gerado no tempo no domínio da frequência.

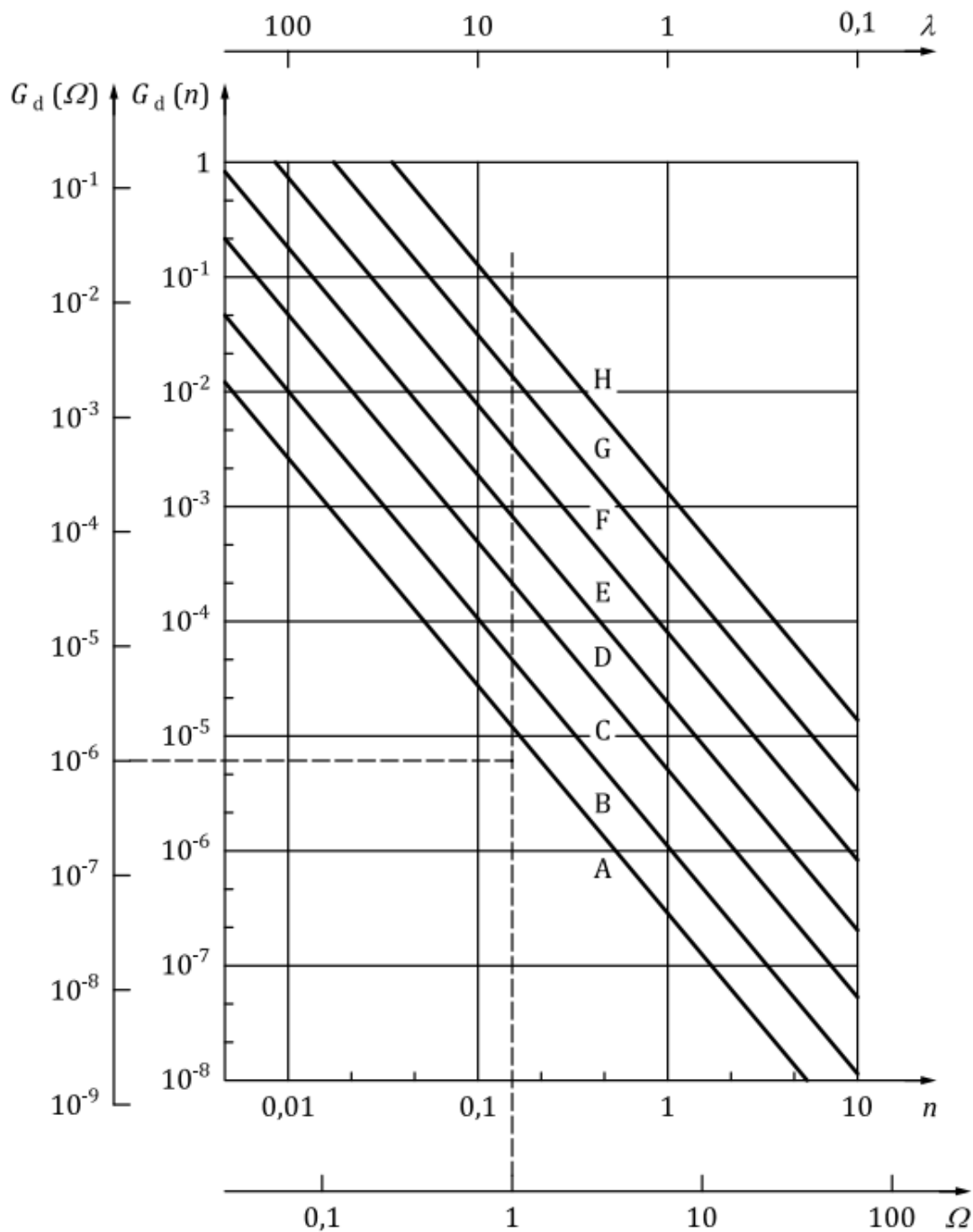


Figura 2.6: Classes de estrada ISO. Reproduzido de [ISO 8608:2016 2016], figura C.2.

O perfil de estrada tem uma relação um pouco mais complexa com a excitação no modelo de 1/2 de veículo. Como as rodas do veículo encontram separadas a uma distância no mesmo sentido de trajeto, é necessário considerar que as excitações de estrada que ocorrem na roda frontal ocorrerão na roda traseira após um intervalo de tempo. Esse intervalo de tempo é uma função da relação entre a distância entre as rodas e a velocidade do veículo. Portanto, um perfil de estrada com certas frequências será sentido como possuindo frequências diferentes a depender da velocidade do veículo.

2.5 Estado da arte

De acordo com [Soliman and Kaldas 2021], amortecimentos semi-ativos buscam obter um compromisso entre as vantagens de performance de um amortecimento ativo e as vantagens de custo de um amortecimento passivo. Assim, o comportamento de um veículo com suspensão ativa pode ser utilizado como um teto para os ganhos de performance de uma suspensão semi-ativa. Para um modelo de veículo completo, [Shirahatti et al. 2008] estuda o comportamento de um amortecimento ativo com controlador LQR otimizado geneticamente. Para 1/2 de veículo, [de Lima et al. 2012] faz uma análise da sensibilidade das frequências de ressonância do sistema para com a movimentação do centro de gravidade do veículo. Porém, há um erro menor na formulação matemática do veículo no artigo. [Wei and Taghavifar 2017] realiza uma análise de meio veículo utilizando um método de reutilização de energia para reduzir a amplitude das vibrações. Para um modelo de 1/4 de veículo, [Chen et al. 2014] compara os resultados de veículo com suspensão ativa, passiva e três configurações semi-ativas. Há uma discrepância na performance entre esses dois artigos, que pode ser explicado pela otimização do controlador em [Shirahatti et al. 2008] e pela diferença dos modelos de 1/4 de veículo e veículo completo. Para comparações, [Chen et al. 2014] será utilizado, mas ressalta-se que sistemas ativos podem apresentar ganhos maiores após otimizações.

[Zhang et al. 2013] analisa o desempenho de um modelo de veículo completo com suspensão semi-ativa e controle *Skyhook*, com os resultados demonstrando ganhos. [Ahmadian 2017] estuda o desempenho de suspensões semi-ativas utilizando controladores da família *Skyhook* estilo *on-off* para um modelo de 1/4 de veículo. Concluiu-se que para veículos no geral há um benefício na utilização dessas suspensões semi-ativas, e que utilizar um controlador híbrido com pesos iguais para os termos do *Skyhook* e *Groundhook* fornece um bom compromisso entre melhorar as propriedades de conforto e manobrabilidade do veículo. Um detalhe adicional é que no estudo é mostrado que o tipo de veículo influencia moderadamente nos ganhos do uso de uma suspensão semi-ativa. [Emura et al. 1994] compara o desempenho de uma suspensão semi-ativa utilizando 1/4 de veículo com controle *Skyhook* e controle H_∞ , onde o segundo se demonstrou mais efetivo que o primeiro em conter as vibrações no chassi. [Melo 2017] realizou um estudo comparando diversos tipos de estratégias para suspensão semi-ativa, com o uso da suspensão semi-ativa de variação contínua *Skyhook* entre elas. [Karnopp 1995] comenta que a ideia de uma suspensão baseada na idealização do modelo *Skyhook* aparece diversas vezes no estudo de suspensões ativas e semi-ativas, ressaltando a importância do modelo.

Um tema comum nas pesquisas de suspensões semi-ativas em 1/4 de veículo é a utilização em conjunto com elementos inerciais denominados *inerters*. [Li et al. 2021] estuda uma suspensão semi-ativa com *inerters* de propriedades também controláveis, e utiliza um esquema de controle com lógica *Fuzzy* para um controlador *PID*. Somente uma configuração de associação entre os elementos da suspensão é utilizada, sendo a dos elementos em

paralelo. com o foco ocorrendo na comparação entre o uso de ou não de amortecedores semi-ativos e *inerters*. Do trabalho conclui-se que, apesar do desempenho marginalmente superior ao se utilizar um *inerters*, ainda existem ganhos grandes ao se utilizar apenas uma suspensão semi-ativa. [Chen et al. 2014] também suporta essa conclusão, com os ganhos adicionais devido ao uso de um *inerters* serem bem inferiores aos obtidos pela introdução da suspensão semi-ativa. Com base no trabalho de [Zhang et al. 2012] ressalva-se, porém, que existe a possibilidade de ganhos ocorrerem modificando a forma como os elementos de uma suspensão se associam. Utilizando esquemas de controle da família *Skyhook* produz-se resultados quanto ao desempenho de diversas combinações de rigidez de molas e amortecimentos, é também comparada diversas configurações físicas de elementos inerciais com suspensões semi-ativas, e certos arranjos produzem resultados melhores em métricas diferentes.

A modelagem da suspensão magneto-reológica é feita em [Gołdasz et al. 2020] com bons resultados comparado ao corpo experimental. [Song et al. 2005] e [Tusset et al. 2012] fornecem bons pontos comparativos entre o valor inicial do coeficiente de amortecimento e os valores máximos para a aplicação de corrente.

Obra	Tipo	Modelo de veículo	Metodologia
[Soliman and Kaldas 2021]	Artigo	1/4 de veículo	Experimental, revisão bibliográfica
Pros	Visão geral do estado da arte das suspensões magneto-reológicas, as tecnologias empregadas e das tendências da indústria.		
Contras	Ausência de métodos numéricos.		
[Shirahatti et al. 2008]	Artigo	Veículo completo	Numérica, otimização
Pros	Alta fidelidade do modelo, inclusão do assento dos tripulantes no modelo de vibrações, uso de diversos critérios de conforto vibracional.		
Contras	Alta complexidade do modelo, modelo com onerosos custos computacionais, apenas suspensão ativa.		
[de Lima et al. 2012]	Artigo	1/2 veículo	Numérica, análise paramétrica
Pros	Veículo assimétrico, análise da sensibilidade a posição do CG.		
Contras	Formulação inconsistente, análise de apenas um parâmetro.		
[Wei and Taghavifar 2017]	Artigo	1/2 veículo	Numérica, análise comparativa
Pros	Formulação extensamente explicada, parâmetros usuais, veículo assimétrico nos componentes.		
Contras	Metodologia de controle vibracional não usual, modelo de carro com distâncias ao CG iguais (não usual para carros reais).		

Tabela 2.2: Tabela com referências bibliográficas e ponderação das vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas nos artigos.

Obra	Tipo	Modelo de veículo	Metodologia
[Chen et al. 2014]	Artigo	1/4 veículo	Numérica, análise comparativa
Pros	Valores comparativos entre suspensão ativa, semi-ativa com <i>inertor</i> , sem <i>inertor</i> e passiva, ampla gama de resultados reprodutíveis.		
Contras	Regra de controle semi-ativo da suspensão estilo on-off.		
[Zhang et al. 2013]	Artigo	Veículo completo	Numérica, análise comparativa
Pros	Uso do esquema de controle <i>Skyhook</i> com amortecimento MR, boa descrição dos parâmetros do veículo.		
Contras	Uso do modelo de amortecimento MR de Bouc-wen não alterado.		
[Ahmadian 2017]	Artigo	1/4 de veículo	Experimental, paramétrica
Pros	Muitos resultados experimentais, revisão bibliográfica.		
Contras	Sem modelo numérico propriamente dito do sistema veicular, analisando apenas a sensibilidade do modelo de 1/4 de veículo.		
[Ahmadian 2017]	Artigo	1/4 de veículo	Experimental, paramétrica
Pros	Muitos resultados experimentais, revisão bibliográfica.		
Contras	Sem modelo numérico propriamente dito do sistema veicular, analisando apenas a sensibilidade do modelo de 1/4 de veículo.		
[Emura et al. 1994]	Artigo	1/4 de veículo	Numérica, análise comparativa
Pros	Uso de mais de um modelo de esquema de controle, controle <i>Skyhook</i> incluso.		
Contras	Modelo com 3 massas suspensas, mais complexo que o modelo de 1/4 de veículo normal, artigo antigo.		
[Melo 2017]	Tese de graduação	1/4 de veículo	Numérica, análise comparativa
Pros	análise extensiva do modelo de 1/4 de veículo com controle semi-ativo, disponibilidade dos códigos utilizados.		
Contras	Ausência de modelagem do amortecedor magneto-reológico.		
[Karnopp 1995]	Artigo	1/4 de veículo	Experimental, revisão bibliográfica
Pros	Demonstrações das vantagens do uso do amortecimento semi-ativo		
Contras	Ausência de procedimentos numéricos, artigo antigo		
[Li et al. 2021]	Artigo	1/4 de veículo	Experimental, amortecimentos MR
Pros	Coleta de dados experimentais, apresentação de um sistema com <i>inertor</i> , separação da influência do <i>inertor</i> do sistema de amortecedor MR.		
Contras	Lógica de controle do amortecimento <i>Fuzzy</i> e com sistema PID mais complexa.		

Tabela 2.3: Segunda tabela com referências bibliográficas e ponderação das vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas nos artigos.

Obra	Tipo	Modelo de veículo	Metodologia
[Zhang et al. 2012]	Artigo	1/4 veículo	Numérica, análise comparativa
Pros	Uso de diversas configurações de molas, amortecimentos e <i>inerters</i> . Geração de espaço de respostas com identificação de mínimos e máximos.		
Contras	Uso de controle on-off para o controle Skyhook.		
[Goldasz et al. 2020]	Artigo	1/4 veículo	Experimental
Pros	Valores experimentais da suspensão magneto-reológica e demonstração do desempenho da formulação por meio da histerese magnética combinada com o escoamento.		
Contras	Modelo complexo, concordância com os dados experimentais pior que outros modelos.		
[Song et al. 2005]	Artigo	1/4 veículo	Experimental
Pros	Proposição de formulação alternativa a paramétrica que pode ser utilizada com passos de integração menores.		
Contras	Modelo complexo, concordância com os dados experimentais comparável a modelos paramétricos mais simples.		
[Tusset et al. 2012]	Artigo	Não aplicável	Numérica, análise comparativa
Pros	análise do fenômeno de amortecimento magneto-reológico num sistema não-veicular permite observar o comportamento de uma maneira diferente.		
Contras	Menor aplicabilidade direta dos resultados.		

Tabela 2.4: Terceira tabela com referências bibliográficas e ponderação das vantagens e desvantagens das metodologias utilizadas nos artigos.

Capítulo 3

Metodologia e formulação matemática

3.1 Sistema de equações e solução analítica

3.1.1 1/4 de veículo

O sistema de equações do modelo de 1/4 de veículo é montado a partir do somatório de forças nos corpos superior e inferior, tal como realizado na imagem 2.4. Isso resulta na equação (3.1).

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -K_s \\ -K_s & K_s + K_u \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ x_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z \cdot K_u \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Para o sistema passivo, C_s é um valor constante, enquanto para o sistema semi-ativo C_s é uma função do tempo.

A resposta do sistema no tempo depende do perfil de estrada. O método da resolução no domínio da frequência está disponível em [Inman 2013]. A solução analítica desse sistema no domínio da frequência é dada em [Gillespie 1992], adimensionalizado pela massa superior. O sistema se torna a equação (3.6), e é válido somente para o sistema passivo.

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \chi \end{bmatrix} + \omega j \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_u \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} X_s(\omega) \\ X_u(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Z(\omega) \end{bmatrix} \frac{e^{\omega j t}}{k_i} \quad (3.2)$$

As duas variáveis de interesse são os ganhos na aceleração da massa inferior e no deslocamento da massa superior. Os ganhos se tratam da razão entre o deslocamento $X_s(\omega)$ ou $X_i(\omega)$ e o perfil de estrada $Z(\omega)$. Isso é válido tanto para o ganho em deslocamento quanto

para o ganho em aceleração, pois as razões são iguais. Eles são obtidos isolando esses termos na equação (3.6) e são dados como as equações (3.3) e (3.4).

$$H_s(\omega) = \frac{k_s \cdot k_u + j \cdot (k_u \cdot c_s \cdot \omega)}{R(\omega)} \quad (3.3)$$

$$H_i(\omega) = \frac{k_s \cdot k_u + j \cdot (k_u \cdot c_s \cdot \omega) - \omega^2 \cdot k_u}{R(\omega)} \quad (3.4)$$

Onde R é o determinante da matriz do sistema da equação (3.6), dada pela equação (3.5).

$$R(\omega) = \chi \cdot \omega^4 - (k_u + k_s \cdot \chi + k_s) \cdot \omega^2 + k_s \cdot k_u + j \cdot (k_u \cdot c \cdot \omega - (1 + \chi) \cdot c \cdot \omega^3) \quad (3.5)$$

3.1.2 1/2 de veículo

O sistema de equações do modelo de 1/2 de veículo é também montado a partir do somatório de forças. Porém, existem mais variáveis. Há um corpo superior, dois corpos inferiores, e o corpo superior pode rotacionar. Isso resulta em 4 variáveis: a altura do corpo superior, a altura do corpo inferior frontal, a altura do corpo inferior traseiro, e o ângulo de inclinação do corpo superior.

Há uma rotação, e o sentido de rotação será considerado como o do vetor resultando do produto dos vetores de movimento vertical e horizontal.

Isso resulta na equação (3.6).

$$M_{A_{gdl}} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_t \\ \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_\theta \end{bmatrix} + K_{A_{gdl}} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_t \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_\theta \end{bmatrix} + C_{A_{gdl}} \cdot \begin{bmatrix} x_f \\ x_t \\ x_s \\ x_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f \cdot k_{f,i} \\ Z_t \cdot k_{t,i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Os termos da equação 3.6 são dados nas equações (3.7), (3.8) e (3.9).

$$M_{A_{gdl}} = \begin{bmatrix} m_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$K_{4gdl} = \begin{bmatrix} k_{f,i} + k_{f,s} & 0 & -k_{f,s} & k_{f,s} * b \\ 0 & k_{t,i} + k_{t,s} & -k_{t,s} & -k_{t,s} * d \\ -k_{f,s} & -k_{t,s} & k_{f,s} + k_{t,s} & k_{f,s} * b - k_{t,s} * d \\ -k_{f,s} * b & k_{t,s} * d & k_{f,s} * b + k_{t,s} * d & k_{f,s} * b^2 - k_{t,s} * d^2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$C_{4gdl} = \begin{bmatrix} c_{f,i} + c_{f,s} & 0 & -c_{f,s} & c_{f,s} * b \\ 0 & c_{t,i} + c_{t,s} & -c_{t,s} & -c_{t,s} * d \\ -c_{f,s} & -c_{t,s} & c_{f,s} + c_{t,s} & c_{f,s} * b - c_{t,s} * d \\ -c_{f,s} * b & c_{t,s} * d & c_{f,s} * b + c_{t,s} * d & c_{f,s} * b^2 - c_{t,s} * d^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

A solução analítica desse conjunto de equações não será analisada.

3.2 Solução numérica

A solução numérica do sistema é feita no domínio do tempo. Isolando os termos de aceleração na equação (3.6), obtemos a equação (3.10).

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{z \cdot K_u}{m_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{C_s}{m_s} & -\frac{C_s}{m_s} \\ -\frac{C_s}{m_i} & \frac{C_s}{m_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{K_s}{m_s} & -\frac{K_s}{m_s} \\ -\frac{K_s}{m_i} & \frac{K_s + K_u}{m_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ x_u \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Podemos transformá-la numa equação de estados ao reorganizar alguns termos. Coloque os termos de posição e velocidade num mesmo vetor e obtém-se o sistema da equação (3.11).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \\ \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_s}{m_s} & \frac{K_s}{m_s} & -\frac{C_s}{m_s} & \frac{C_s}{m_s} \\ \frac{K_s}{m_i} & -\frac{K_s + K_u}{m_i} & \frac{C_s}{m_i} & -\frac{C_s}{m_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ x_u \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_u}{m_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ z \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

A complicação da resolução ocorre devido ao termo z ser um valor aleatório no tempo. Diversas metodologias numéricas para resolver sistemas como a equação (3.12), onde d é um termo estocástico, são explicadas em [Hernandez and Spigler 1992].

A equação (3.11), no caso semi-ativo onde C_s depende do tempo, é da forma da equação (3.12) onde ξ é uma variável aleatória que obedece a uma distribuição gaussiana normal.

$$\dot{x} = F(t) \cdot x + \sigma \cdot \xi \quad (3.12)$$

As funções do software MATLAB para a resolução de sistemas de equações diferenciais ordinárias se mostraram muito custosas devido a necessidade de gerar muitos pontos de ruído branco. Portanto, para a resolução do sistema não se utilizou métodos já prontos.

Apesar dos métodos implícitos serem mais estáveis, optou-se por utilizar o método de Euler explícito devido a dificuldade em solucionar a formulação implícita para o caso do sistema semi-ativo. Ademais, optou-se por um método de Euler devido a simplicidade da implementação. Assim, obtemos para o método numérico a equação (3.13), que nos permite obter o vetor de estado num tempo $t+1$ a partir das condições em t .

$$x_{t+1} = x_t + F(t) \cdot x_t \cdot \Delta t + \sigma \cdot \delta W \quad (3.13)$$

W é dado na equação (3.14) e ΔW na equação (3.15).

$$W(t) = \int_0^t \xi(s) ds \quad (3.14)$$

$$\Delta W(t) = W(t+1) - W(t) = \int_0^{t+1} \xi(s) ds - \int_0^t \xi(s) ds = \int_t^{t+1} \xi(s) ds \quad (3.15)$$

Aproximamos a integral para ΔW numericamente por um método de retângulos, como na equação (3.16).

$$\Delta W(t) = \int_t^{t+1} \xi(s) ds = \xi_t \cdot \Delta t \quad (3.16)$$

Diferentemente dos métodos tradicionais, não é tomado a média entre o ponto atual e o seguinte porque foi verificado que tomar a média entre os dois valores remove a propriedade de ruído branco da distribuição. Como numa distribuição aleatória o valor intermediário não tem relação com nenhum dos valores nas extremidades, não haveria ganho de precisão na integral ao tomar o valor médio.

Chegamos, assim, na equação (3.17).

$$x_{t+1} = F(t) \cdot x_t \cdot \Delta t + \sigma \cdot \xi_t \cdot \Delta t \quad (3.17)$$

Para a quantidade ξ , iremos calcular um vetor cuja os elementos seguem uma distribuição de ruído branco gaussiano com potência 1. O software MATLAB possui uma função que gera um vetor que atende as condições pedidas.

Para obtermos o ganho, será necessário transformar os resultados no domínio da frequência. Isso é feito realizando uma transformada de Fourier discreta nos resultados do tempo. Os parâmetros escolhidos para os resultados no tempo influenciam as propriedades dos resultados na frequência.

De acordo com as informações em [Proakis and Manolakis 1996], o passo de tempo utilizado na discretização em segundos é o dobro da frequência máxima que pode ser medida em Hz. O tempo o qual a simulação roda determina a precisão dos resultados, e também limita qual a resolução máxima da transformada: o tempo em segundos da simulação é o inverso da diferença mínima de frequência que a transformada pode distinguir.

A transformada será realizada utilizando a função `fft` do software MATLAB, e portanto não será necessário desenvolver uma implementação do algoritmo.

A solução numérica do sistema de 1/2 de veículo é feita de maneira análoga. Ao invés de utilizar um sistema com 4 variáveis, se utiliza um sistema com 8. Por conta do desenvolvimento ser quase o mesmo, não será exposta aqui a metodologia.

3.3 Modelos de controle *Skyhook* e *Groundhook*.

Os esquemas de controle *Skyhook* e *Groundhook* buscam copiar as forças atuando nas massas de seus sistemas idealizados nos sistemas reais.

O sistema *Skyhook* possui a massa superior ligada a um referencial inerte. Para esse sistema, as forças no corpo superior devido ao amortecimento são tais qual as da equação 3.18.

$$\ddot{x}_s \cdot m_s = K_s \cdot (x_i - x_s) + C_{sky} \cdot (\dot{x}_s) \quad (3.18)$$

O objetivo do controle é igualar o somatório de forças nessa massa ao somatório de forças na massa superior real. As forças no corpo superior do sistema real estão na equação (3.11). Assim, temos que para o *Skyhook* devemos manipular C_S de forma a obedecer a equação (3.19). O valor se encontra isolado na equação 3.20

$$C_{sky} \cdot \dot{x}_s = C_s \cdot (\dot{x}_i - \dot{x}_s) \quad (3.19)$$

$$C_s = \frac{C_{sky}}{\left(\frac{\dot{x}_i}{\dot{x}_s} - 1\right)} \quad (3.20)$$

É importante notar que C_s não pode assumir valores negativos. Por esse motivo, quando a razão entre x_i e x_s se torna menor que 1, C_s não pode continuar seguindo essa regra. Ademais, C_s não pode assumir valores infinitos ou nulos na prática. Assim, valores muito próximos de 1 ou muito grandes para a razão em questão também são impraticáveis, sendo necessário abandonar a regra imposta em (3.20). Portanto, para adequar as demandas do controle a realidade física, segue-se as relações em (3.21)

$$\begin{aligned} C_s &\leq C_{max} \\ C_s &\geq C_{min} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Os valores de C_{min} e C_{max} são dependentes da capacidade física do amortecedor magneto-reológico de modificar suas propriedades com base na corrente. É importante ressaltar que não é possível diminuir o coeficiente de amortecimento em relação ao valor natural do amortecedor. Portanto, C_{min} é um valor que depende do fluido utilizado. C_{max} , por outro lado, depende da capacidade do amortecedor de aumentar sua resistência com base na corrente aplicada, e portanto pode depender de diversos fatores, como a potência máxima permitida para o amortecedor ou a resistência máxima que as partículas magnéticas conseguem impor com base no campo magnético, sendo esse valor mais maleável.

No contexto desse trabalho, o valor nominal de C_s no *Skyhook* será sempre o valor atribuído a C_{sky} nas equações. Para os valores máximos e mínimos, se tomara 50% e 150% de C_{sky} inicialmente. Esses valores são arbitrários, e baseados em quantidades que se espera serem razoáveis mas modestas para o amortecedor. No trabalho de [Tusset et al. 2012] é mostrado que um amortecedor magneto-reológico tem, em suas correntes típicas, valores cerca de 5 a 6 vezes maiores que o valor sem corrente. [Song et al. 2005] corrobora com dados experimentais que valores até 9 vezes maiores podem ser obtidos ao se fornecer corrente suficiente. Como o limite inferior representa a resistência sem corrente do amortecedor, na prática isso significa que o sistema aqui proposto deve ser capaz de triplicar o coeficiente de amortecimento inicial, o que é realizável.

Como é possível obter valores diferentes dos utilizados, fica aberta a questão de qual configuração de limites mínimos e máximo é a mais efetiva. Essa questão requer explorar um espaço de possibilidades muito amplo, e portanto precisará ser solucionado utilizando

métodos de busca não exaustivos, como otimizadores.

Para o *Groundhook*, a aproximação é extremamente semelhante ao *Skyhook*, com a diferença que o amortecedor liga a massa inferior a um referencial estático. As equações (3.22), (3.23) e (3.24) seguem a mesma lógica utilizada no sistema *Skyhook*, e fornecem a relação entre C_s e C_{ground} . Também é seguida a limitação imposta na relação (3.21), com os mesmos limites de 150% máximo e 50% de mínimo sendo utilizados e o valor nominal do C_s sendo o valor utilizado como C_{ground} .

$$\ddot{x}_i \cdot m_i = K_s \cdot (x_s - x_i) + K_i \cdot -x_i \cdot C_{ground} \cdot (\dot{x}_i) + K_i \cdot z \quad (3.22)$$

$$C_{ground} \cdot \dot{x}_i = C_s \cdot (\dot{x}_i - \dot{x}_s) \quad (3.23)$$

$$C_s = \frac{C_{ground}}{\left(1 - \frac{\dot{x}_s}{\dot{x}_i}\right)} \quad (3.24)$$

O modelo *hybrid hook* é simplesmente uma combinação linear entre o *Groundhook* e o *Skyhook*. Ele é dado tal como na equação (3.25).

$$C_s = \alpha \cdot \frac{C_{ground}}{\left(1 - \frac{\dot{x}_s}{\dot{x}_i}\right)} + \beta \cdot \frac{C_{sky}}{\left(\frac{\dot{x}_i}{\dot{x}_s} - 1\right)} \quad (3.25)$$

Onde α e β são valores que variam conforme o resultado desejado.

Para esse trabalho, a modelagem da suspensão magneto-reológica será feita assumindo que os sistemas embarcados que conectam o sistema do controlador com o veículo real são perfeitos. Assim, será assumido que o controlador possui conhecimento instantâneo da velocidade das massas e que a corrente fornecida é exatamente a necessária para gerar a resposta pedida, mesmo com fenômenos de histerese. Essa simplificação permitem que o desempenho dos esquemas de controle seja avaliado sem interferência devido a um sistema imperfeito para o controle da corrente na suspensão ou um sistema de aquisição de dados com atraso. Para obter o desempenho de um veículo real, essas suposições deverão ser relaxadas para que o comportamento se aproxime do que ocorre em campo. Porém, para a comparação entre esquemas de controle isso é um fenômeno a parte.

Para 1/2 de veículo, serão considerados controladores individuais para cada um dos pneus, e a velocidade da massa superior será considerada como a velocidade sentida pelo amortecedor considerando o movimento angular e não só a velocidade do centro de massa

da carroceria.

3.4 Métricas

Para avaliar as propriedades de manobrabilidade e conforto, são necessárias métricas que mensurem a performance. Para isso, serão utilizadas as propriedades de *Road Holding* e *Ride RMS*, como mencionado no capítulo 2.

Um elemento importante a ser mencionado é que, no domínio da frequência, o ruído branco é representado por uma função de valor constante. Portanto, sua transformada de Fourier é apenas uma constante ao longo de todo ω . Assim, a transformada de Fourier da posição ou aceleração é igual ao ganho multiplicada por uma constante igual a potência do ruído branco.

Para o cálculo do *Road Holding*, utiliza-se a fórmula definida em [Gomes and de Moraes 2021], que descreve a equação (3.26).

$$rh(\omega, K, C) = \frac{x_u(K, C) - z}{z} = H_i(\omega, K, C) - 1 \quad (3.26)$$

O valor de *Road Holding* é uma função de ω . Assim, para efeitos de comparação, será medido o valor assumido pela métrica para todos os valores de ω , tal como na relação (3.27).

$$rh(K, C) = \max(H_i(\omega, K, C) - 1) \quad (3.27)$$

Para o cálculo da *Ride RMS*, utilizou-se as definições em [Gillespie 1992], reproduzida na equação (3.28).

$$RMS(H_s, K, C) = P \int_0^\infty \left| \frac{x_s(K, C)}{z} \right|^2 d\omega = P \int_0^\infty |H_s(\omega, K, C)|^2 d\omega \quad (3.28)$$

Para a integral na função da *Ride RMS*, será feita uma integral numérica pelo método de trapézios por meio da função `Trapz` do software MATLAB.

3.5 Modelo de amortecimento magneto-reológico

Para o modelo de amortecimento magneto-reológico, utilizou-se a metodologia de [Wang et al. 2004]. Esse modelo conta com 16 parâmetros, podendo ser simétrico ou as-

simétrico em relação a velocidade e ao deslocamento. Os parâmetros utilizados foram os mesmos do sistema assimétrico apresentado no artigo. A escolha pelo sistema assimétrico se deu por conta do comportamento mais complexo permitir a observação de fenômenos restritos a esse modelo. Os valores utilizados encontram-se na tabela (3.1).

Constante	Valor	Constante	Valor
a_0 (adm)	1300	k_0 (adm)	112.5
a_1 (m/s) ⁻¹	1.75	k_{1c} (adm)	2.5
a_2 (amp) ⁻¹	2.85	k_{1e} (adm)	5.2
a_3 (amp) ⁻¹	1.55	k_2 (adm)	19.4
a_4 (m/s) ⁻¹	4.60	k_3 (adm)	2.90
I_0 (amp)	0.05	k_4 (adm)	0.095
I_1 (amp)	0.08	k_5 (adm)	0.65
f_0 (N)	71.6	k_6 (adm)	0.12

Tabela 3.1: Dados das constantes do amortecedor magneto-reológico assimétrico de [Wang et al. 2004].

Os coeficientes que controlam a assimetria são k_5 , k_6 e $k_{1c/e}$. O sistema se torna simétrico quando k_5 e k_6 são 0 e k_{1c} é igual a k_{1e} .

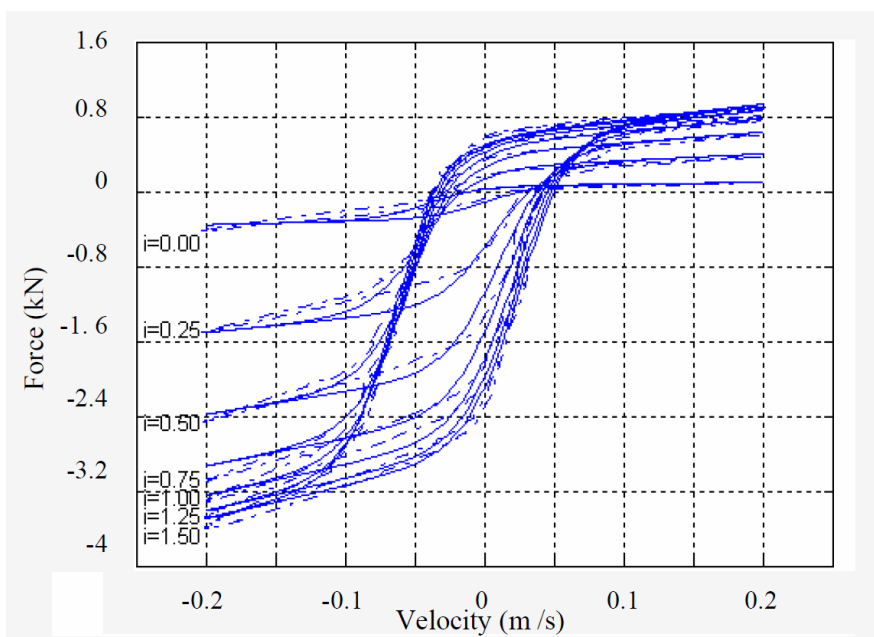


Figura 3.1: Modelo de amortecimento utilizado junto com as funções dos coeficientes expostas de forma gráfica.

O modelo matemático do sistema é composto de diversas funções sigmóides, como mostrado na figura (3.2). Os termos utilizados são calculados a partir das relações na figura (3.3).

Na figura (3.2), o termo $f(v,i)$ é a força do amortecimento para dada velocidade v e corrente de acionamento i . Os demais coeficientes são tais quais aqueles presentes na tabela (3.1). Na figura (3.3), os valores de v e i são variáveis de entrada, enquanto os outros coeficientes são tais quais os determinados pela tabela (3.1). A função "sgn" representa a função

$$f(v, i) = \begin{cases} \left(f_t \frac{1 - e^{-\alpha(v+v_h+v_d)}}{1 + e^{-\alpha(v+v_h+v_d)}} - f_d \right) (1 + k_{vc} \cdot |v|); & v \geq 0 \\ \left(f_t \frac{1 - e^{-\alpha(v+v_h+v_d)}}{1 + e^{-\alpha(v+v_h+v_d)}} - f_d \right) (1 + k_{ve} \cdot |v|); & v < 0 \end{cases}$$

Figura 3.2: Equacionamento para as forças do modelo magneto-reológico. Reproduzido de [Wang et al. 2004].

sinal. As variáveis x , \dot{x} e \ddot{x} são as variáveis de diferença entre as posições dos corpos unidos pelo amortecedor.

$$\begin{aligned} f_t &= f_0 \cdot (1 + e^{a_1 \cdot v_m}) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{1 + e^{-a_2 \cdot (i+I_0)}} - \frac{k_2}{1 + e^{-a_2 \cdot I_0}} \right) \\ v_h &= \text{sgn}(\ddot{x}) \cdot k_4 \cdot v_m \cdot \left(1 + \frac{k_3}{1 + e^{-a_3 \cdot (i+I_1)}} - \frac{k_3}{1 + e^{-a_3 \cdot I_1}} \right) \\ \alpha &= a_0 / (1 + k_0 \cdot v_m) & k_{vc} &= k_{1c} \cdot e^{-a_4 \cdot v_m} \\ v_m &= a_m \cdot \omega = \sqrt{(\dot{x})^2 - \ddot{x} \cdot x} & k_{ve} &= k_{1e} \cdot e^{-a_4 \cdot v_m} \\ f_d &= k_5 \cdot f_t; & v_d &= k_6 \cdot v_m \end{aligned}$$

Figura 3.3: Equacionamento para os termos utilizados no modelo magneto-reológico da figura (3.2). Adaptado de [Wang et al. 2004].

3.6 Tratamento numérico

Os resultados obtidos pela transformada de Fourier apresentam alto ruído. Isso ocorre porque, devido a natureza randômica do ruído branco, a resposta não tem garantia de tomar nenhum resultado em específico. Portanto, será necessário tratar os dados para obter um resultado mais reprodutível.

O primeiro fator na estabilidade dos resultados é no tempo de simulação. Quanto mais tempo a simulação roda, mais precisa fica a mensuração das frequências, devido aos fenômenos mencionados na seção 3.2 e ao "vazamento" de potência que ocorre numa observação de duração finita, como explicado em [Proakis and Manolakis 1996]. Um exemplo do fenômeno se encontra na figura (3.4).

O segundo fator é a quantidade de observações em um mesmo ponto. Utilizando o prin-

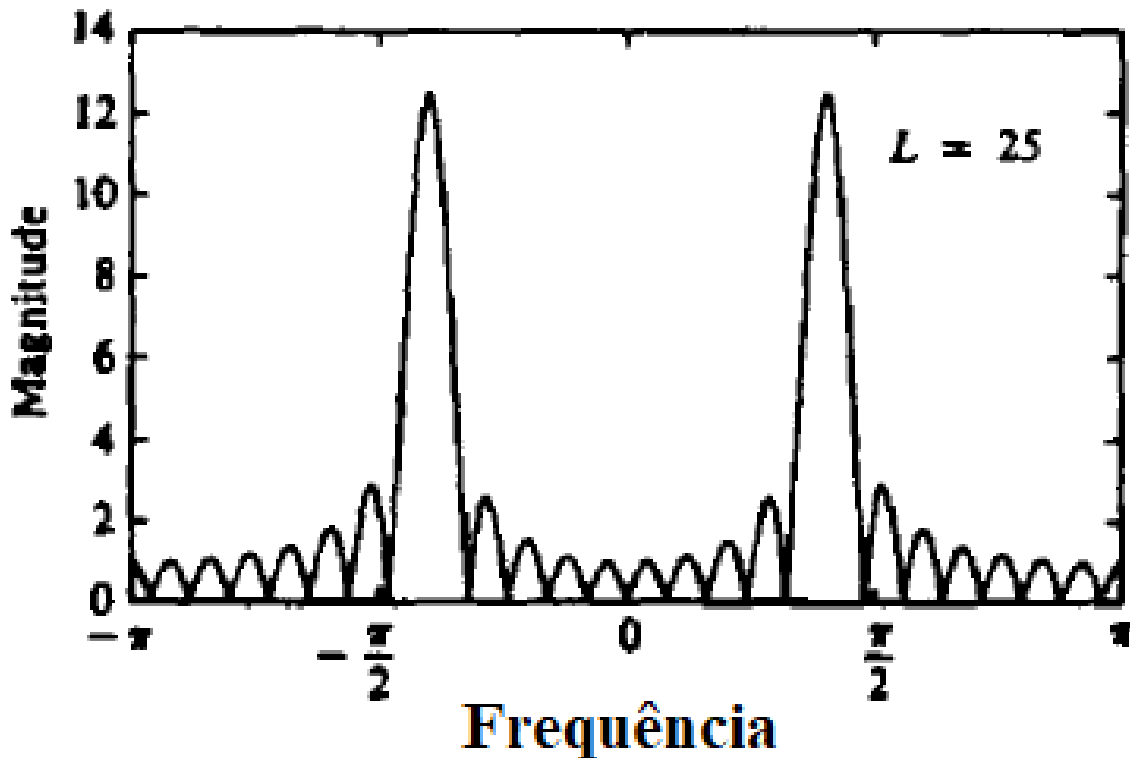


Figura 3.4: Exemplo de vazamento de potência devido a uma transformada de Fourier discreta num sinal de tempo finito. Adaptado de [Proakis and Manolakis 1996].

cipio das simulações de Monte Carlo, espera-se que o valor médio de diversas simulações independentes para cada frequência discreta tenderá ao valor real esperado para aquele ponto contanto que esse valor seja determinístico. Assim, realizar múltiplas simulações e tomar a média do valor para cada ponto incrementa a precisão dos resultados.

Os valores específicos para o número de testes ou para o tempo de simulação não são conhecidos a priori. Para isso, estimou-se os valores para todo o espaço com base nos valores de variância obtidos nas extremidades e no centro do espaço para diversas configurações.

Um outro tratamento feito nos resultados foi passar um filtro passa baixo na frequência. Sabe-se que os resultados para o ganho em função da frequência não possuem oscilações bruscas. Portanto, removeu-se do resultado oscilações altas que decorrem do ruído por meio de um filtro gaussiano. A função utilizada foi a `smoothdata` do software MATLAB, no modo `gaussian` com parâmetro de amaciamento de 0,17. Esse parâmetro foi deixado intencionalmente pequeno, de forma que a função não é tão severamente afetada.

Capítulo 4

Resultados e discussões

Para a suspensão passiva, gerou-se o mapa de respostas de acordo com a tabela (4.1).

Propriedade	Valor
Massa superior	250 kg
Massa inferior	50 kg
Amortecimento mínimo	10^2 Ns/m
Amortecimento máximo	10^5 Ns/m
Rigidez da mola superior mínima	10^3 N/m
Rigidez da mola superior máxima	10^5 N/m
Rigidez da mola inferior	10^5 N/m
Frequência mínima	10^{-4} Hz
Frequência máxima	5000 Hz
Tempo de simulação padrão	600 s
Passo de tempo	10^{-4} s
Resolução de frequência	10^{-4} Hz
Subdivisões dos intervalos de K e C	80
Potência do ruído branco	1 W
Amortecimento máximo semi-ativo	150% de C
Amortecimento mínimo semi-ativo	50% de C

Tabela 4.1: Tabela de valores utilizados na simulação.

Para os valores de massa, escolheu-se valores típicos para automóveis de passeio. Para a rigidez do pneu, tomou-se como referência o trabalho de [Melo 2017]. Para os valores utilizados para determinar a faixa de rigidez e de amortecimento do mapa, foram escolhidos valores que fossem próximos aos valores típicos de automóveis de passeios, mas com maior liberdade para variar e assumir valores razoavelmente altos ou baixos.

4.1 1/4 de veículo

4.1.1 Sistema passivo

Foram realizados testes para averiguar qual configuração de tempo de simulação e número de testes gerava o melhor custo benefício em termos de precisão e tempo computacional.

Para se obter a distribuição de valores, calculou-se cada ponto 66 vezes. Utilizando um teste de Kolmogorov-Smirnov implementado na biblioteca do Software MATLAB, a hipótese de que os valores obtidos estão distribuídos normalmente falhou em ser rejeitada, de forma que podemos assumir que um intervalo de dois desvios padrões corresponde a um intervalo contendo 95% dos pontos da distribuição. Selecionou-se o maior valor para o desvio padrão obtido dentre os 9 pontos sondados para cada caso como o representante do arranjo. Os resultados estão na tabela (4.2).

número

Tempo de simulação	50 s	150 s	600 s
3 valores	33,67 %	17,43 %	13,02 %
7 valores	24,09 %	20,69 %	8,07 %
11 valores	27,22 %	18,13 %	7,53 %
20 valores	23,11 %	18,24 %	7,71 %

Tabela 4.2: Desvios padrões máximos como percentuais da média para um intervalo de confiança de 95% na simulação numérica passiva.

Da tabela, vemos que um bom compromisso é o de utilizar a média de 7 intervalos diferentes com 600 s de tempo de simulação. Portanto, esse será o valor padrão utilizado para as simulações.

O resultado da métrica "RMS" para a solução analítica juntamente com a solução numérica para comparação estão nas figuras (4.1) e (4.2). Para o *Road Holding*, os resultados estão nas figuras (4.3) e (4.4).

A coloração indica o valor relativo dos pontos em cada mapa. A função numérica foi rodada utilizando os parâmetros indicados na tabela (4.1).

É possível perceber que o formato das funções é o mesmo. Porém, o resultado numérico possui contornos menos bem definidos, devido a incerteza introduzida no método numérico.

Assim, o sistema passivo teve os seus resultados validados.

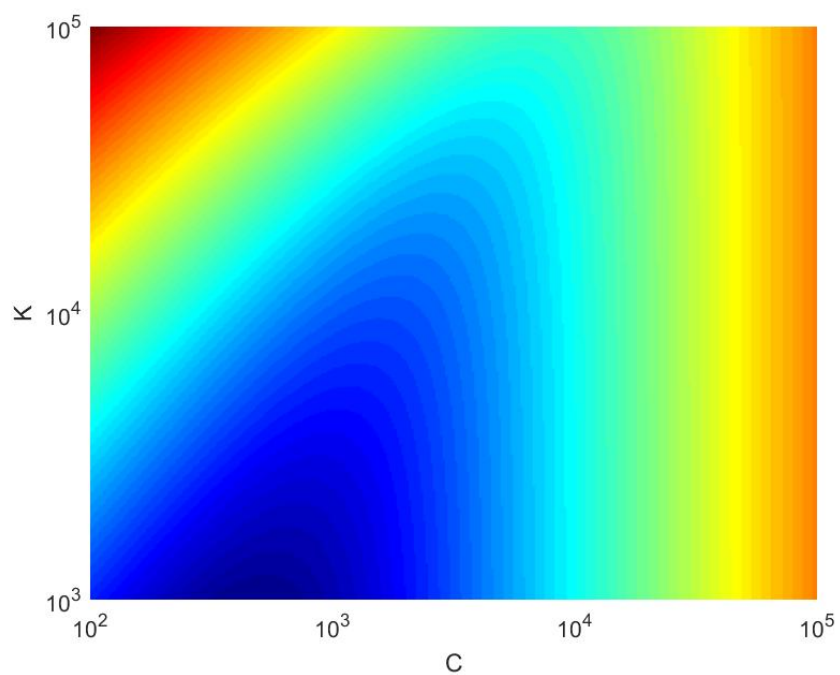


Figura 4.1: Solução analítica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, *Ride RMS*.

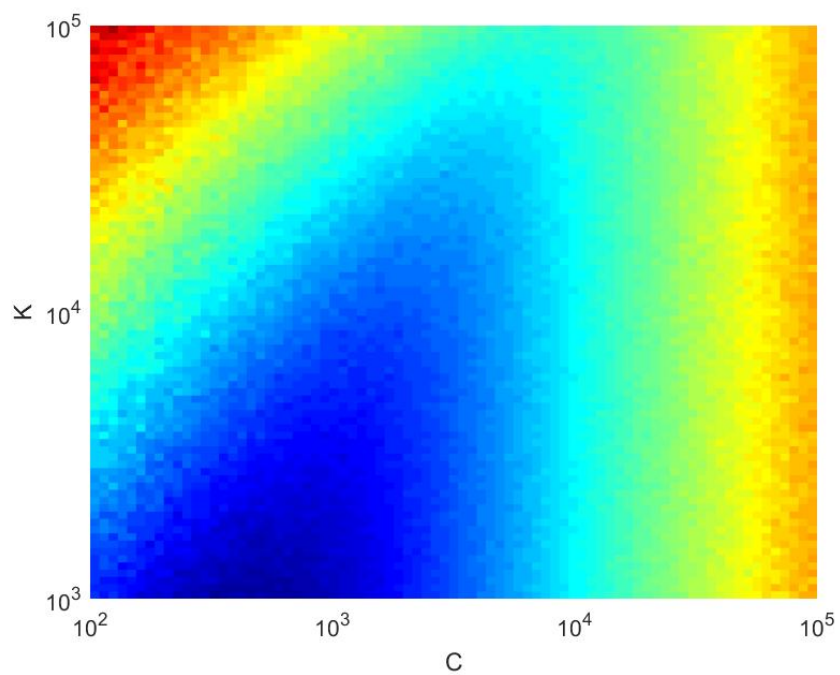


Figura 4.2: Solução numérica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, *Ride RMS*.

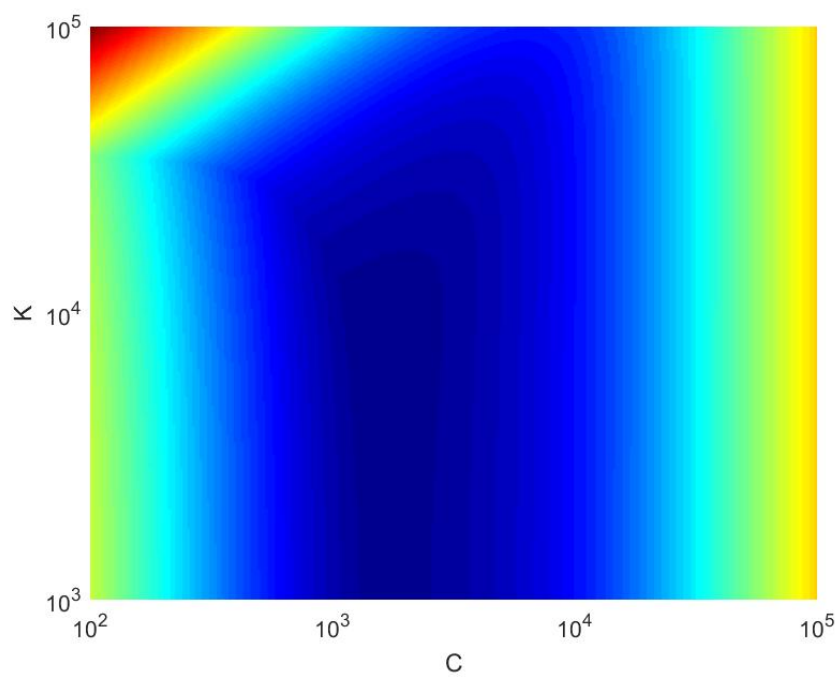


Figura 4.3: Solução analítica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, *Road Holding*.

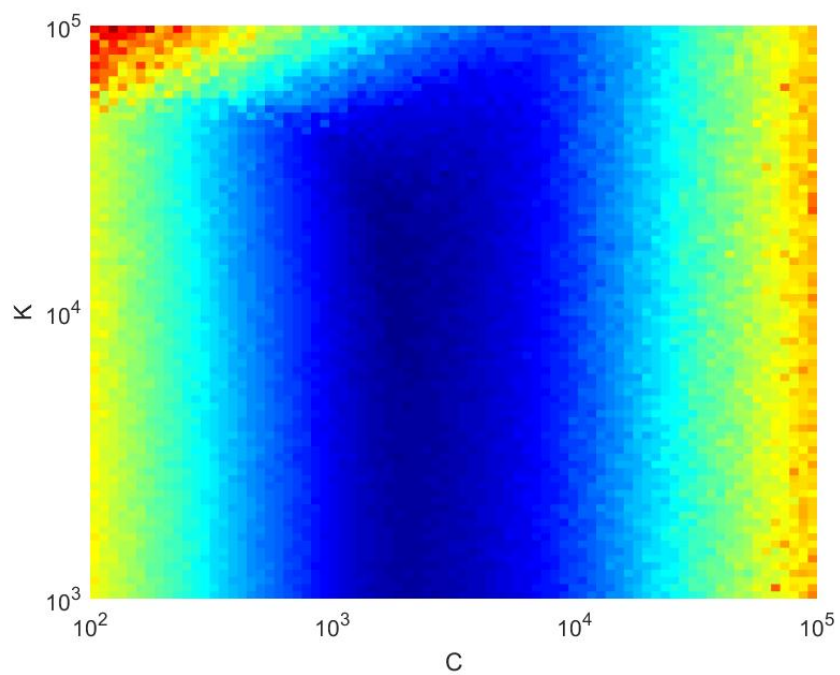


Figura 4.4: Solução numérica dos resultados do sistema passivo, vista de topo, *Road Holding*.

4.1.2 Sistema semi-ativo

Para validar o método numérico empregado na resolução do sistema semi-ativo, utilizou-se os resultados do trabalho de [Melo 2017] como base comparativa. Utilizando os mesmos parâmetros para o veículo que o trabalho, testou-se dois casos: a entrada degrau e a entrada de uma estrada com perfil de uma senoide com frequência 0,5 Hz, ambos com magnitude de 0,02 m. Os resultados estão nas imagens 4.5 e 4.6 e na tabela 4.3.

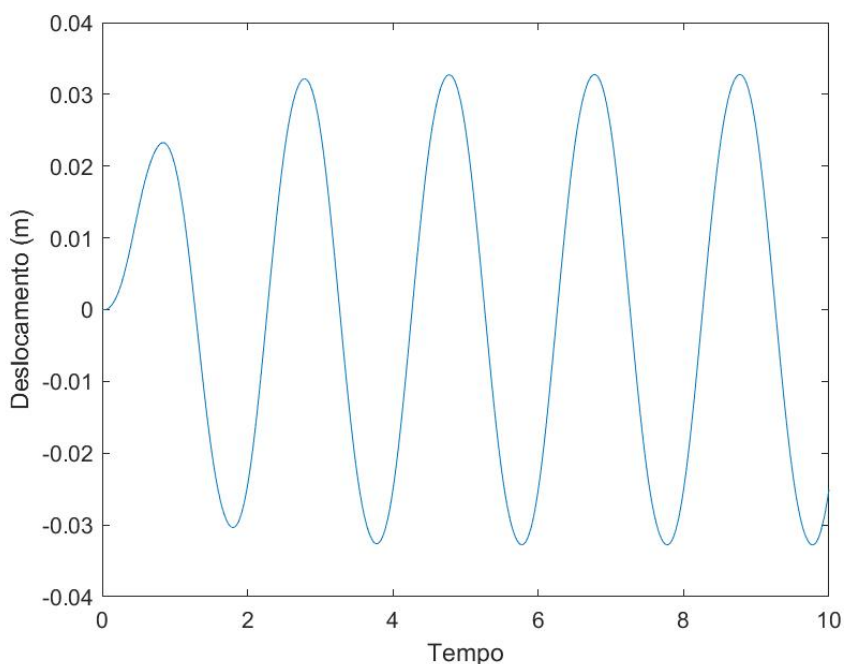


Figura 4.5: Resultados para a entrada de senoide de 0,5 Hz utilizando os mesmos parâmetros que [Melo 2017].

Amplitude máxima	Original	Replica
Degrau	0,026 m	0,026 m
Senoide de 0,5 Hz	0,032 m	0,032 m

Tabela 4.3: Comparação das métricas obtidas para as amplitudes máximas da massa superior no trabalho original de [Melo 2017] e a replica feita nesse trabalho.

Os resultados obtidos foram idênticos, e portanto temos confiança na capacidade do sistema elaborado de resolver numericamente as equações matemáticas propostas.

Para o sistema semi-ativo, utilizou-se os mesmos valores da tabela (4.1). Para verificar se os resultados da tabela (4.2) ainda são validos para o caso semi-ativo, calculou-se o intervalo de dois desvios padrões apenas para o parâmetro escolhido no caso do passivo, de 7 testes com 600s. O sistema com o controle *Groundhook* falhou em obter propriedades adequadas. Com base nos ganhos observados para a tabela (4.2), optou-se por incrementar o tempo de simulação. Isso melhorou os resultados até um patamar considerado razoável. Os resultados estão na tabela (4.4).

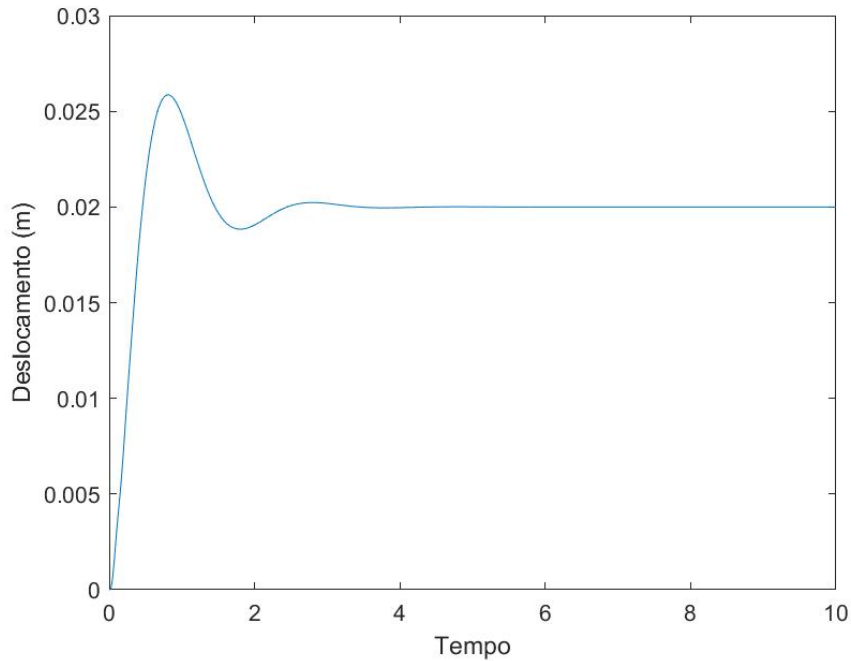


Figura 4.6: Resultados para a função degrau utilizando os mesmos parâmetros que [Melo 2017].

Tipo de controle	600s	1200s
<i>Groundhook</i>	18,14 %	11,30 %
<i>Skyhook</i>	8,14 %	N.D.

Tabela 4.4: Desvios padrões para intervalo de 95% de confiança como porcentagem do valor médio para os controles semi-ativos em função do tempo de simulação.

Para o *Skyhook*, os resultados estão nas imagens (4.7) e (4.8). Para o *Groundhook*, só resultados estão nas imagens (4.9) e (4.10).

A comparação dos resultados passivos com os semi-ativos se encontram na tabela (4.6). Nela, vemos que o *Skyhook* conseguiu bom desempenho no *Ride RMS* e apresentou uma leve redução no *Road Holding*. Por outro lado, o *Groundhook* conseguiu bom desempenho no *Road Holding*, mas não foi capaz de obter um valor de *Ride RMS* em nenhum caso.

Métrica	<i>RMS</i>	<i>Road Holding</i>
Passivo	100%	100%
<i>Skyhook</i>	77,0%	96,9%
<i>Groundhook</i>	520%	86,6%

Tabela 4.5: Ponto de mínimo para cada caso, como porcentagem do mesmo valor no sistema passivo.

Assim, os controles semi-ativos foram bem sucedidos em maximizar suas métricas alvo: *Skyhook* conseguiu obter uma melhora no *Ride RMS*, e o *Groundhook* conseguiu uma melhora no *Road Holding*. Os resultados para o controle *Skyhook* são condizentes com os

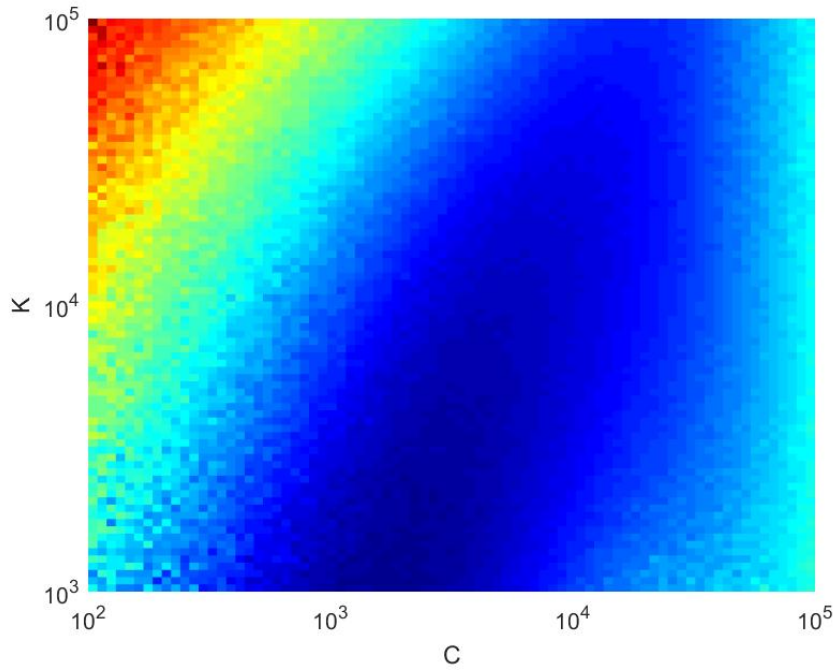


Figura 4.7: Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle *Skyhook*, vista de topo, *Ride RMS*.

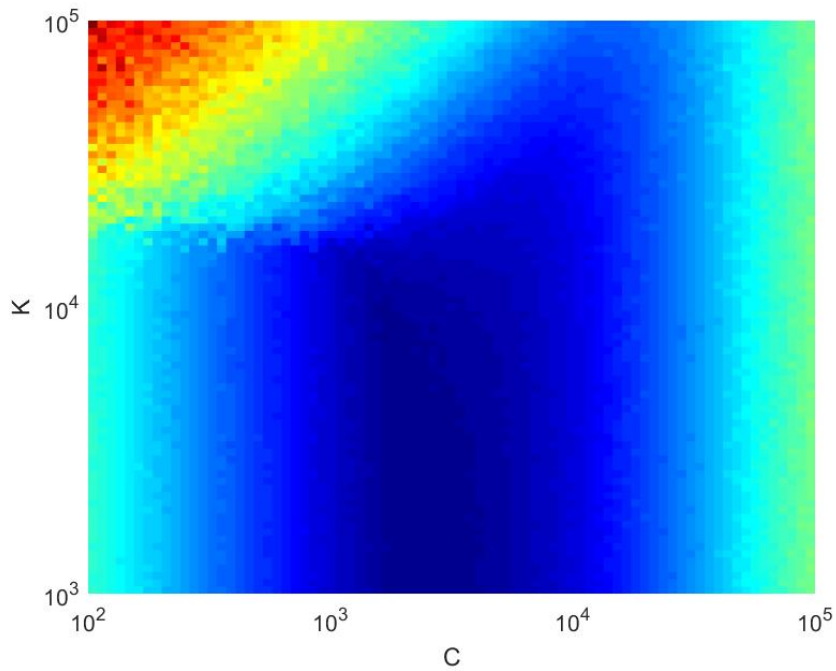


Figura 4.8: Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle *Skyhook*, vista de topo, *Road Holding*.

Métrica	<i>Ride RMS</i>		<i>Road holding</i>	
<i>Skyhook</i>	K: 3360	C: 100	K: 8858	C: 7847
<i>Groundhook</i>	K: 5455	C: 100	K: 9712	C: 6092

Tabela 4.6: Posição do mínimo da tabela 4.6 em cada caso.

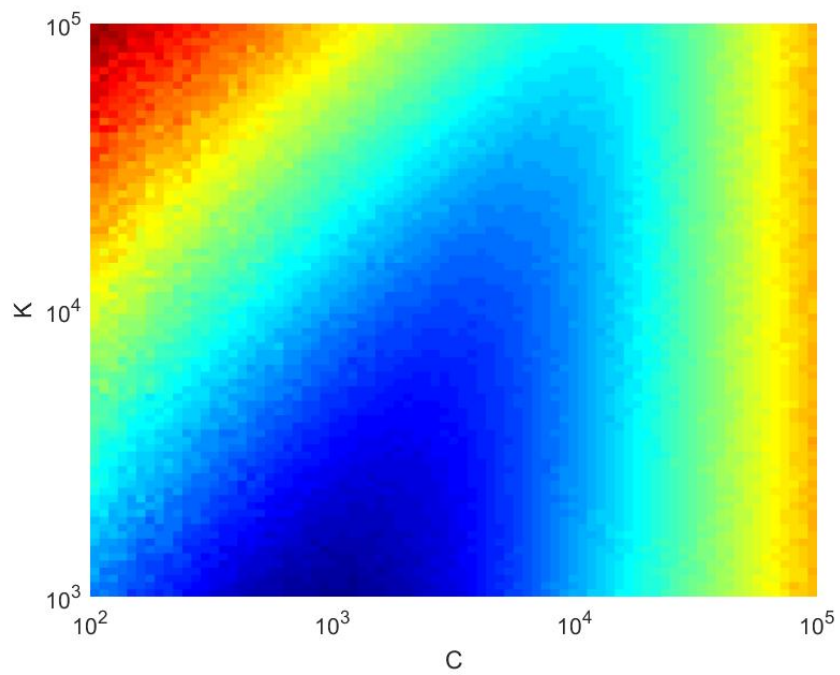


Figura 4.9: Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle *Groundhook*, vista de topo, *Ride RMS*.

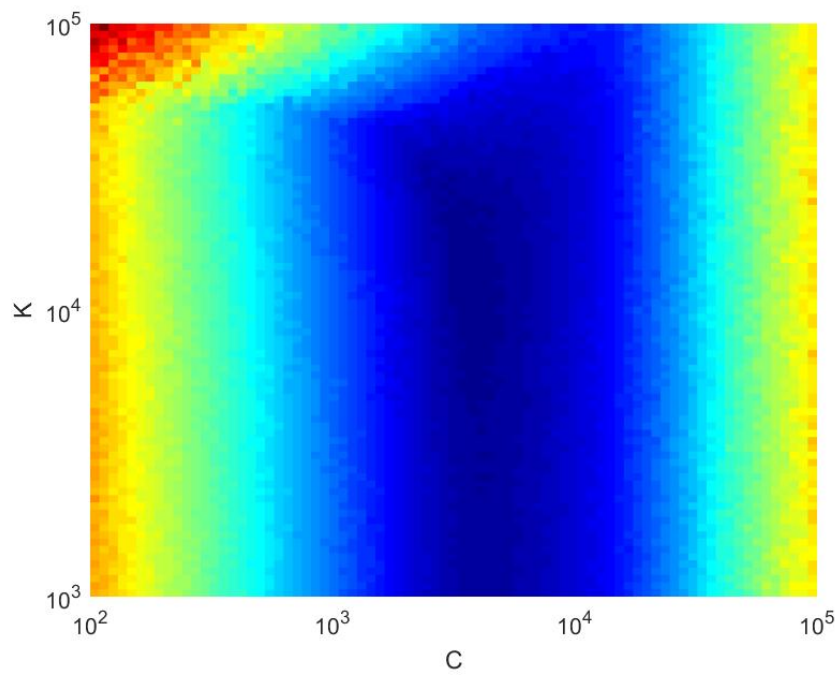


Figura 4.10: Solução numérica dos resultados do sistema semi-ativo com controle *Groundhook*, vista de topo, *Road Holding*.

obtidos em [Chen et al. 2014] e [Li et al. 2021], onde uma redução para a ordem de 75% do valor passivo foi obtido.

No caso da métrica *Ride RMS*, o ponto de mínimo tendeu a ficar na borda da região analisada, sugerindo que o mínimo ocorre fora dela. Porém, ao estender o espaço, é observado que a métrica busca sempre reduzir o valor de C e K, e não foi possível identificar um ponto de mínimo real para ela. Portanto, considerando todo o espaço observado, o limitante para a métrica *Ride RMS* é qual o menor valor que K e C podem assumir.

Para a métrica *Road Holding*, um mínimo foi identificado aproximadamente no centro do espaço procurado para os dois métodos de controle semi-ativos. Assim, mostra-se que é possível otimizar os valores de rigidez de mola e coeficiente de amortecimento de forma a obter um valor de mínimo definitivo.

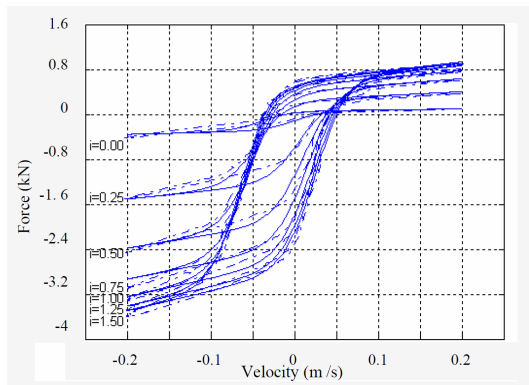
4.1.3 Validação do modelo do amortecimento magneto-reológico

Para validar o sistema magneto-reológico, utilizou-se os dados do sistema de [Wang et al. 2004]. Validou-se com o caso assimétrico, devido aos dados para validação estarem disponíveis em tal caso. Os valores utilizados para as constantes estão na tabela (4.7).

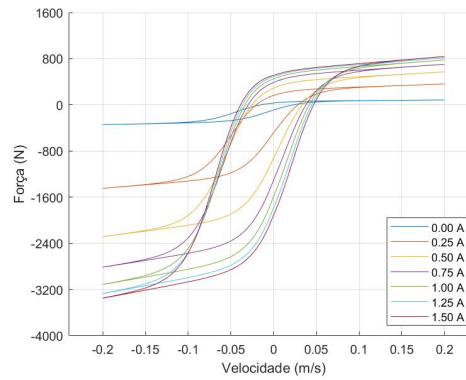
Constante	Valor	Constante	Valor
a_0 (adm)	1300	k_0 (adm)	112.5
a_1 (m/s) ⁻¹	1.75	k_{1c} (adm)	2.5
a_2 (amp) ⁻¹	2.85	k_{1e} (adm)	5.2
a_3 (amp) ⁻¹	1.55	k_2 (adm)	19.4
a_4 (m/s) ⁻¹	4.60	k_3 (adm)	2.90
I_0 (amp)	0.05	k_4 (adm)	0.095
I_1 (amp)	0.08	k_5 (adm)	0.65
f_0 (N)	71.6	k_6 (adm)	0.12

Tabela 4.7: Dados das constantes do amortecedor magneto-reológico assimétrico de [Wang et al. 2004].

Ademais, para reproduzir os resultados, utilizou-se como entrada uma função seno tal que a velocidade máxima fosse 0,2 m/s e a frequência de entrada fosse 0,5 Hz. A frequência de entrada não foi bem definida, mas não se notou mudanças perceptíveis nos resultados com base na frequência após um período longo o suficiente. Os resultados estão na figura (4.11).



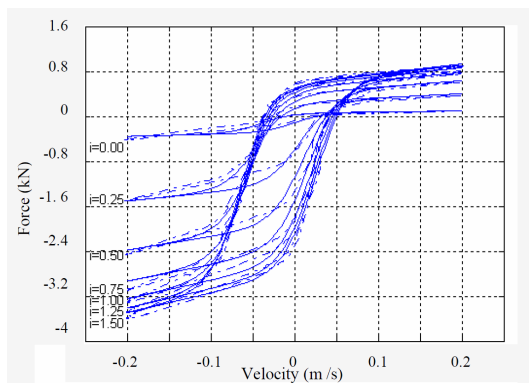
((a)) Original



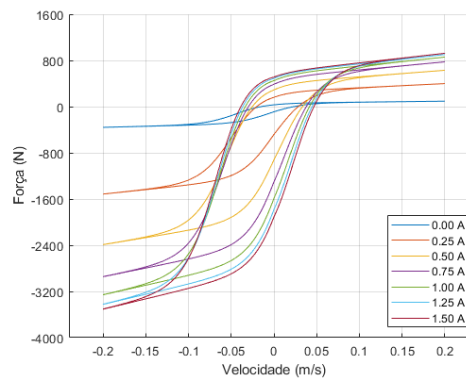
((b)) Reprodução

Figura 4.11: Resultados do amortecimento utilizando os dados de [Wang et al. 2004].

Observa-se que os resultados não batem com os esperados, mesmo que o formato das funções gerais seja o mesmo. Percebeu-se que a diferença originava nos limites das funções, e que ao se alterar as constantes de assimetria k_{1c} e k_{1e} poderia-se controlar esses limites. Utilizando os valores de k_{1c} como 7 e k_{1e} como 3,2, conseguiu-se reproduzir os valores esperados da função. Os resultados estão na figura (4.12).



((a)) Original



((b)) Reprodução

Figura 4.12: Resultados do amortecimento utilizando os dados de [Wang et al. 2004], com alterações em k_{1e} e k_{1c} .

Assim, sabe-se que os resultados estão coerentes, mas com inconsistência nas constantes. Decidiu-se utilizar as constantes originais, e os resultados obtidos serão baseados nas propriedades obtidas com elas.

4.1.4 Efeitos do sistema magneto-reológico

Para analisar os efeitos do sistema magneto-reológico, utilizou-se um sistema com as mesmas configurações de [Wang et al. 2004]. O motivo foi aproximar o sistema de um com configurações selecionadas como razoáveis. A exceção é que, no artigo, o amortecimento

foi multiplicado por 3, enquanto isso não foi feito no sistema do presente trabalho. Os dados se encontram na tabela (4.8).

Propriedade	Valor
Massa superior	288,9 kg
Massa inferior	28,58 kg
Rigidez da mola superior	19,96 kN/m
Rigidez da mola inferior	155,9 kN/m
Amortecimento do sistema passivo	200 N.s/m
Frequência mínima	10^{-4} Hz
Frequência máxima	5000 Hz
Tempo de simulação padrão	600 s
Passo de tempo	$5 * 10^{-4}$ s ou 10^{-4} s
Resolução de frequência	10^{-4} Hz
Potência do ruído branco	1 W
Corrente de amortecimento mínima	0 A
Corrente de amortecimento máxima	100 A
Magnitude da entrada de pista	10^{-3}
Amortecimento máximo semi-ativo tradicional	150% de C
Amortecimento mínimo semi-ativo tradicional	50% de C

Tabela 4.8: Tabela de valores utilizados na simulação.

Para os amortecedores magneto-reológicos, os valores de corrente são utilizados em lugar dos limites de amortecimento percentuais. A corrente mínima é o caso de menor resistência, onde não é possível reduzir mais o amortecimento para as condições de velocidade. A corrente máxima foi selecionada como um valor alto o suficiente para atingir os limites de ganho de amortecimento em função da corrente para esse amortecedor, assim garantido que a resposta obtida tem suas limitações em função do esquema de controle utilizado e não da corrente insuficiente. Isso é semelhante a metodologia utilizada em [Zhang et al. 2013].

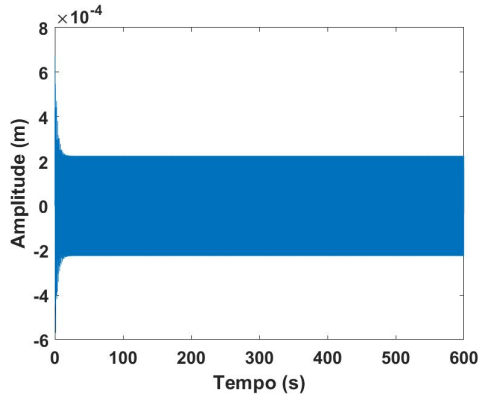
Um elemento importante a ser notado é que o artigo de [Wang et al. 2004] não obteve seus coeficientes em correntes superiores a 1,5 A, de forma que o comportamento real do amortecedor nesses níveis de corrente será muito provavelmente diferente do obtido. Porém, o objetivo do limite de corrente escolhido não foi modelar o comportamento em altas correntes, mas apenas obter o comportamento de limite quando uma alta corrente é aplicada nesse modelo. Averiguou-se que o comportamento de 5 A e 100 A é efetivamente igual, e portanto apenas 100 A garante o comportamento limite.

Analisou-se 3 casos: uma entrada senoidal de 3 Hz, uma função de degrau e uma função de ruído branco. Para cada caso, testou-se 4 situações: Um sistema com amortecimento passivo, um sistema com amortecimento MR sem corrente ou esquema controle, um sistema MR com controle Skyhook e um sistema MR com controle Groundhook.

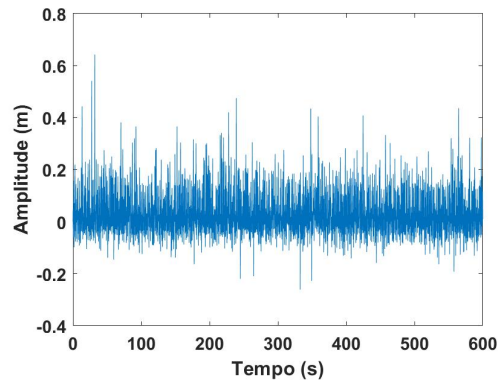
Todos os resultados demonstrados serão para a vibração na massa suspensa.

4.1.4.1 Resultados função senoidal

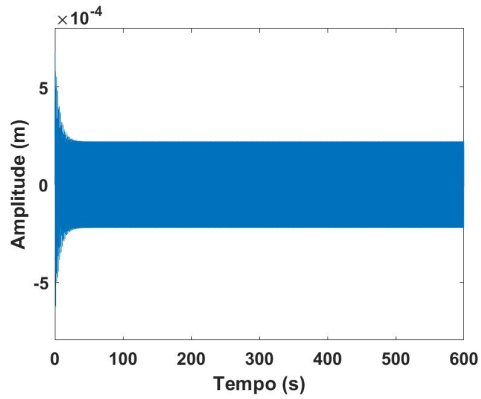
Os resultados estão nas figuras (4.13), (4.14) e (4.15). Os resultados em (4.13) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos, (4.14) mostra os resultados da oscilação nos primeiros 5 segundos, e (4.15) mostra os resultados no domínio da frequência.



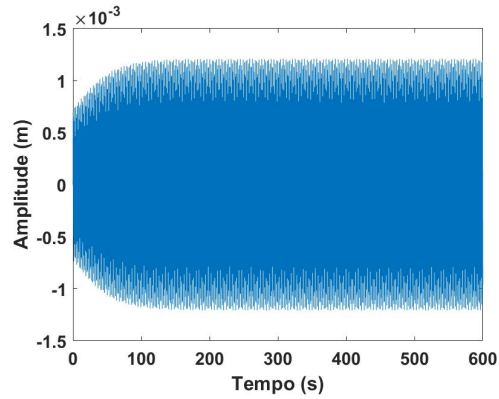
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle

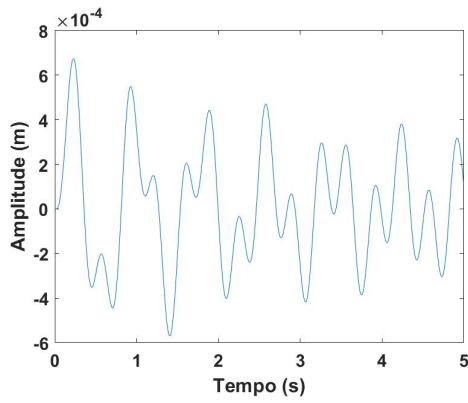


((c)) MR com controle Skyhook

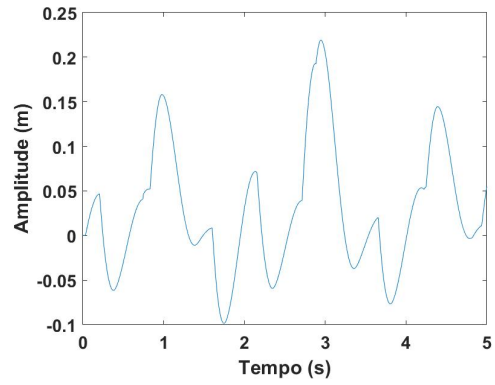


((d)) MR com controle Groundhook

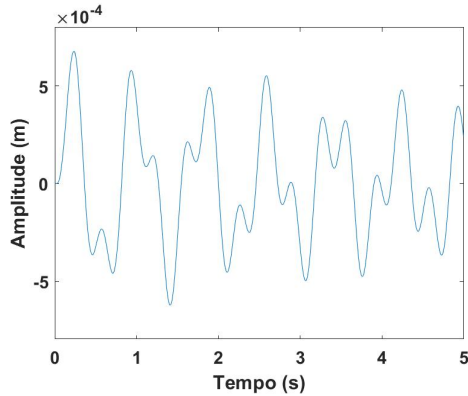
Figura 4.13: Resultados da entrada senoidal.



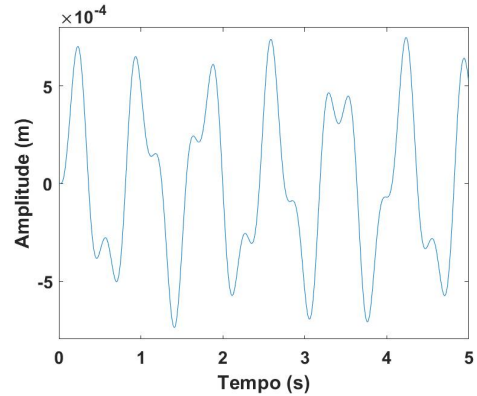
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle



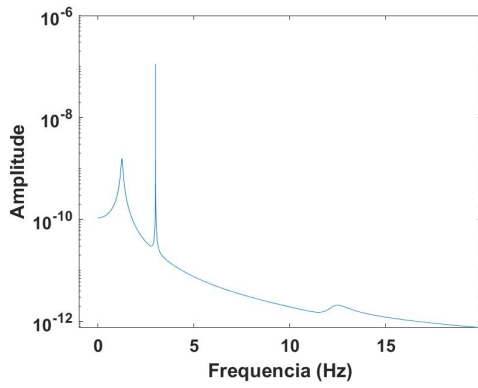
((c)) MR com controle Skyhook



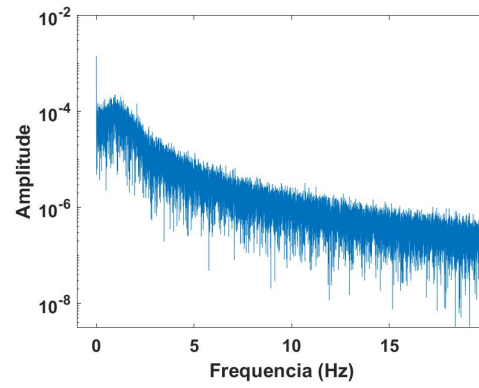
((d)) MR com controle Groundhook

Figura 4.14: Resultados da entrada senoidal, zoom nos primeiros segundos.

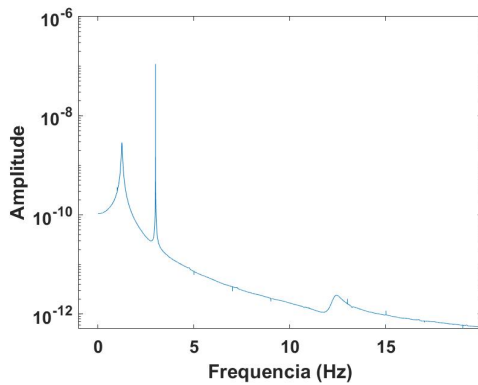
Os resultados mostram duas coisas. A primeira é que o sistema magneto-reológico tem um desempenho ruim, possuindo picos de grande magnitude. O segundo é os sistemas com amortecimento MR apresentaram comportamento caótico, com grandes oscilações e dificuldade em convergir. Eles apresentam oscilação em torno de um valor diferente de 0, como esperado por [Wang et al. 2004] para sistemas de amortecimento MR com valores assimétricos.



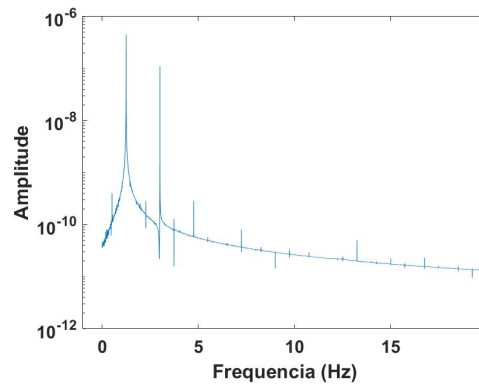
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle



((c)) MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Groundhook

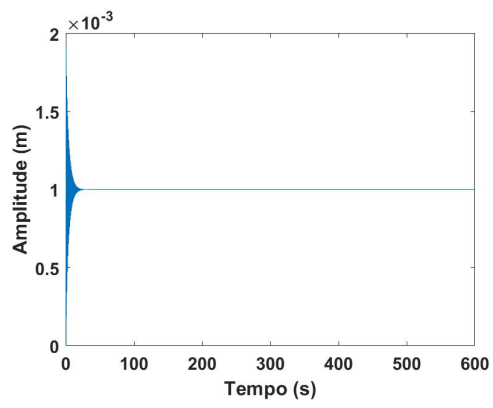
Figura 4.15: Resultados da entrada senoidal no domínio da frequência.

Analisando o espectro, vê-se que o desempenho dos sistemas MR com esquema de controle foi muito semelhante. O sistema MR sem esquema de controle foi a exceção, tendo desempenho muito pior que os outros dois. O sistema Groundhook apresentou pico diferente do Skyhook e passivo.

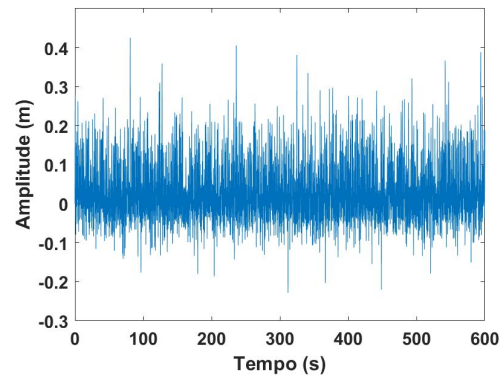
Uma parte de difícil observação visual, mas presente, é um pico em torno de 1,25 Hz de frequência. Ele se faz presente no sistema passivo. Essa frequência é associada a vibração natural do veículo.

4.1.4.2 Resultados função de degrau

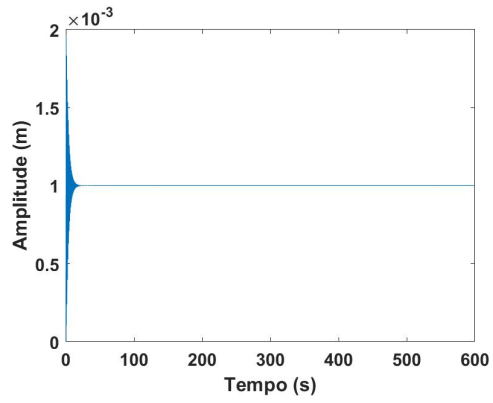
Os resultados estão nas figuras (4.16), (4.17) e (4.18). Os resultados em (4.16) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos, (4.17) mostra os resultados da oscilação nos primeiros 5 segundos, e (4.18) mostra os resultados no domínio da frequência.



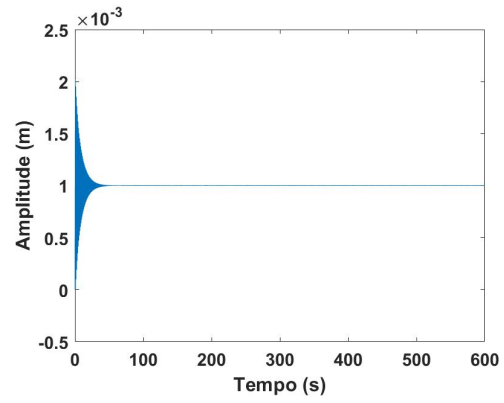
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle

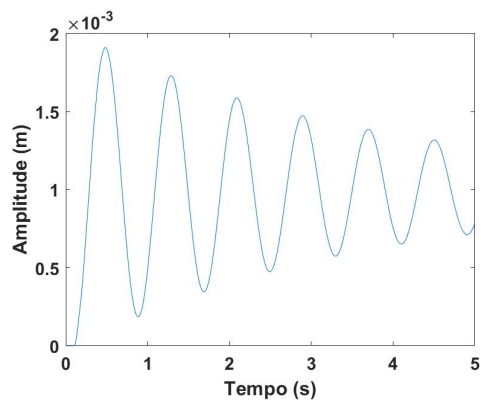


((c)) MR com controle Skyhook

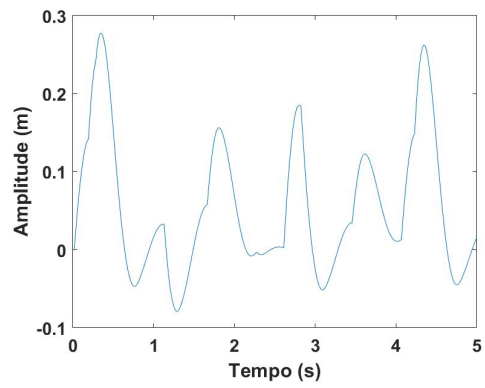


((d)) MR com controle Groundhook

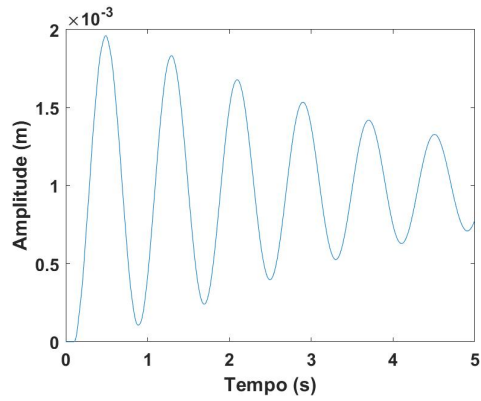
Figura 4.16: Resultados da entrada step.



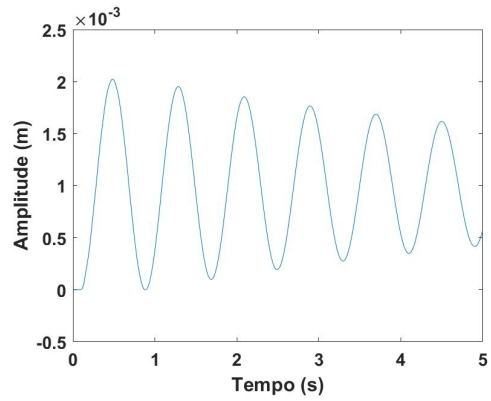
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle



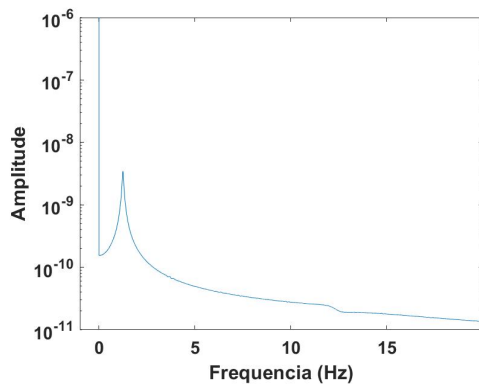
((c)) MR com controle Skyhook



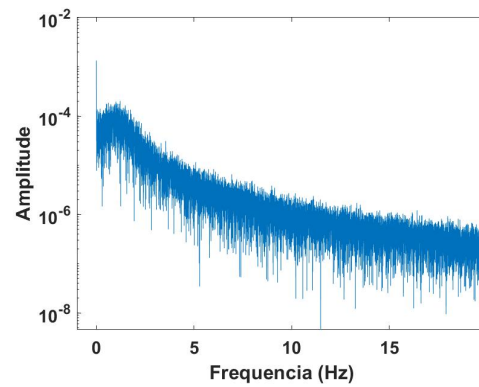
((d)) MR com controle Groundhook

Figura 4.17: Resultados da entrada step.

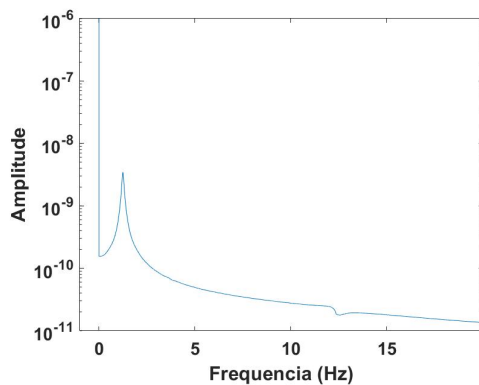
Nesse caso da entrada step, fenômenos semelhantes aos observados na função senoidal se mostram. .



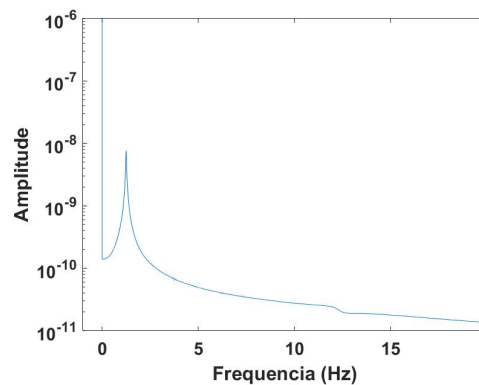
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle



((c)) MR com controle Skyhook



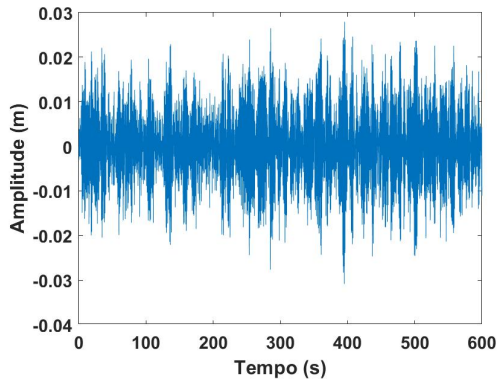
((d)) MR com controle Groundhook

Figura 4.18: Resultados da entrada step.

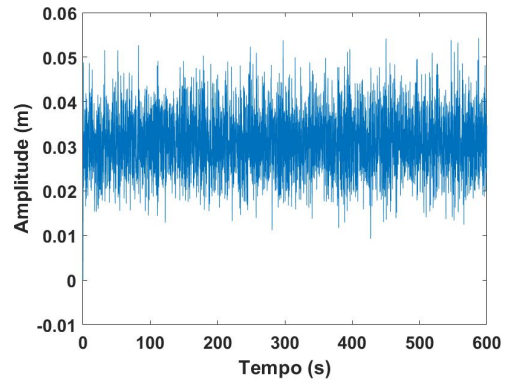
Todos os 4 sistemas tiveram sua oscilação em torno da frequência mínima captada pela transformada. Porém, o desempenho do sistema passivo foi muito superior ao dos sistemas com amortecimento semi-ativo, apresentando uma vibração significativamente menor.

4.1.4.3 Resultados ruído branco

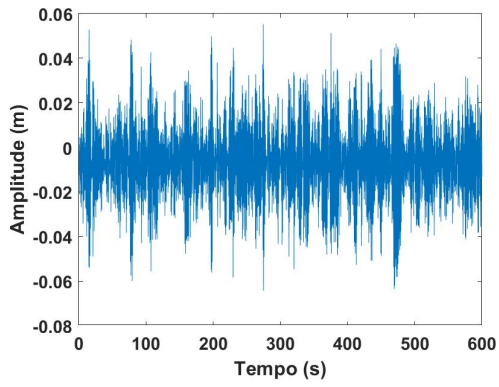
Os resultados estão nas figuras (4.19) e (4.20). Os resultados em (4.19) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos e (4.20) mostra os resultados no domínio da frequência.



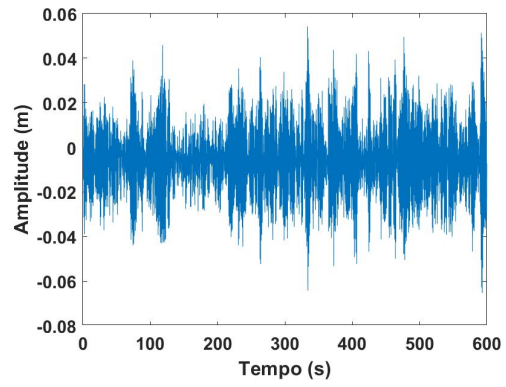
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle

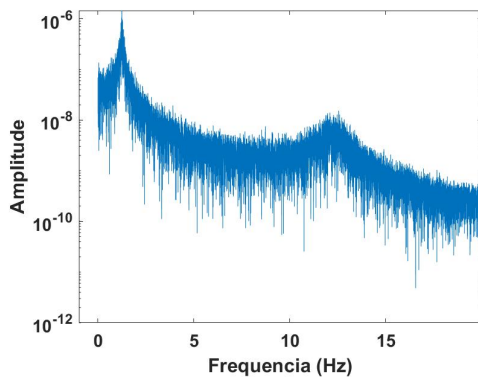


((c)) MR com controle Skyhook

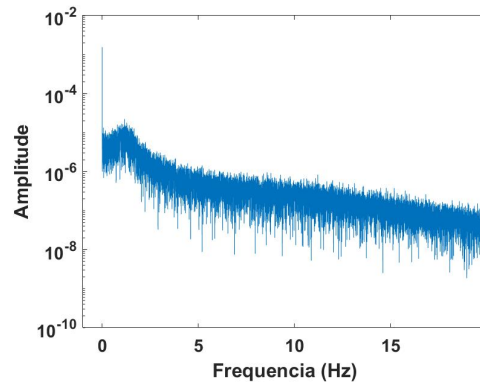


((d)) MR com controle Groundhook

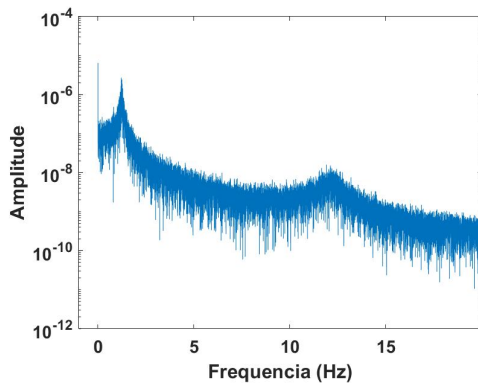
Figura 4.19: Resultados da entrada de ruído branco.



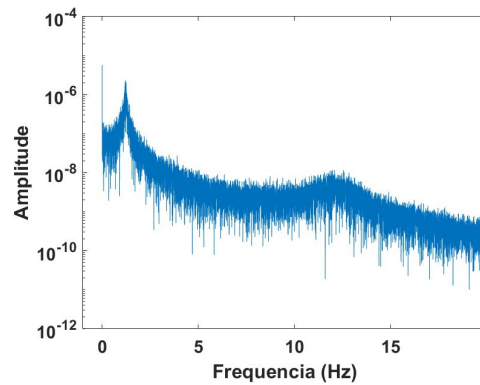
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



((b)) MR sem esquema de controle



((c)) MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Groundhook

Figura 4.20: Resultados da entrada de ruído branco.

O ruído branco apresentou resultados visualmente semelhantes para os 4 sistemas. O sistema passivo apresentou uma vibração na faixa de 13 Hz bem pronunciada. Os sistemas MR apresentaram grande pico na menor frequência disponível.

4.2 1/2 de veículo

Para o meio veículo, utilizou-se dados semelhantes aos do caso do amortecedor magneto-reológico. Isso foi feito para que fosse possível comparar os resultados dos controles Skyhook e Groundhook com e sem os efeitos magneto-reológicos. Os valores utilizados se encontram na tabela (4.9).

Propriedade	Valor
Massa superior	577,8 kg
Massas inferiores	28,58 kg
Momento de inércia da carroceria	277,34
Amortecimento do sistema passivo	200 N.s/m
Rigidez das molas superiores	19,96 kN/m
Rigidez das molas inferiores	155,9 kN/m
Distância do eixo traseiro ao CG	1,1 m
Distância do eixo frontal ao CG	0,9 m
Frequência mínima	10^{-4} Hz
Frequência máxima	5000 Hz
Tempo de simulação padrão	600 s
Passo de tempo	$5 * 10^{-4}$ s ou 10^{-4} s
Resolução de frequência	10^{-4} Hz
Potência do ruído branco	1 W
Corrente de amortecimento mínima	0 A
Corrente de amortecimento máxima	100 A
Amortecimento máximo semi-ativo tradicional	150% de C
Amortecimento mínimo semi-ativo tradicional	50% de C

Tabela 4.9: Tabela de valores utilizados na simulação.

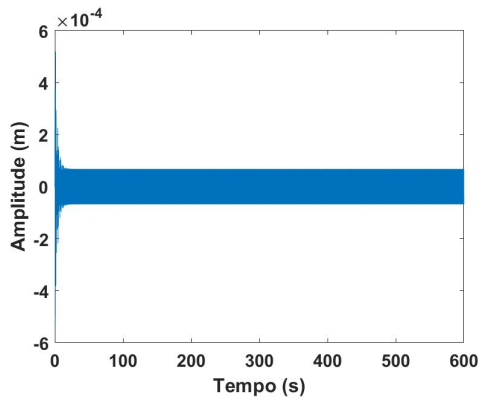
Para obter o momento de inércia da carroceria, que não se fazia presente no artigo original de [Wang et al. 2004], utilizou-se o artigo de [de Lima et al. 2012] para obter a razão da massa suspensão com o momento de inercia da carroceria, e utilizou-se essa relação para obter obter o valor equivalente para esse sistema. A distância dos eixos ao CG também foi definida com base nos dados de [de Lima et al. 2012], utilizando a relação dada por ser um valor razoável de acordo com os valores obtidos no sistema.

As propriedades dos componentes do carro foram tomadas simétricas. Isso não é necessariamente a única configuração razoável, com [Wei and Taghavifar 2017] utilizando um carro que possui distâncias simétricas ao CG mas propriedades de amortecimento e rigidez de mola assimétricas. A escolha de assimetria foi feita para simplificar o problema, reduzindo a quantidade de escolhas que precisam ser tomadas quanto as razões entre as propriedades frontais e traseiras.

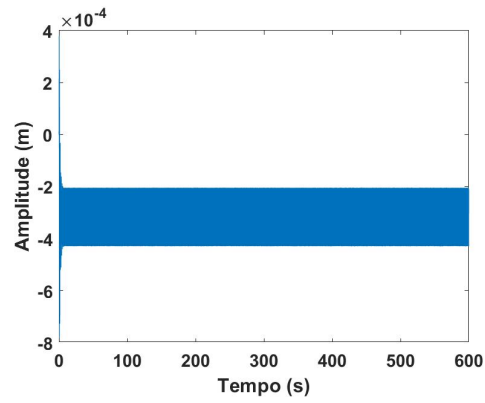
4.2.0.1 Resultados função senoidal

Os resultados para o salto estão nas figuras (4.21), (4.22) e (4.23). Os resultados em (4.21) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos, (4.22) mostra os resultados da oscilação nos primeiros 5 segundos, e (4.23) mostra os resultados no domínio da frequência.

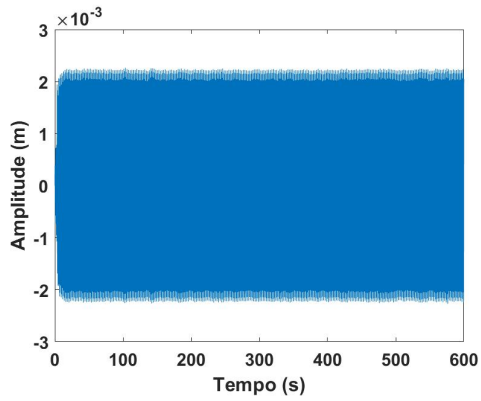
Os resultados para a arfagem estão nas figuras (4.26), (4.27) e (4.28). Os resultados em (4.26) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos, (4.27) mostra os resultados da oscilação nos primeiros 5 segundos, e (4.28) mostra os resultados no domínio da frequência.



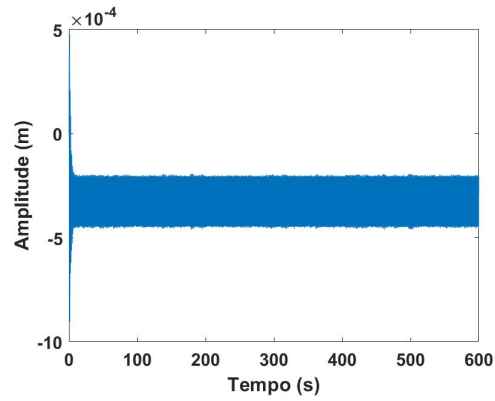
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



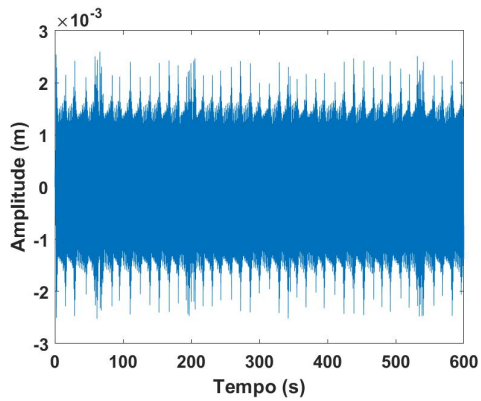
((b)) MR sem esquema de controle



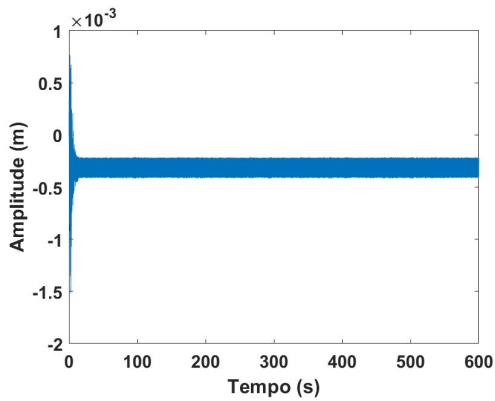
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



((e)) Não MR com controle Groundhook



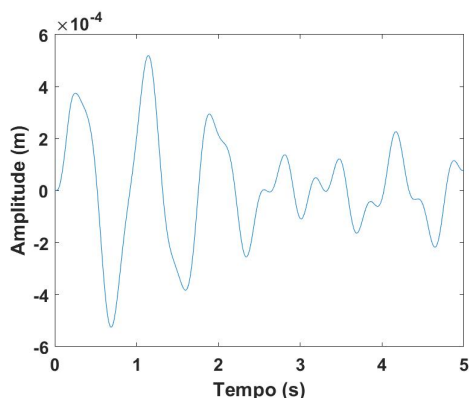
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.21: Resultados da entrada senoidal para a salto.

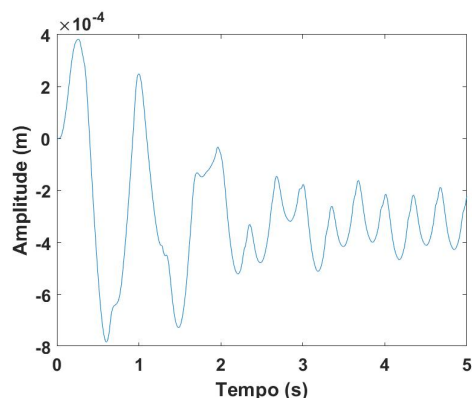
Nos sistemas com amortecimento tradicional, o sistema Groundhook apresentou oscilações semelhantes ao do Skyhook em magnitude, mas teve um maior amplitude entre seus mínimos e máximos. Ambos os sistemas apresentaram oscilações de magnitude máxima maior que o passivo sem esquema de controle. É possível dizer que o Skyhook atingiu um regime permanente, enquanto o Groundhook atingiu um regime muito semelhante ao permanente, mas não exatamente, devido a presença de oscilações não periódicas. É possível que, se analisado num intervalo de tempo maior, um período pudesse ser identificado para essas oscilações.

Nos sistemas com amortecimento MR, apresentou-se uma oscilação em torno de um

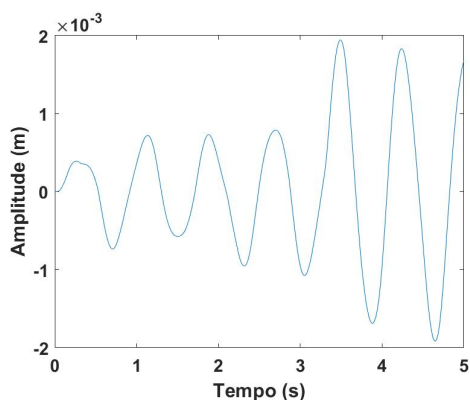
valor diferente de 0 para todos os casos. Isso está em linha com o esperado para um sistema com forças assimétricas em relação ao deslocamento.



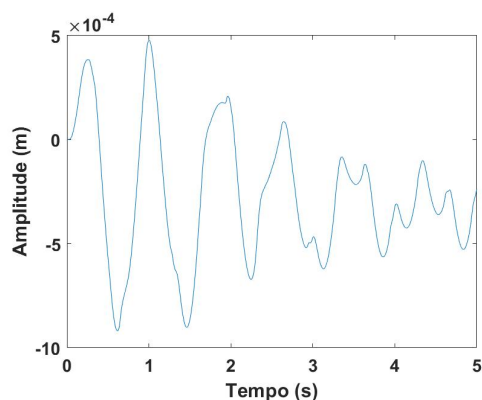
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



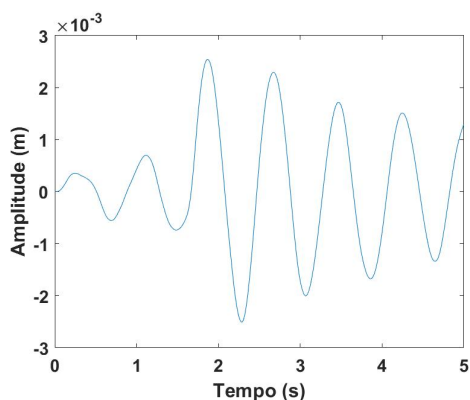
((b)) MR sem esquema de controle



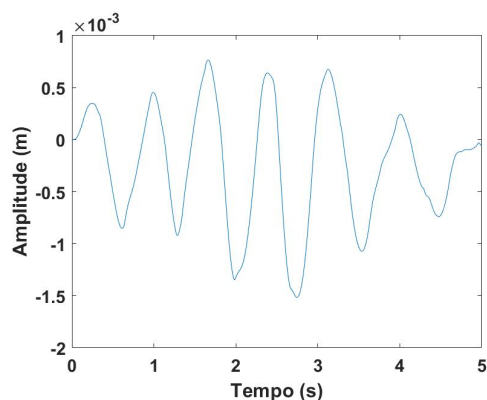
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



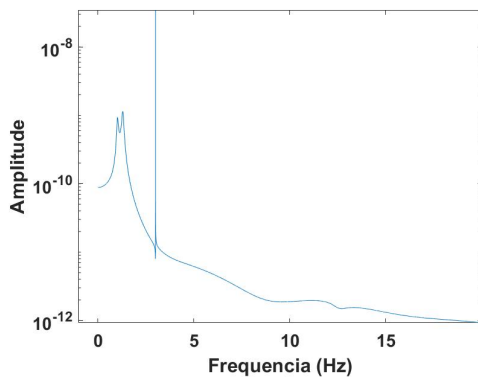
((e)) Não MR com controle Groundhook



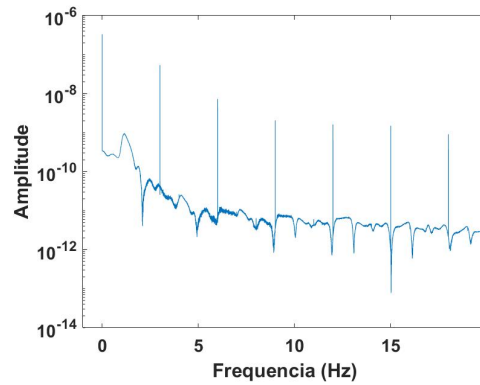
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.22: Resultados da entrada senoidal para a salto, zoom nos primeiros segundos.

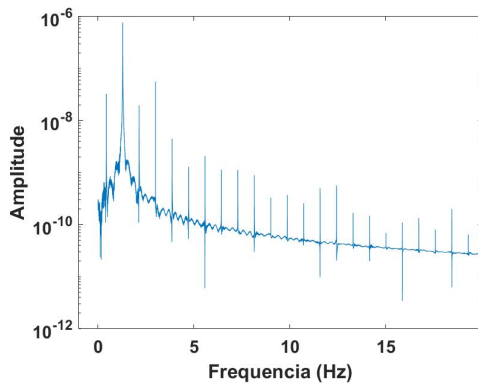
Olhando as oscilações de perto, é possível ver que os sistemas MR apresentam oscilações de alta frequência e baixa amplitude num grau muito superior aos sistemas de amortecimento tradicional. Além disso, é observado que nesse intervalo de tempo curto os sistemas MR já passaram a oscilar em torno do valor central deslocado.



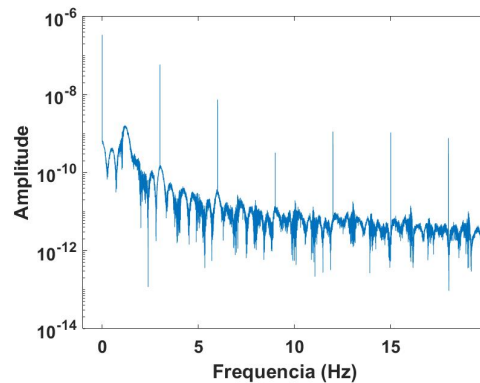
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



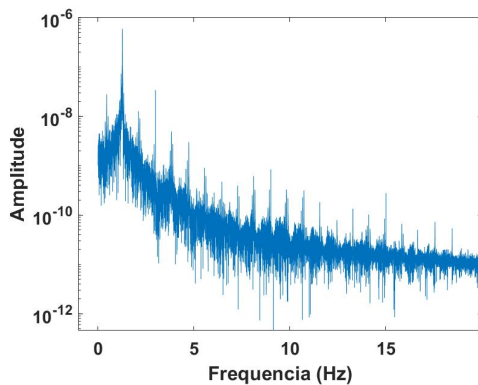
((b)) MR sem esquema de controle



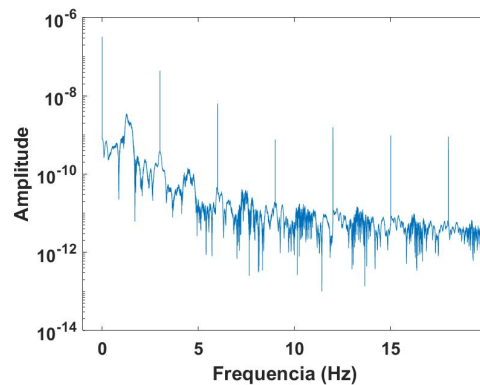
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



((e)) Não MR com controle Groundhook



((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.23: Resultados da entrada senoidal para a salto no domínio da frequência.

Analisando o espectro, vê-se que tanto para os sistemas de amortecimento tradicional quanto para os de MR, o menor pico ocorreu no sistema Groundhook, com o sistema Skyhook tendo desempenho intermediário o sistema passivo tendo o pior desempenho entre os 3. Esses resultados são coerentes com os observados no domínio do tempo, e demonstram uma comportamento não usual: o sistema Groundhook apresenta melhor desempenho que o sistema Skyhook no controle de vibrações do CG da carroceria.

Para os sistemas de amortecimento tradicional, foi observado um pico em torno de 3 Hz, como esperado, e um pico em torno de 1 Hz. O pico em torno de 1 Hz foi muito mais pronunciado para os sistemas com controle semi-ativo, com o pico de 3 Hz sendo significa-

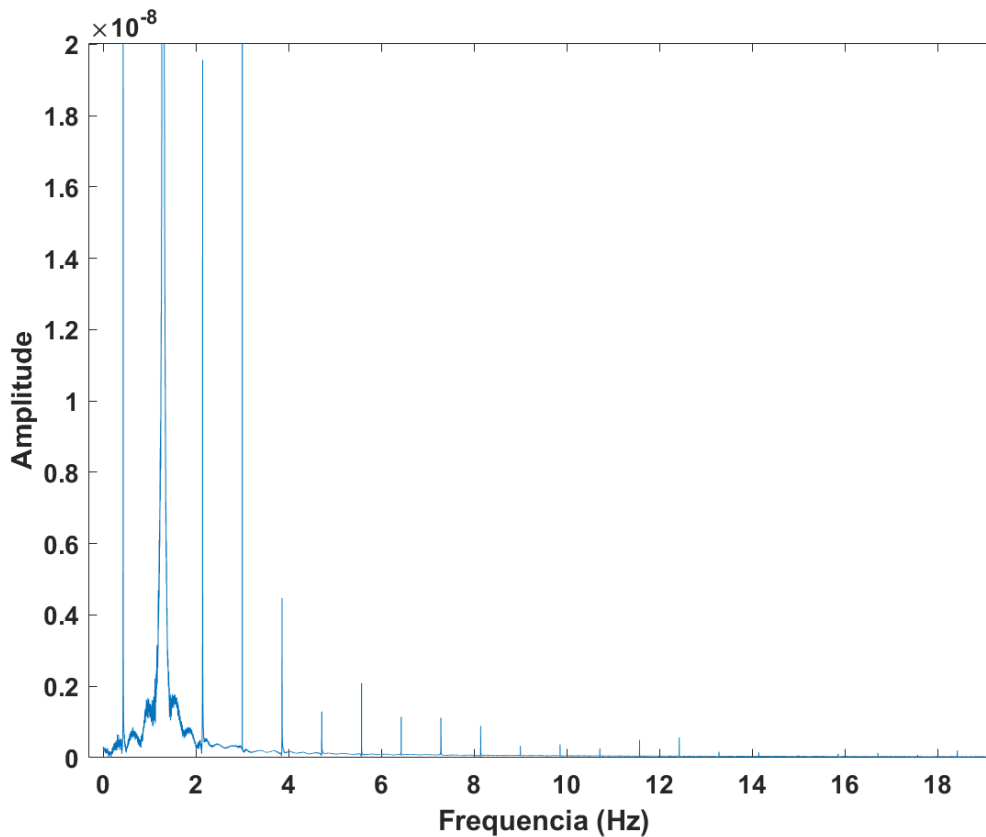


Figura 4.24: Figura da resposta em frequência do sistema tradicional com controle Skyhook, ampliação no eixo y.

tivamente minimizado. Além disso, o sistema Groundhook com amortecimento tradicional apresentou uma maior dispersão de sua resposta comparado aos outros sistemas. Também observou-se muitas frequências intermediárias ocorrendo com amplitudes muito menores, como na figura (4.24). Não foi percebida qual a relação entre as frequências de pico e a frequência de entrada.

Para os sistemas de amortecimento MR, foi observado um grande pico perto de 0, estando localizados na menor frequência captada pelo processo matemático empregado. Observou-se o pico em torno de 1 Hz, mas ele está muito menor que nos modelos comparativos. O pico em torno de 3 Hz foi observado, mas ele se mostrou menor, tal como nos sistemas de amortecimento tradicionais. Ademais, foram observados picos em torno de frequências múltiplas de 3 Hz, como demonstrado na figura (4.25).

Esse fenômeno foi observado em todos os casos de amortecimento MR, com a diferença sendo na resposta para cada frequência: o sistema sem esquema de controle apresentou um decaimento gradual de ganho para as frequências maiores, enquanto os sistemas semi-ativos apresentaram um pico mínimo em 9 Hz.

A análise da rotação foi feita. Como no caso do CG da carroceria, a oscilação angular foi em torno de um ângulo diferente do neutro. Isso não é tão esperado para a métrica de arfagem, mas os resultados indicam que o sistema MR gera um ângulo de repouso não neutro

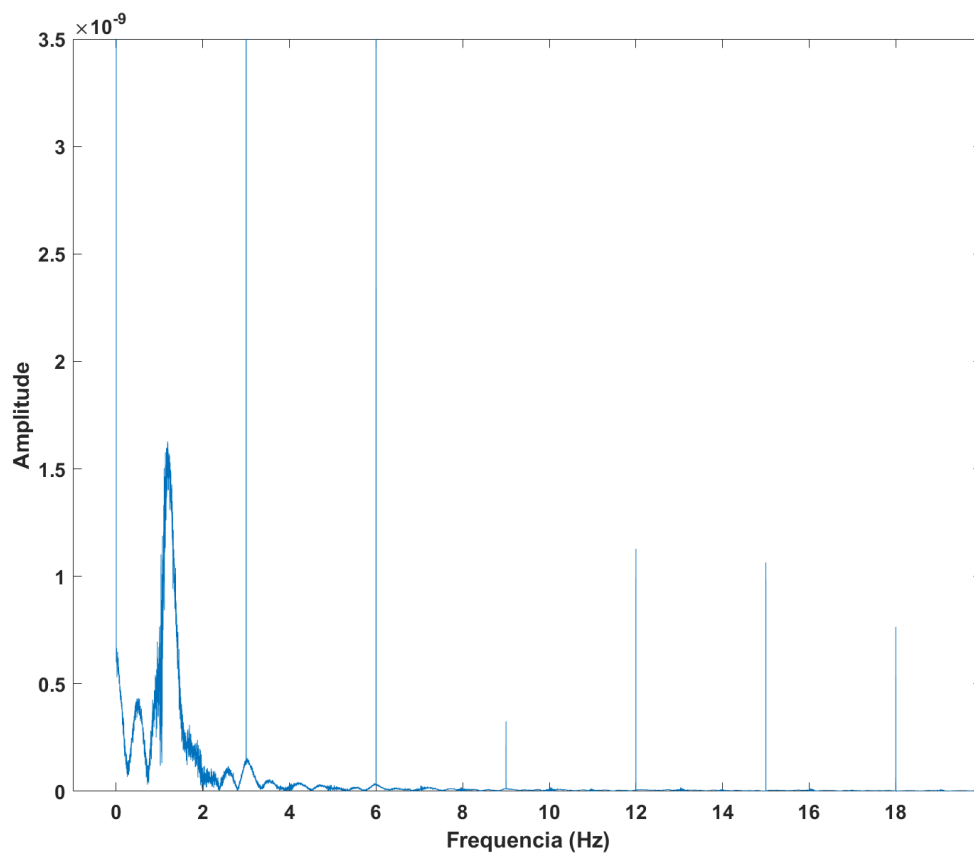
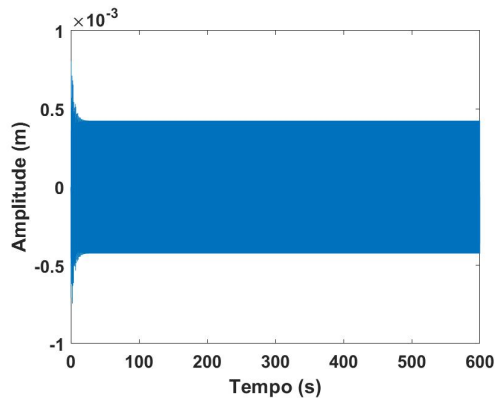
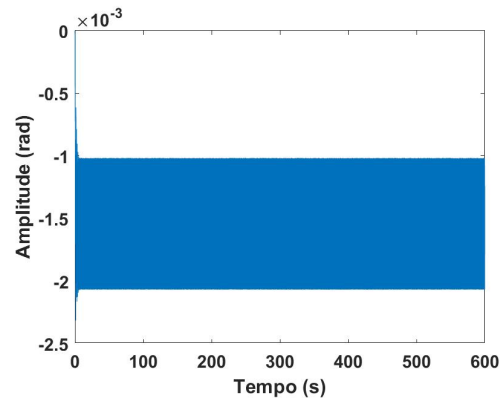


Figura 4.25: Figura da resposta em frequência do sistema MR com controle Skyhook, ampliação no eixo y.

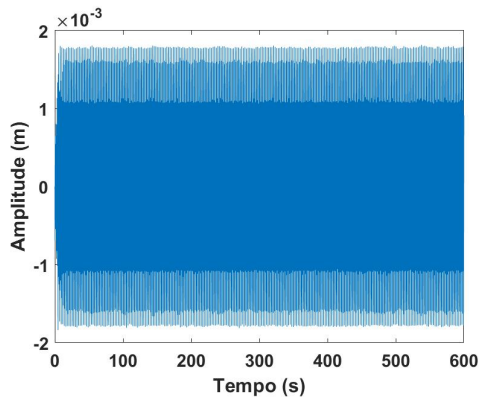
nas condições utilizadas.



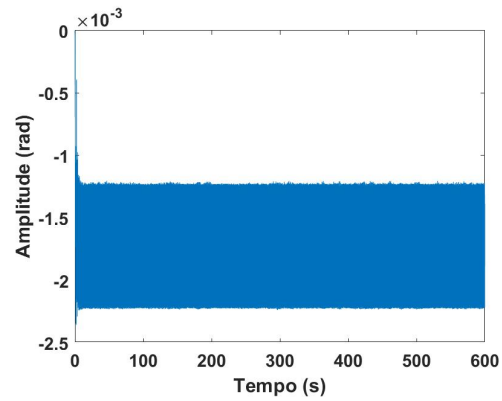
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



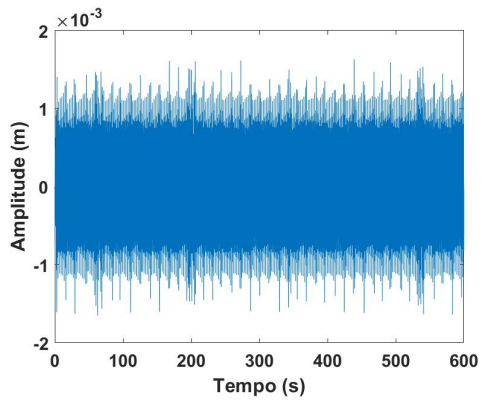
((b)) MR sem esquema de controle



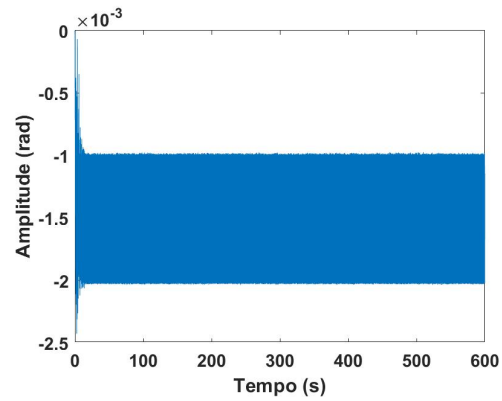
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook

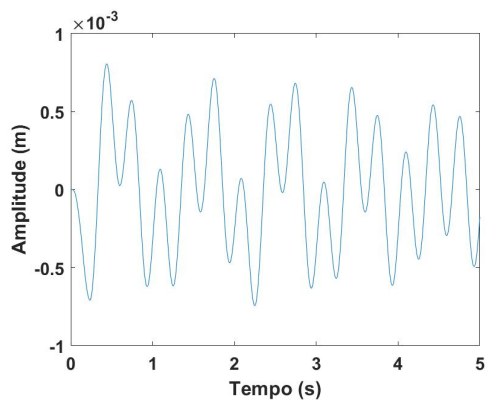


((e)) Não MR com controle Groundhook

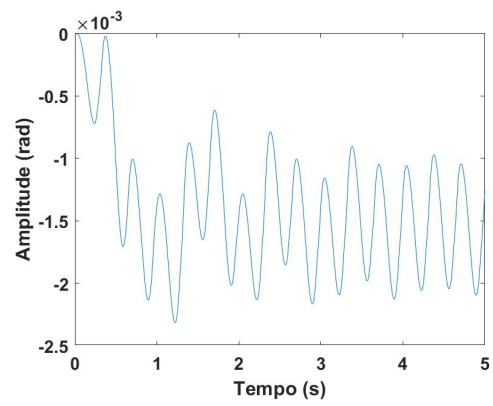


((f)) MR com controle Groundhook

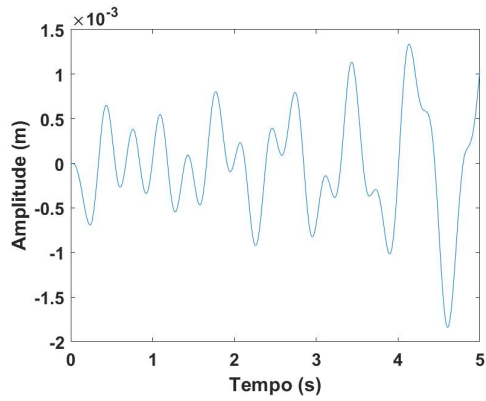
Figura 4.26: Resultados da entrada senoidal para a arfagem.



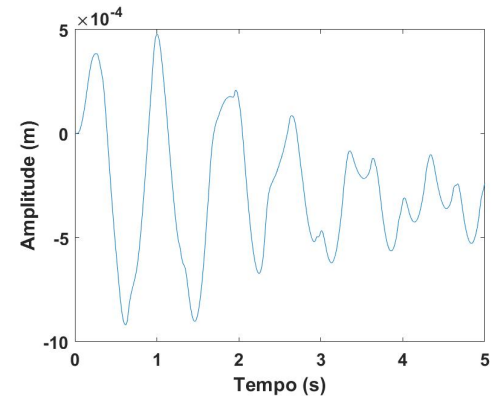
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



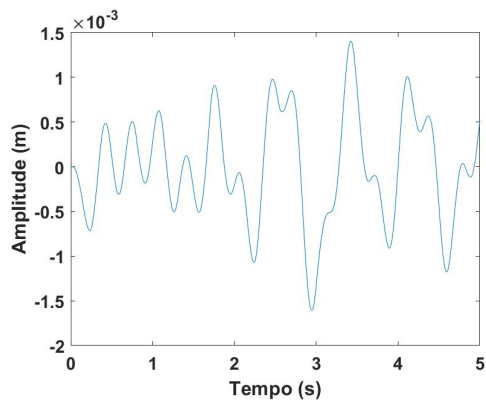
((b)) MR sem esquema de controle



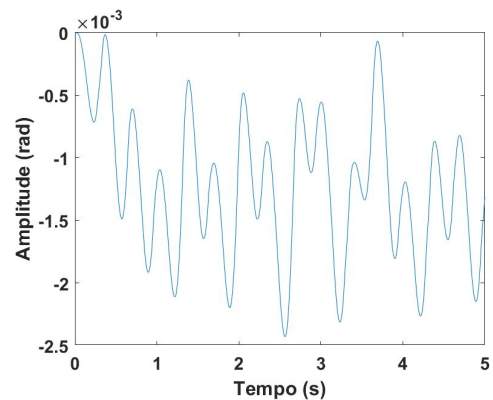
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



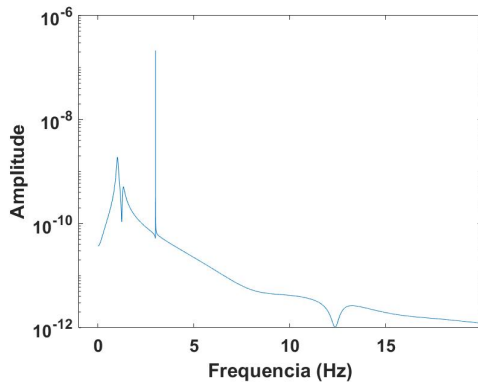
((e)) Não MR com controle Groundhook



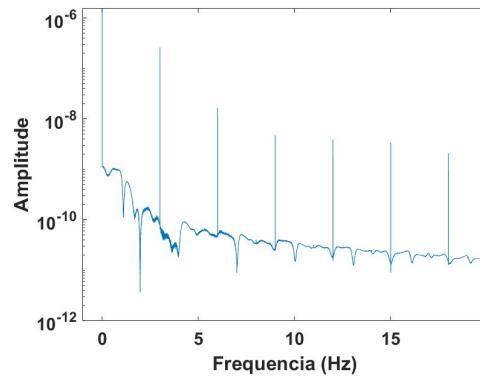
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.27: Resultados da entrada senoidal para a arfagem, zoom nos primeiros segundos.

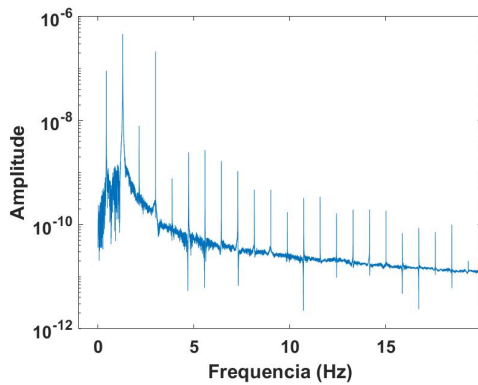
A arfagem se comportou adequadamente nos primeiros 5 segundos analisados, com o sistema Skyhook apresentando uma amplitude máxima inicial menor.



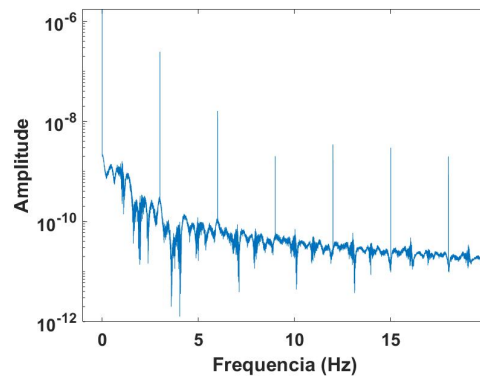
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



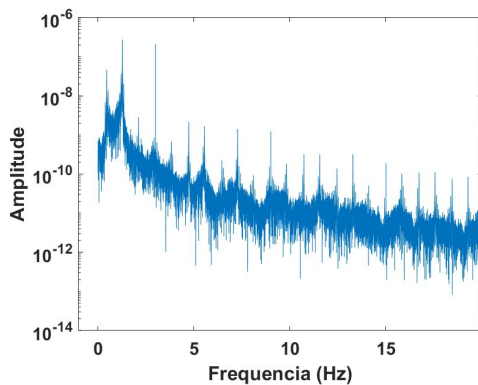
((b)) MR sem esquema de controle



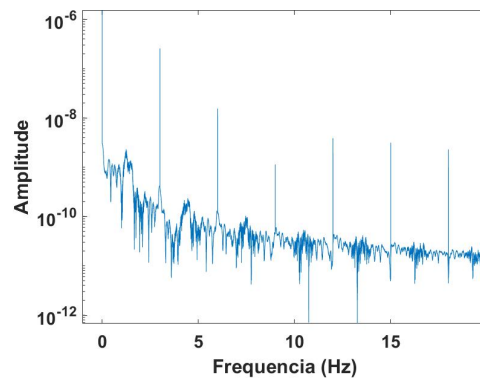
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



((e)) Não MR com controle Groundhook



((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.28: Resultados da entrada senoidal para a arfagem no domínio da frequência.

Os resultados da arfagem, de certa forma, são semelhantes aos do salto. Existem picos em torno de 3 Hz, com os sistemas com amortecimentos tradicionais e esquemas de controle semi-ativo apresentando uma redução nesses picos e um aumento no pico em 1 Hz. Há também a presença de múltiplos picos de pequena magnitude em diversas regiões, tal como na figura (4.24). Para os sistemas de amortecimento MR, há um grande pico na menor frequência detectada e a presença de múltiplos picos menores em múltiplos de 3 Hz, como na imagem 4.25. O sistema Groundhook com amortecimento tradicional demonstrou maior dispersão na sua resposta. O resultado do sistema Skyhook foi pior que o do Groundhook para ambos os casos, mas nesse caso o sistema passivo apresentou a melhor resposta de

todas.

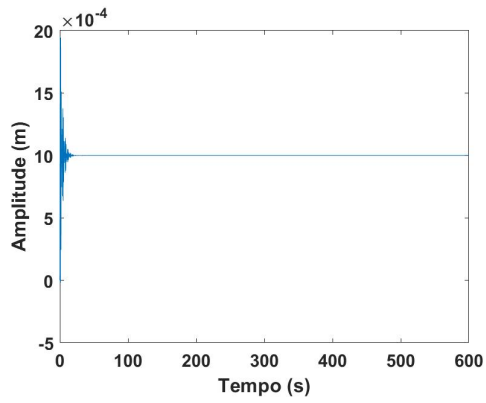
Um ponto de grande relevância é que, para os 3 casos, o emprego de um sistema de amortecimento MR resultou numa piora dos resultados, com maiores ganhos sendo obtidos.

4.2.0.2 Resultados função de degrau

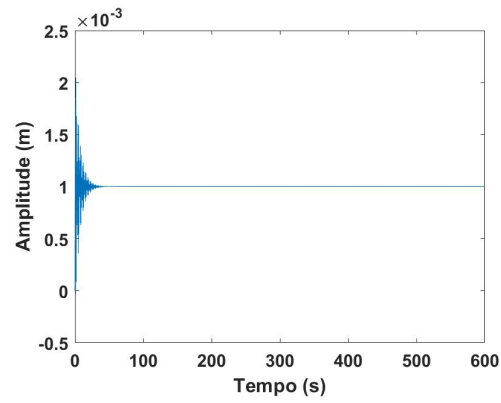
Os resultados para o salto estão nas figuras (4.29), (4.30) e (4.31). Os resultados em (4.29) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos, (4.30) mostra os resultados da oscilação nos primeiros 5 segundos, e (4.31) mostra os resultados no domínio da frequência.

Os resultados para a arfagem estão nas figuras (4.32), (4.33) e (4.34). Os resultados em (4.32) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos, (4.33) mostra os resultados da oscilação nos primeiros 5 segundos, e (4.34) mostra os resultados no domínio da frequência.

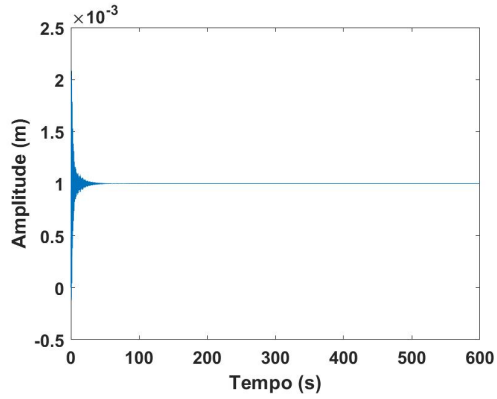
A função de degrau foi calculada com uma entrada de 10^{-4} m, encontrando a roda frontal $2 * 10^{-3}$ segundos após o começo da simulação.



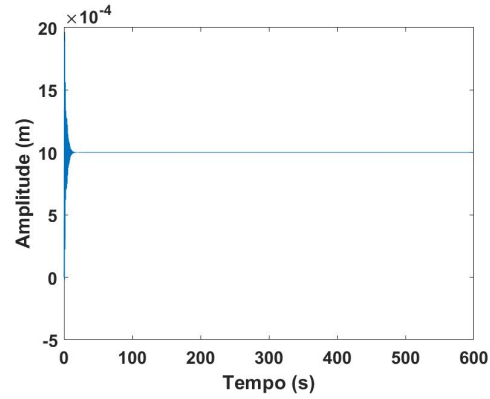
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



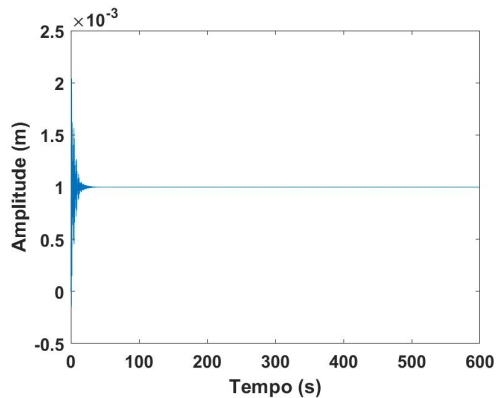
((b)) MR sem esquema de controle



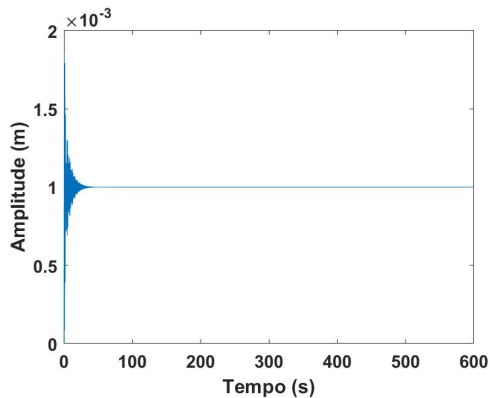
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



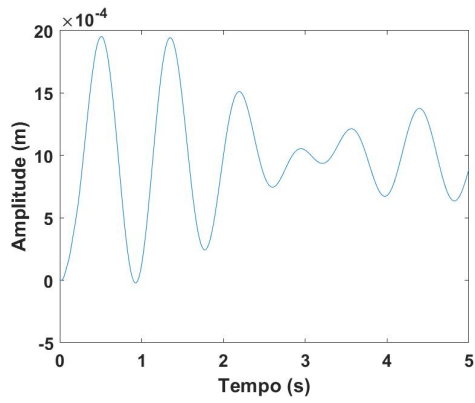
((e)) Não MR com controle Groundhook



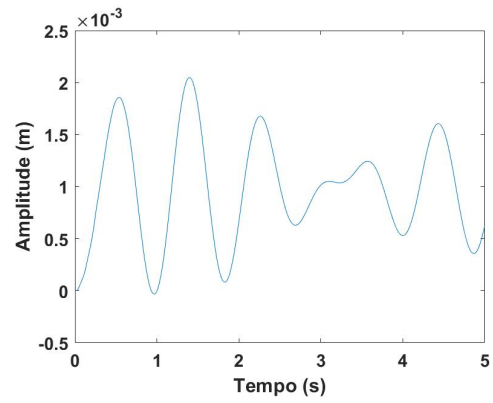
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.29: Resultados da entrada step para a arfagem.

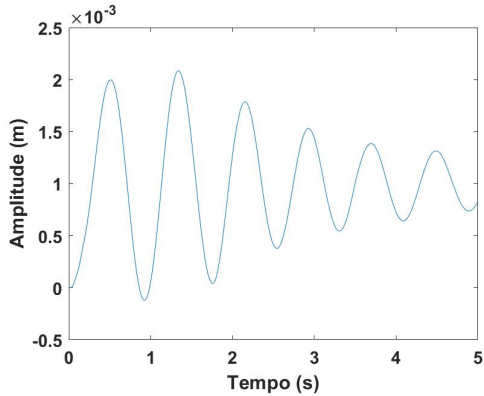
Não há muito a se notar sobre o salto. O resultado demonstrou uma convergência para o novo valor em todos os casos, com os sistemas utilizando um esquema de controle Skyhook apresentando convergência mais rápida. Os sistemas MR também apresentaram ganhos na velocidade de decaimento das vibrações, com exceção do sistema de amortecimento MR sem esquema de controle que apresentou uma piora.



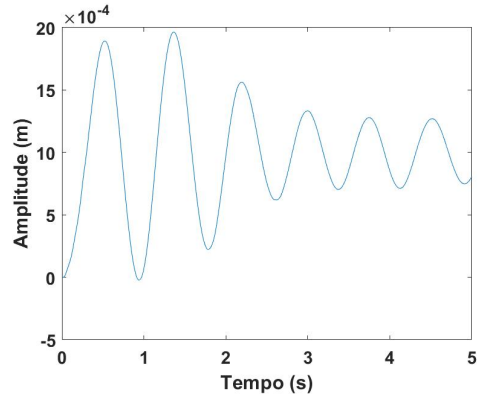
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



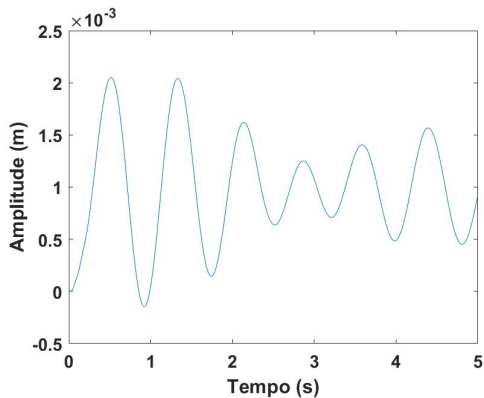
((b)) MR sem esquema de controle



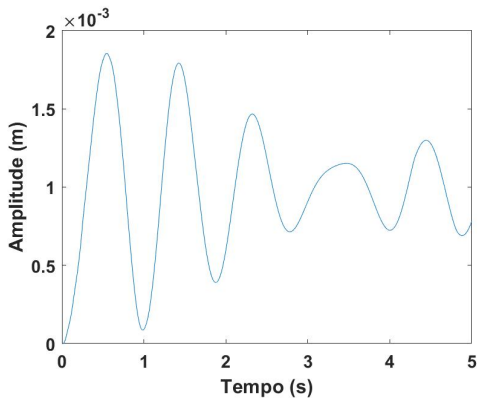
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



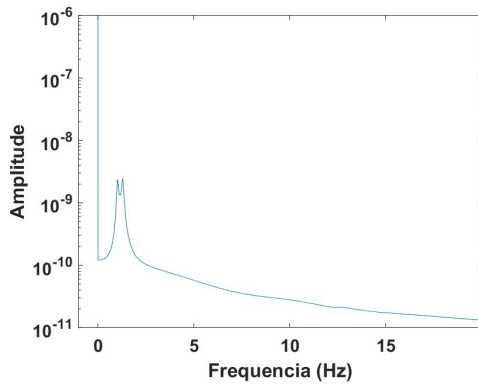
((e)) Não MR com controle Groundhook



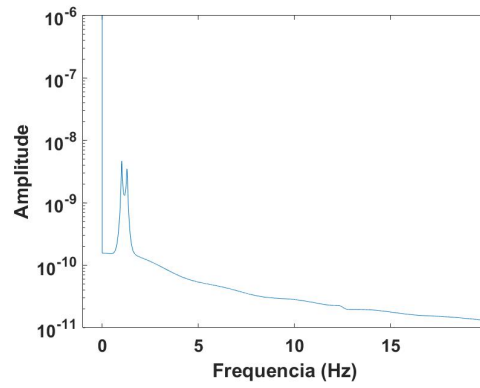
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.30: Resultados da entrada step para a salto, com ampliação nos primeiros 5 s.

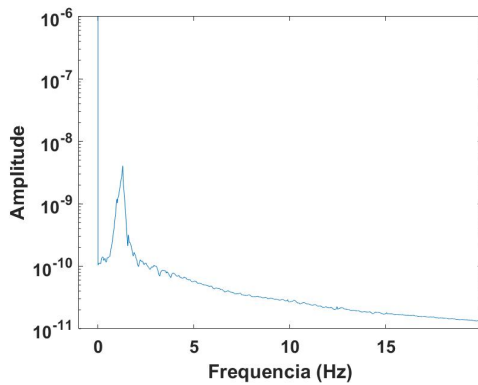
Nesse caso da entrada step, há pouco a se comentar sobre a imagem de perto. Percebe-se um comportamento oposto entre o efeito do controle Skyhook e o Groundhook no instante 3, onde no caso do amortecedor MR o esquema Skyhook transformou o movimento observado em uma onda senoidal clara, enquanto o Groundhook modificou o comportamento de forma a torna-lo uma oscilação de longo período com formato distorcido. Para o caso do amortecedor tradicional, o mesmo fenômeno ocorreu ao se empregar o esquema Skyhook, com o esquema Groundhook exacerbando o movimento observado na configuração passiva.



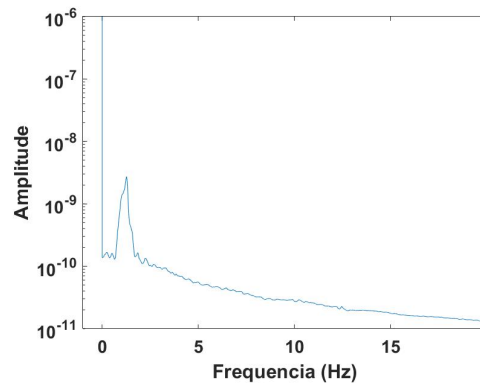
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



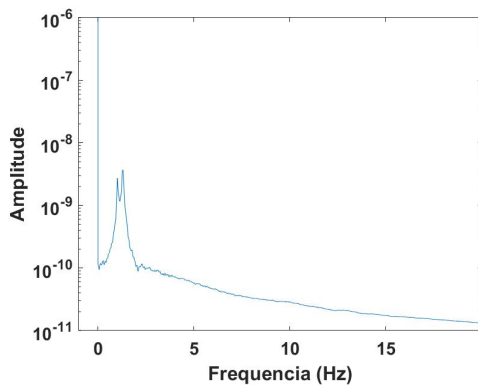
((b)) MR sem esquema de controle



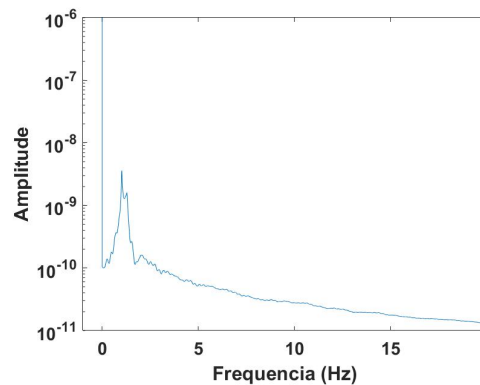
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



((e)) Não MR com controle Groundhook

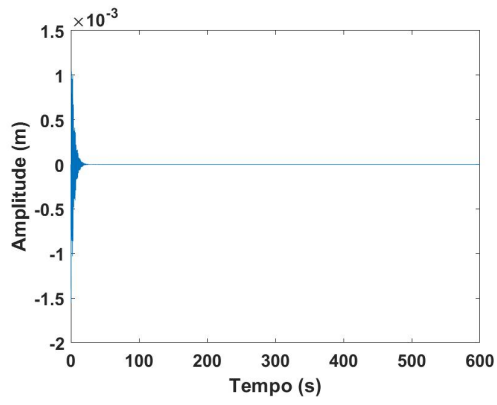


((f)) MR com controle Groundhook

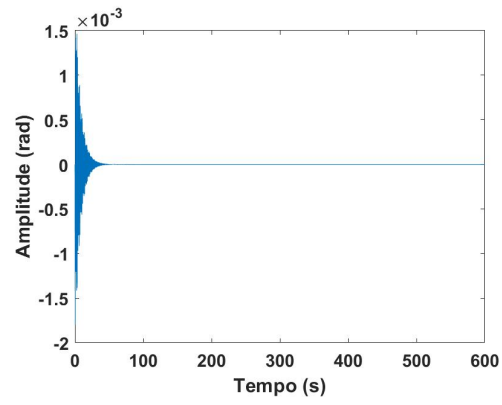
Figura 4.31: Resultados no domínio da frequência da entrada step para a salto.

Todos os 3 sistemas que apresentaram bom desempenho tiveram sua oscilação em torno da frequência mínima captada pela transformada, com nenhuma diferença sendo observada para a maior frequência. Nota-se a oscilação em torno de 1 Hz numa magnitude extremamente pequena, sem diferenças entre os casos.

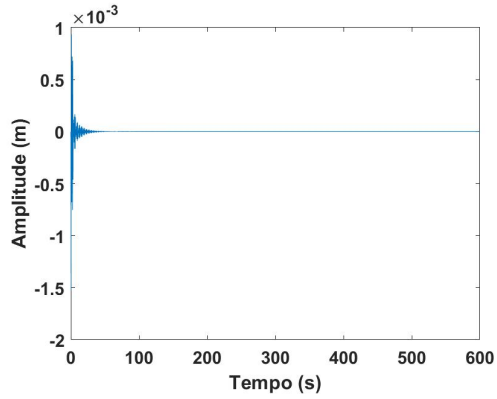
Assim, a maior diferença percebida para o salto devido aos esquemas utilizados e ao uso ou não de um amortecedor MR é na velocidade com a qual o sistema diminui as vibrações.



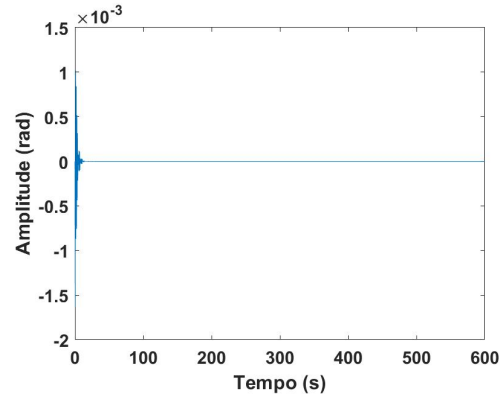
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



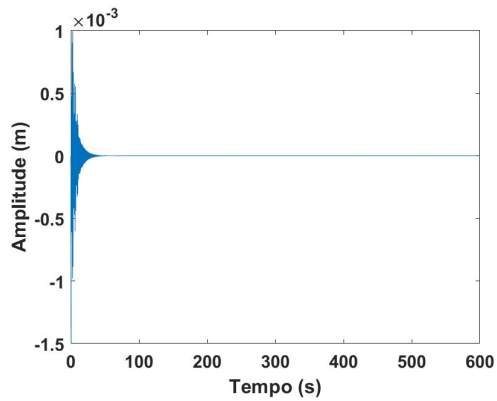
((b)) MR sem esquema de controle



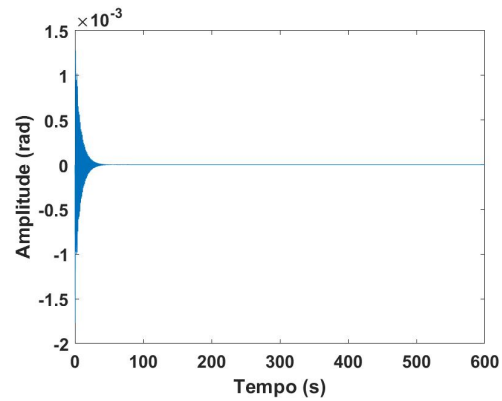
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



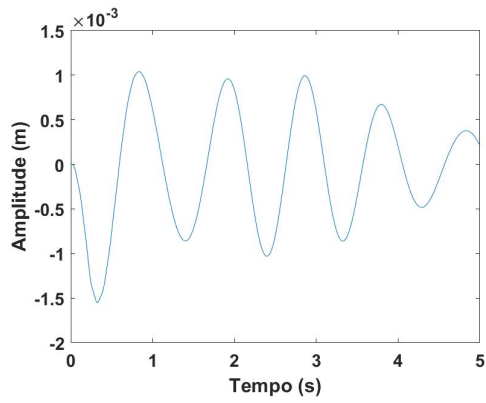
((e)) Não MR com controle Groundhook



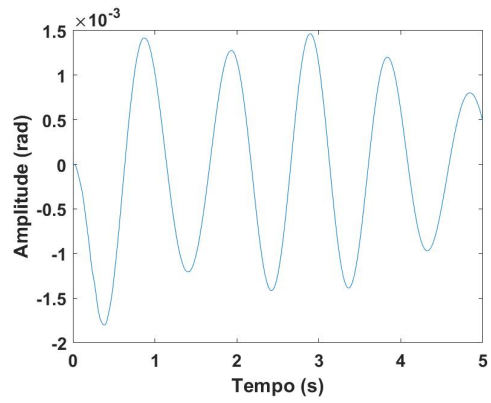
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.32: Resultados da entrada de degrau para a arfagem.

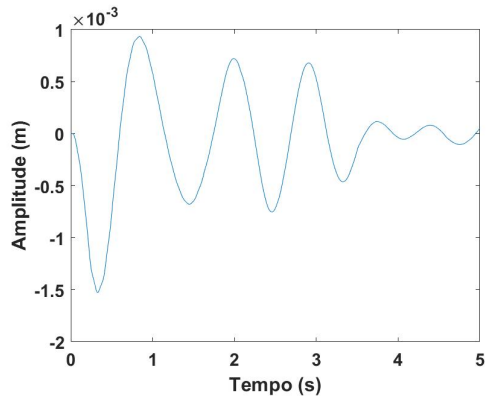
A arfagem não diferiu muito do salto, tendo aproximadamente o mesmo tempo de convergência para o valor neutro.



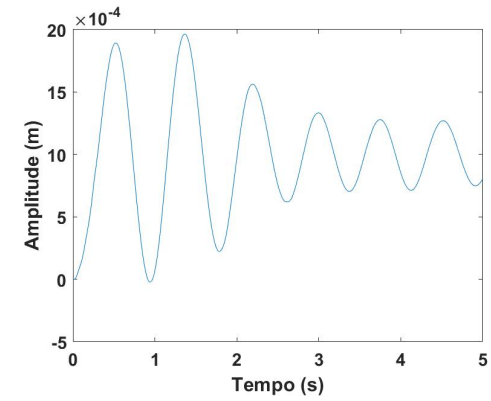
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



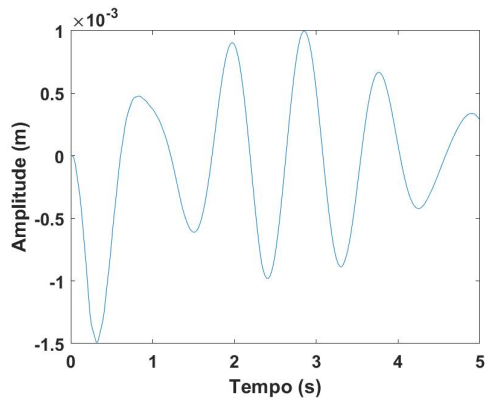
((b)) MR sem esquema de controle



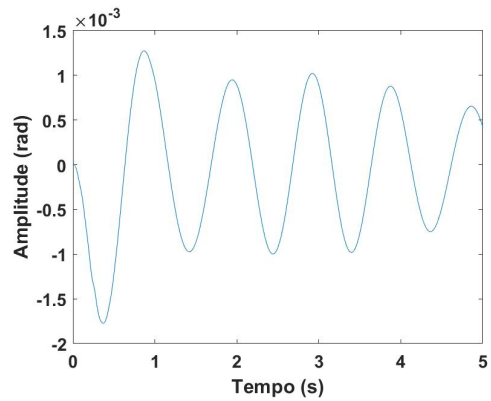
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



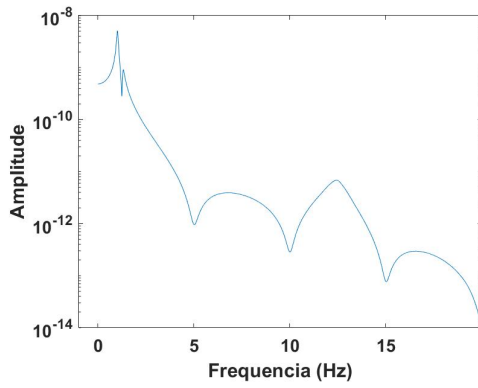
((e)) Não MR com controle Groundhook



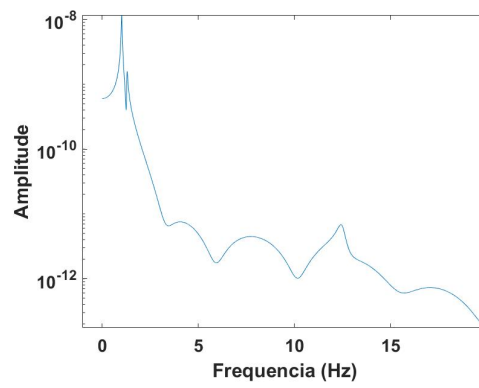
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.33: Resultados da entrada de degrau para a arfagem, zoom nos primeiros 5 segundos.

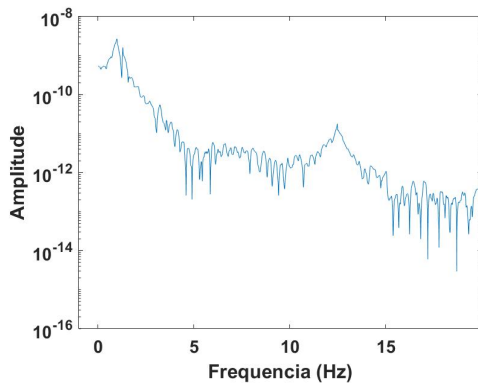
Os resultados de perto mostram coerência com o observado nas funções em 600 segundos, com os sistemas que convergiram mais rápido para o salto e arfagem se aproximando do ponto neutro mais rapidamente e tendo atenuação mais rápida das vibrações.



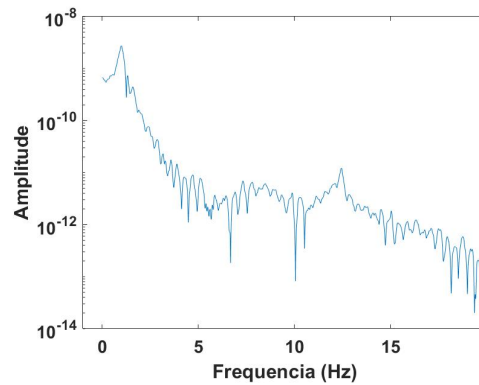
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



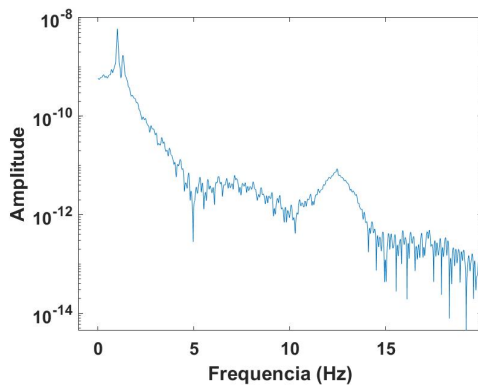
((b)) MR sem esquema de controle



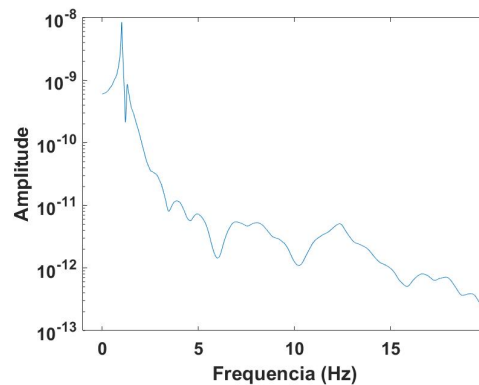
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



((e)) Não MR com controle Groundhook



((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.34: Resultados da entrada de degrau para a arfagem no domínio da frequência.

O comportamento da arfagem no domínio da frequência apresentou maior diferença. Há a presença de dois picos, ambos em torno de 1 Hz, com o espectro estando espalhado ao longo desses picos. Houve melhora da performance ao se utilizar o esquema de controle Skyhook e piora ao se utilizar o esquema Groundhook, ao contrário do salto, que se mostrou indiferente.

O sistema com amortecimento MR apresentou desempenho pior que o sistema de amortecimento com tradicional. A maior piora ocorreu no sistema sem esquema de controle, que teve seu ganho mais que dobrado. O sistema com esquema Groundhook apresentou uma piora de cerca de 30%. O sistema com esquema Skyhook apresentou uma piora muito pequena,

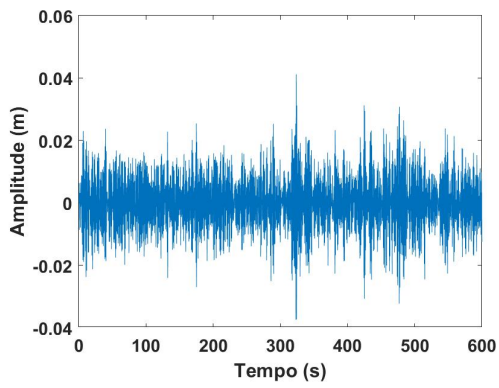
de menos de 5%, sendo quase igual entre os dois casos.

4.2.0.3 Resultados ruído branco

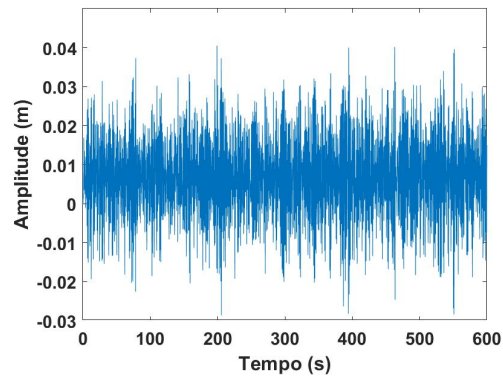
Os resultados para o salto estão nas figuras (4.35) e (4.36). Os resultados em (4.35) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos e (4.36) mostra os resultados no domínio da frequência.

Os resultados para a arfagem estão nas figuras (4.38) e (4.39). Os resultados em (4.38) mostram a oscilação ao longo dos 600 segundos e (4.39) mostra os resultados no domínio da frequência.

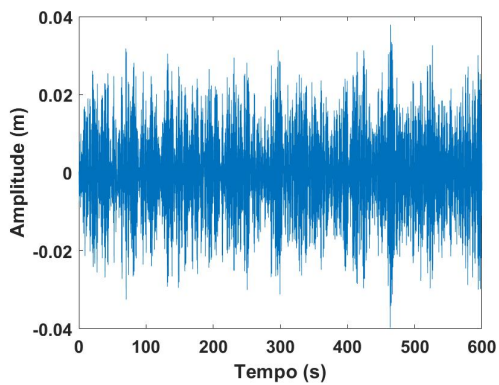
A função de degrau foi calculada com uma entrada de 10^{-4} m, encontrando a roda frontal $2 * 10^{-3}$ segundos após o começo da simulação.



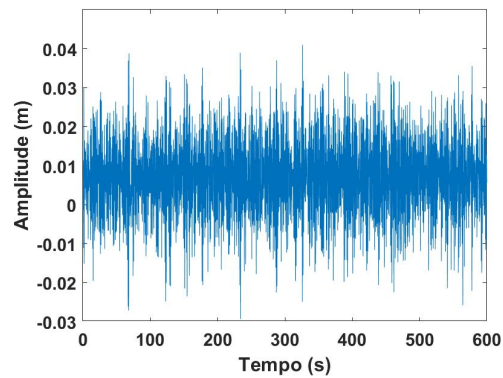
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



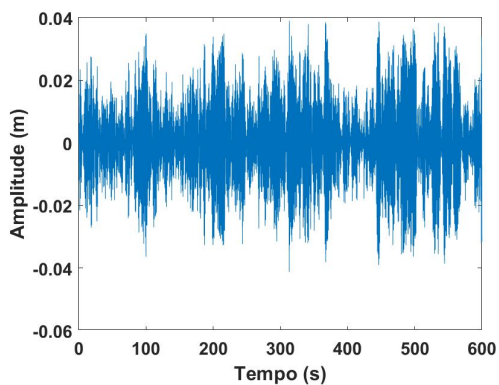
((b)) MR sem esquema de controle



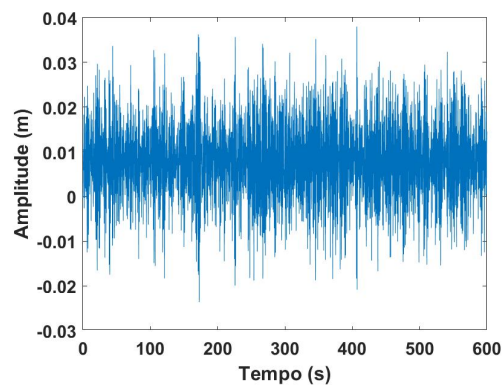
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



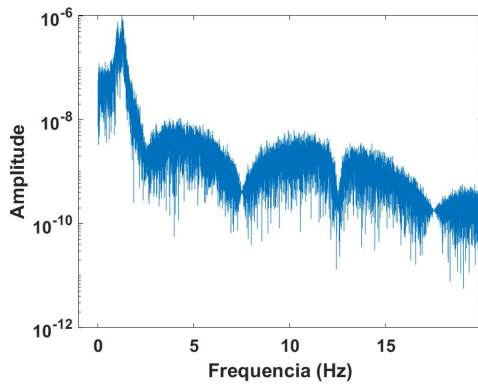
((e)) Não MR com controle Groundhook



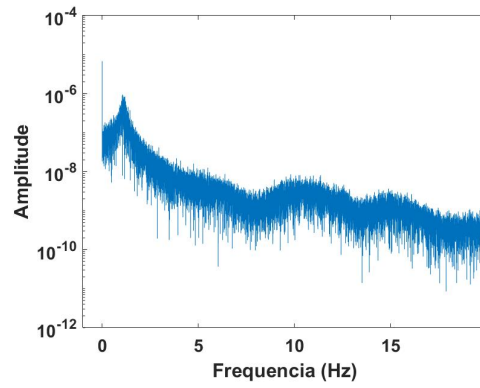
((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.35: Resultados da entrada de ruído branco para a salto.

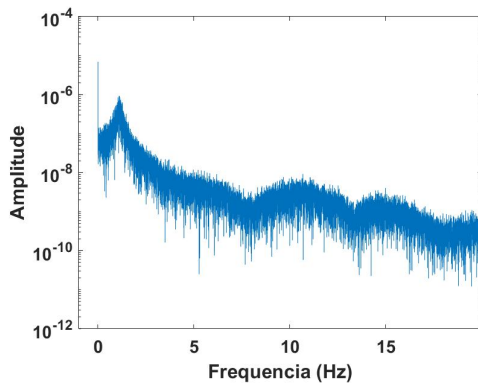
Nota-se que os sistemas de amortecimento MR apresentaram sua oscilação centrada fora da origem, consistente com o resultado anterior de entrada senoidal de 3 Hz.



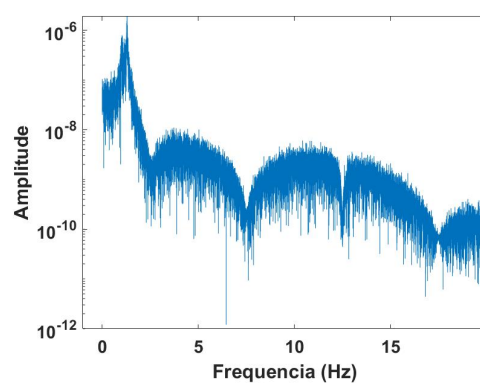
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



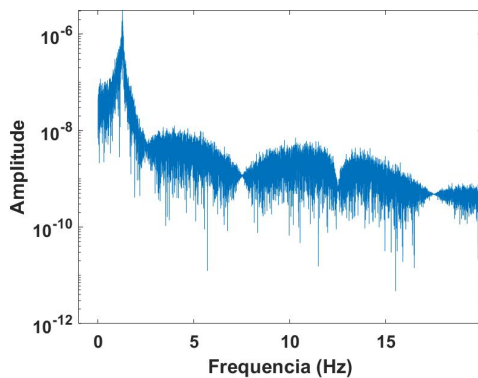
((b)) MR sem esquema de controle



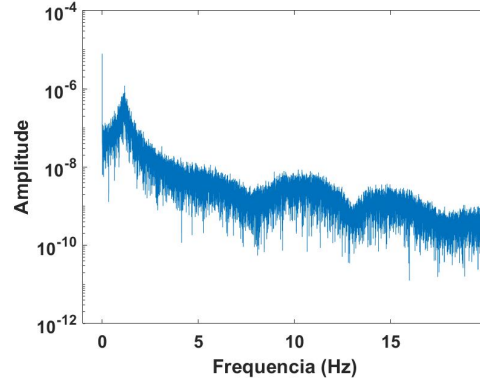
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



((e)) Não MR com controle Groundhook



((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.36: Resultados no domínio da frequência entrada de ruído branco para a salto.

O ruído branco apresentou resultados em linha com os obtidos para a entrada senoidal de 3 Hz.

Para os sistemas de amortecimento tradicional, o uso de um esquema de controle semi-ativo apresentou piora dos resultados, com o esquema Skyhook apresentando os piores resultados. Para os amortecimentos MR, o emprego de um esquema de controle diminuiu as vibrações no caso do Skyhook, mas as aumentou no caso do Groundhook.

O comportamento do sistema explica alguns dos elementos observados na entrada senoidal de 3 Hz. A frequência de ressonância é em torno de 1 Hz, o que justifica a detecção de oscilações na região para a entrada de 3 Hz. Há também pequenas faixas de oscilações em

torno de 4 e 11 Hz, como também visualizado em escala linear na figura (4.37).

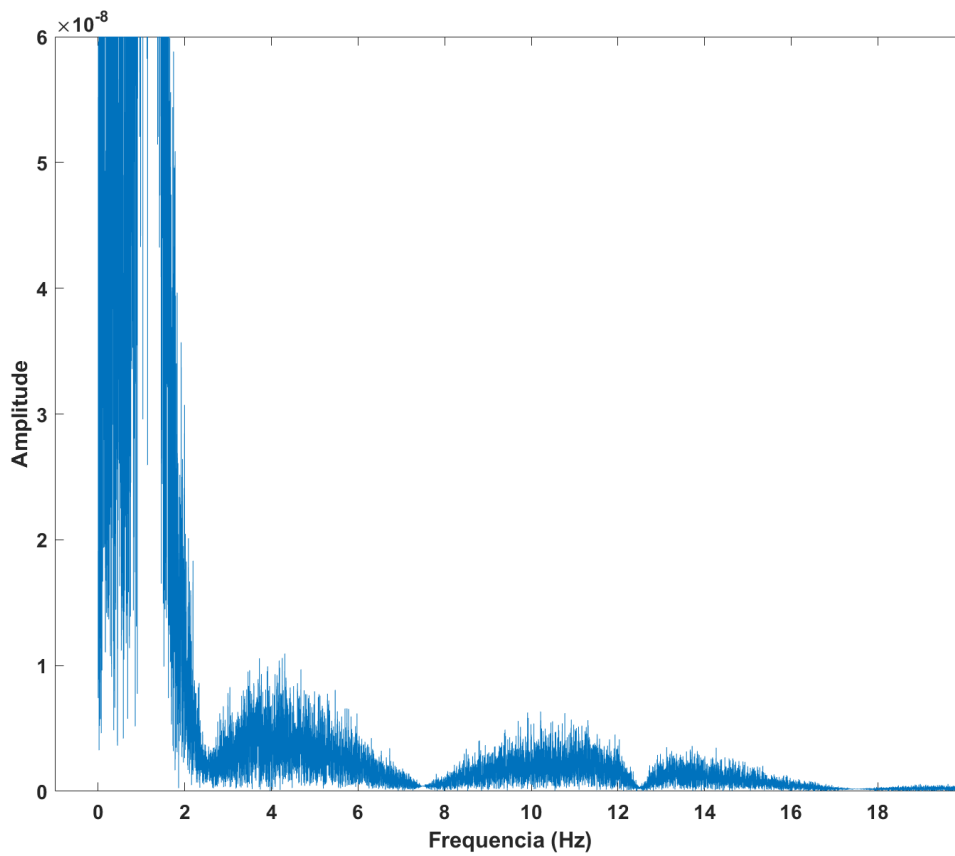
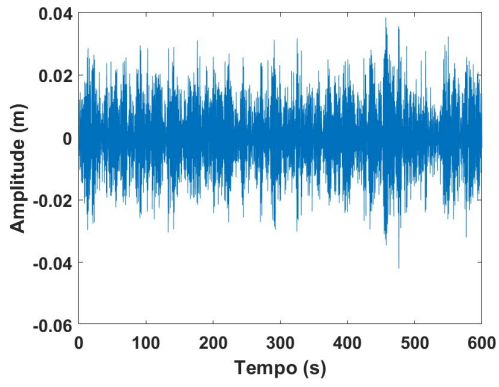
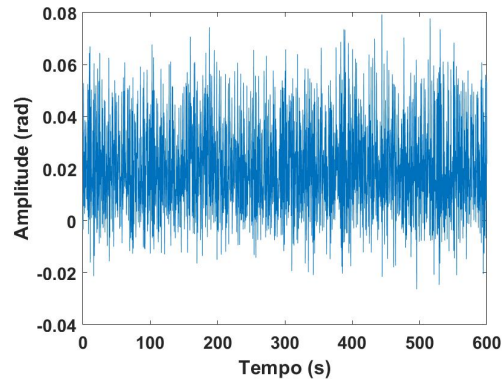


Figura 4.37: Ampliação do resultado da frequência para o caso do salto. Amortecimento tradicional sem esquema de controle semi-ativo.

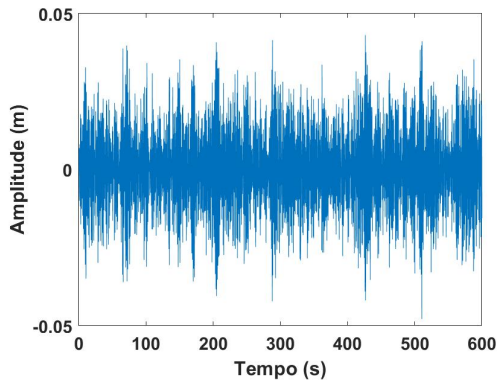
A arfagem apresentou resultados semelhantes aos da entrada senoidal de 3 Hz, com as configuração utilizando um amortecedor MR oscilando em torno de uma região diferente de 0.



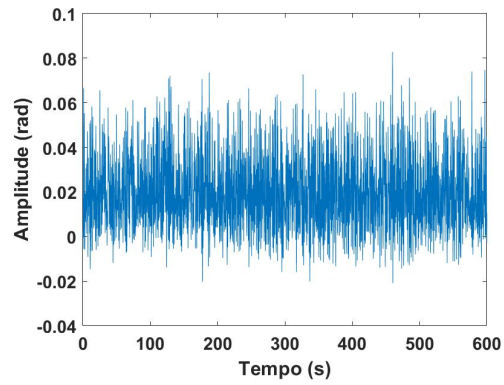
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



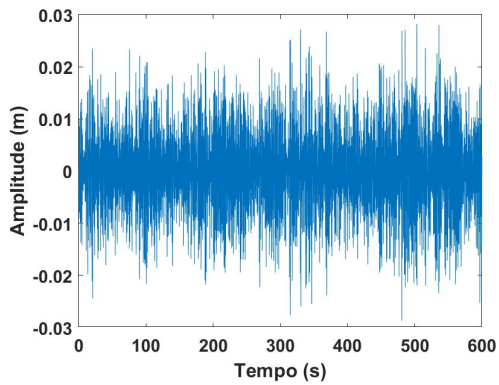
((b)) MR sem esquema de controle



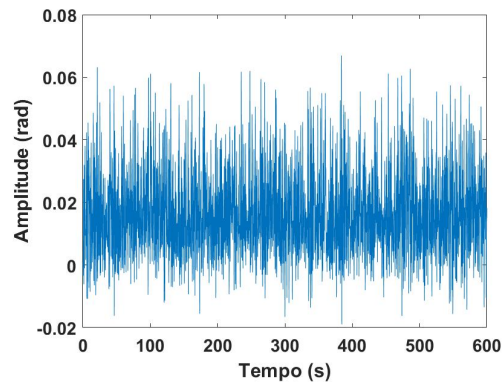
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook

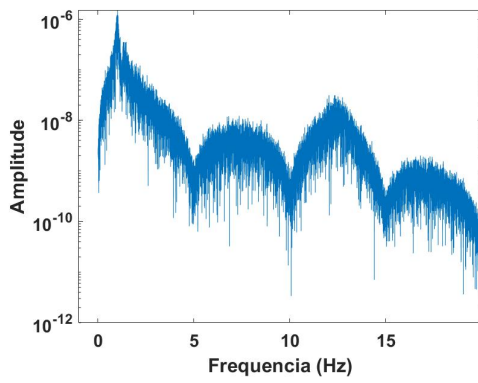


((e)) Não MR com controle Groundhook

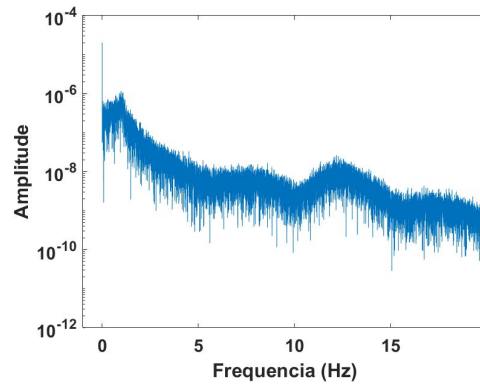


((f)) MR com controle Groundhook

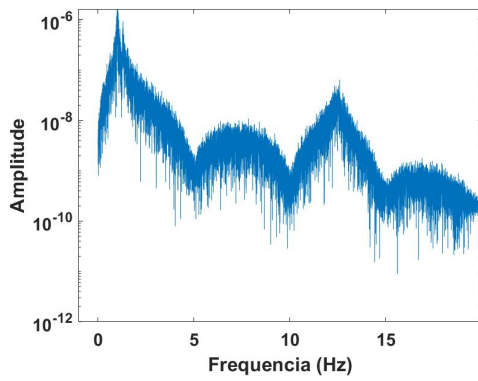
Figura 4.38: Resultados da entrada de ruído branco para a arfagem.



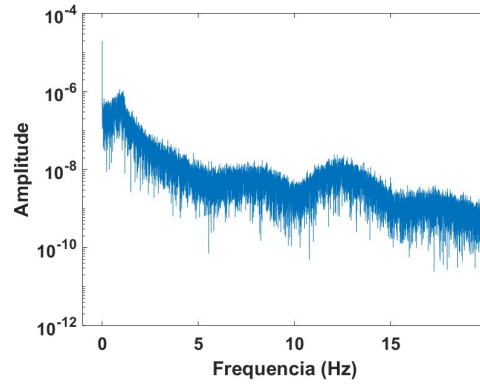
((a)) Passivo e sem esquemas de controle



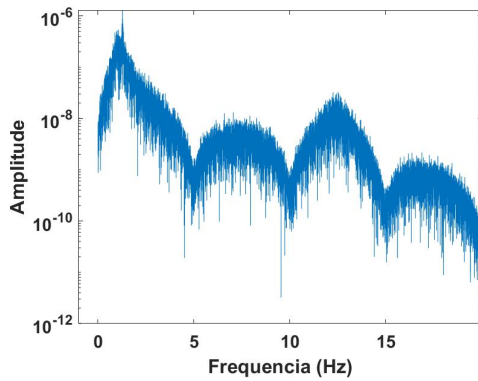
((b)) MR sem esquema de controle



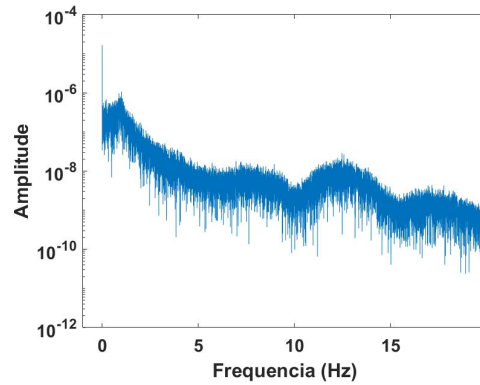
((c)) Não MR com controle Skyhook



((d)) MR com controle Skyhook



((e)) Não MR com controle Groundhook



((f)) MR com controle Groundhook

Figura 4.39: Resultados da entrada de ruído branco para a arfagem no domínio da frequência.

Para o caso da arfagem, observou-se um aumento na amplitude da resposta tanto ao se utilizar um esquema de controle Skyhook quanto ao se utilizar um amortecedor MR ao invés de um tradicional. O esquema de controle Groundhook apresentou uma melhora nos resultados em relação aos sistemas sem esquema de controles, e o Skyhook apresentou uma piora. Os sistemas utilizando amortecimentos tradicionais apresentaram oscilações nas faixas de 7 e 13 Hz como exemplificado em escala linear na imagem (4.40), enquanto aqueles que utilizaram amortecimento MR não apresentaram grande ganho nas faixas de frequência maiores.

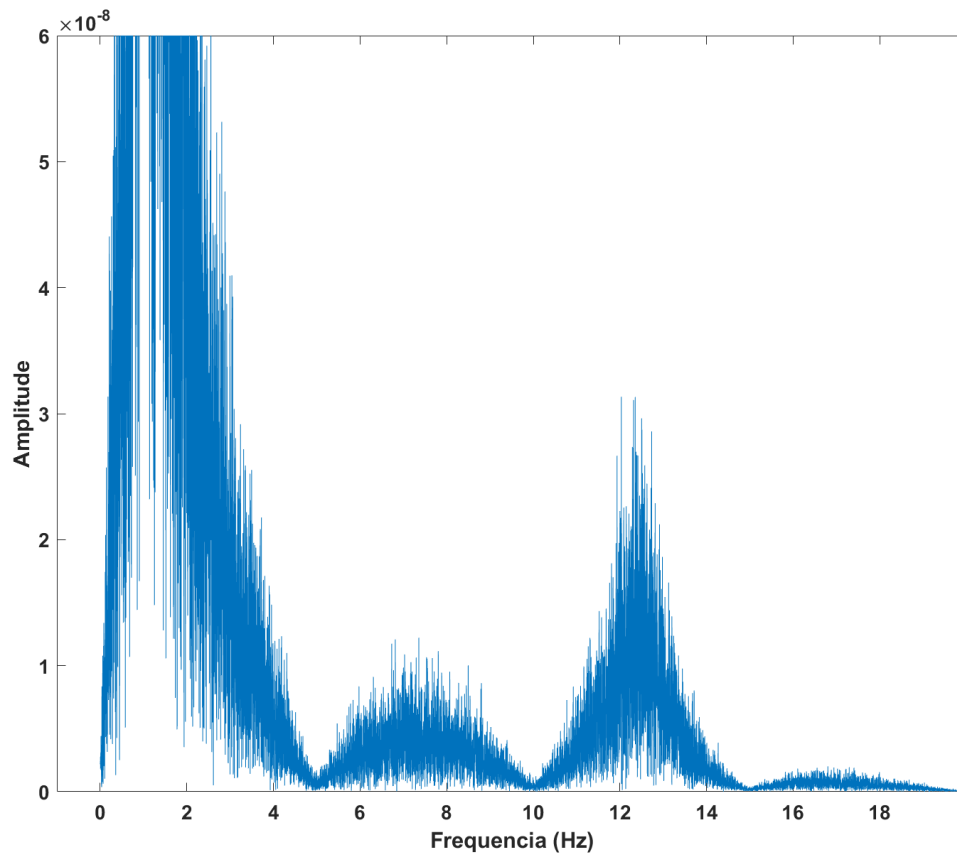


Figura 4.40: Ampliação do resultado da frequência para o caso da arfagem. Amortecimento tradicional sem esquema de controle semi-ativo.

Ao se sobrepor os resultados para o salto e arfagem, pode-se observar o fenômeno dos modos de vibração da carroceria ocorrendo de maneira mutuamente exclusiva. As regiões de mínimo do salto são as regiões de máximo da arfagem e vice-versa, como mostrado na figura (4.41).

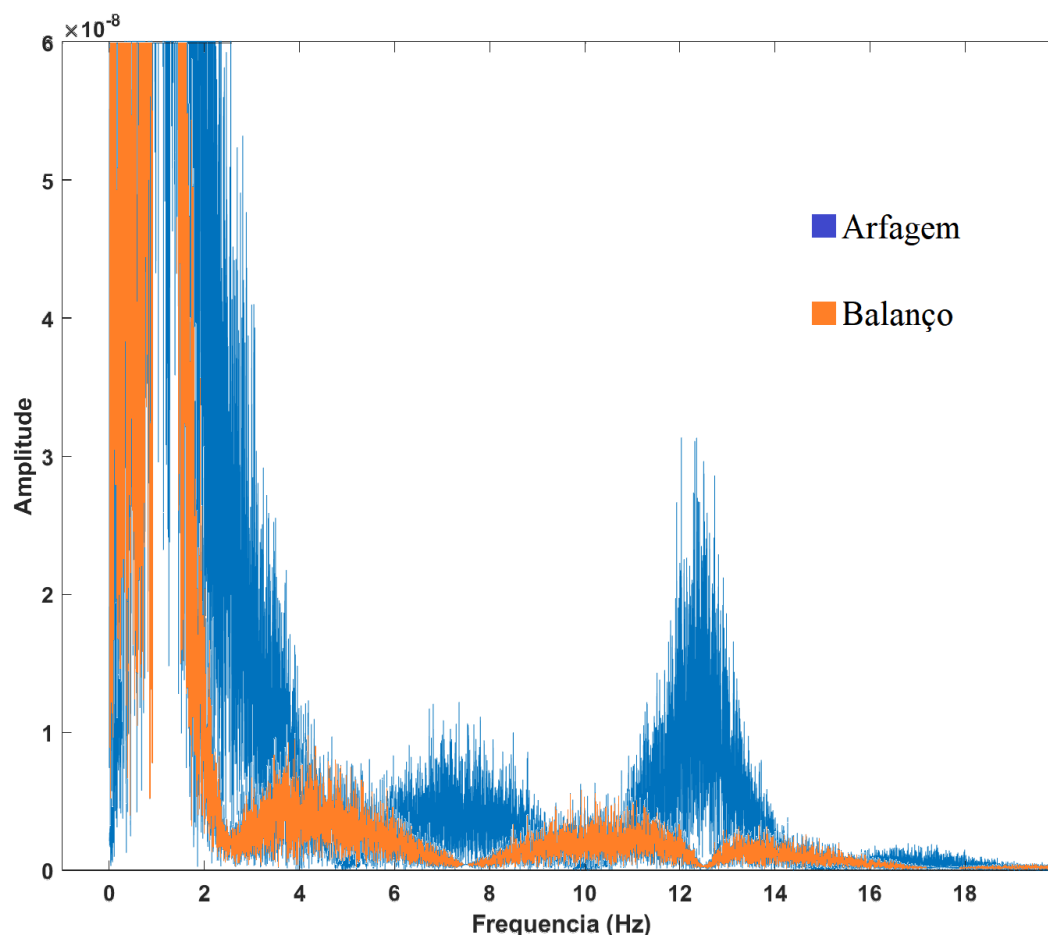


Figura 4.41: Sobreposição dos resultados da frequência para os casos do salto e da arfagem. Amortecimento tradicional sem esquema de controle semi-ativo.

Isso é condizente com o esperado pela literatura, tal como explicado em [Gillespie 1992]. Esses resultados foram observados da mesma maneira para os amortecimentos com esquemas de controle Skyhook e Groundhook, e para todos os sistemas que utilizaram um amortecedor MR.

Desses resultados, notaram-se alguns temas em comum.

Os esquema de controle Skyhook e Groundhook não funcionam muito bem quando aplicados da maneira como foram para esses parâmetros de sistema. Há uma aparente inversão do desempenho dos sistemas Groundhook e Skyhook, com o sistema Skyhook apresentando desempenho pior de isolamento de vibrações para o sistema passivo e o sistema Groundhook um desempenho melhor. Isso não ocorreu em todos os casos, com o teste da função de degrau tendo desempenho de isolamento de vibração da carroceria melhor com o sistema Skyhook e pior com o Groundhook. Portanto, é provável que o funcionamento desses esquemas de controle necessite de alguma adaptação.

O uso de um amortecedor MR com os parâmetros utilizados resulta em características piores de isolamento de vibração para a carroceria do que um esquema de controle onde o má-

ximo é 150% do valor inicial e o mínimo 50%. Esse resultado não contempla exhaustivamente todas as configurações de veículo, com a possibilidade de resultados melhores existirem caso se utilize amortecedores magneto-reológicos com propriedades diferentes ou veículos com propriedades diferentes.

Os comportamento da arfagem foi, de forma geral, afetado de maneira semelhante ao do salto. O fenômeno das vibrações da arfagem e do salto em frequências mutuamente exclusiva foi observado.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Conclusões

Para o modelo de 1/4 de veículo com amortecimento perfeitamente controlável, concluiu-se que os esquemas de controles semi-ativos são capazes de trazer boa performance. O esquema *Skyhook* conseguiu melhorar as características de conforto, enquanto o amortecedor com esquema *Groundhook* conseguiu melhorar as características de segurança. Também concluiu-se que as metodologias aqui presentes são capazes de solucionar os sistemas propostos e gerar resultados nas métricas desejadas. A metodologia do mapa de resposta foi bem sucedida em encontrar os mínimos e máximos desejados.

Também concluiu-se que os amortecedores magneto-reológicos produzem resultados significativamente diferentes de um amortecedor perfeitamente controlável, com uma degradação de performance em relação ao amortecimento passivo utilizado como comparação. Os esquemas de *Groundhook* e *Skyhook* não foram capazes de comandar bem o amortecimento magneto-reológico nas configurações testadas. Concluiu-se que essas dificuldades observadas se mantêm no modelo de 1/2 de veículo, e que o uso dos esquemas de controle *Groundhook* e *Skyhook* no modelo de 1/2 de veículo não gera um ganho de performance consistente nas condições testadas independente do amortecimento ser perfeitamente controlável ou magneto-reológico.

5.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, foram identificados duas metodologias possíveis para lidar com os problemas identificados. A primeira metodologia consiste em analisar o desempenho do sistema de 1/4 e 1/2 de veículo proposto com variação nas propriedades de massa, CG, amortecimento e momentos de inércia quando aplicáveis. Essas propriedades foram tratadas como constantes nesse trabalho, e portanto não foi possível obter conclusões definitivas sobre a eficácia dos sistemas de controle *Groundhook* e *Skyhook* empregados. A segunda

metodologia consiste na modificação dos esquemas de *Groundhook* e *Skyhook* para adequá-los ao controle de um amortecimento magneto-reológico. Isso pode ser feito refazendo a formulação com base na suposição que o amortecimento magneto-reológico é que esta na carroceria do modelo por exemplo.

Referências Bibliográficas

[Ahmadian 2017] Ahmadian, M. (2017). Magneto-rheological suspensions for improving ground vehicle's ride comfort, stability, and handling. *Vehicle System Dynamics*, 55(10):1618–1642.

[Brasil 2012] Brasil (2012). Presidência da República, Secretaria-Geral, Subchefia para Assuntos Jurídicos, Lei nº 13.755, de 17 de setembro de 2012. Altera a alíquota das contribuições previdenciárias sobre a folha de salários devidas pelas empresas que especifica; institui o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores, o Regime Especial de Tributação do Programa Nacional de Banda Larga para Implantação de Redes de Telecomunicações, o Regime Especial de Incentivo a Computadores para Uso Educacional, o Programa Nacional de Apoio à Atenção Oncológica e o Programa Nacional de Apoio à Atenção da Saúde da Pessoa com Deficiência; restabelece o Programa Um Computador por Aluno; altera o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores, instituído pela Lei nº 11.484, de 31 de maio de 2007; altera as Leis nº s 9.250, de 26 de dezembro de 1995, 11.033, de 21 de dezembro de 2004, 9.430, de 27 de dezembro de 1996, 10.865, de 30 de abril de 2004, 11.774, de 17 de setembro de 2008, 12.546, de 14 de dezembro de 2011, 11.484, de 31 de maio de 2007, 10.637, de 30 de dezembro de 2002, 11.196, de 21 de novembro de 2005, 10.406, de 10 de janeiro de 2002, 9.532, de 10 de dezembro de 1997, 12.431, de 24 de junho de 2011, 12.414, de 9 de junho de 2011, 8.666, de 21 de junho de 1993, 10.925, de 23 de julho de 2004, os Decretos-Leis nº s 1.455, de 7 de abril de 1976, 1.593, de 21 de dezembro de 1977, e a Medida Provisória nº 2.199-14, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. .

[Brasil 2018] Brasil (2018). Presidência da República, Secretaria-Geral, Subchefia para Assuntos Jurídicos, Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. Estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no Brasil; institui o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística; dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas; e altera as Leis nº 9.440, de 14 de março de 1997, 12.546, de 14 de dezembro de 2011, 10.865, de 30 de abril de 2004, 9.826, de 23 de agosto de 1999, 10.637, de 30 de dezembro de 2002, 8.383, de 30 de dezembro de 1991, e 8.989, de 24 de fevereiro de 1995, e o Decreto-Lei nº 288, de 28 de fevereiro de 1967.

- [Chen et al. 2014] Chen, M. Z., Hu, Y., Li, C., and Chen, G. (2014). Semi-active suspension with semi-active inerter and semi-active damper. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):11225–11230. 19th IFAC World Congress.
- [de Lima et al. 2012] de Lima, J. G. M., de Moraes, M. V. G., and de Araújo, M. L. (2012). Avaliação qualitativa do comportamento não linear de modelo de meio veículo. *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*.
- [Emura et al. 1994] Emura, J., Kakizaki, S., Yamaoka, F., and Nakamura, M. (1994). Development of the semi-active suspension system based on the sky-hook damper theory. *SAE Transactions*, 103:1110–1119.
- [Gillespie 1992] Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International.
- [Gomes and de Moraes 2021] Gomes, P. C. and de Moraes, M. V. G. (2021). *Parametric optimization of TMD inerter for vibration control of vehicle suspension*. Universidade de Brasília.
- [Gołdasz et al. 2020] Gołdasz, J., Sapiński, B., Jastrzębski, , and Kubik, M. (2020). Dual hysteresis model of mr dampers. *Frontiers in Materials*, 7.
- [Hernandez and Spigler 1992] Hernandez, D. and Spigler, R. (1992). A -stability of runge-kutta methods for systems with additive noise. *BIT*, 32:620–633.
- [Inman 2013] Inman, D. J. (2013). *Engineering Vibration*. Prentice Hall, 4 edition.
- [ISO 8608:2016 2016] ISO 8608:2016 (2016). Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH.
- [Karnopp 1995] Karnopp, D. (1995). Active and Semi-Active Vibration Isolation. *Journal of Vibration and Acoustics*, 117(B):177–185.
- [Li et al. 2021] Li, W., Dong, X., Yu, J., Xi, J., and Pan, C. (2021). Vibration control of vehicle suspension with magneto-rheological variable damping and inertia. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 32(13):1484–1503.
- [Manolache-Rusu et al. 2020] Manolache-Rusu, I.-C., Suci, C., and Mihai, I. (2020). Analysis of passive vs. semi-active quarter car suspension models. In Vladescu, M., Tamas, R. D., and Cristea, I., editors, *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X*, volume 11718, pages 428 – 433. International Society for Optics and Photonics, SPIE.
- [Melo 2017] Melo, M. A. (2017). *Análise Comparativa de Estratégias para Suspensão Semiativa em um Modelo de 1/4 de Veículo*. Universidade de Brasília.

- [Norton 2004] Norton, R. (2004). *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem*. Bookman.
- [Proakis and Manolakis 1996] Proakis, J. G. and Manolakis, D. G. (1996). *Digital Signal Processing (3rd Ed.): Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall, Inc., USA.
- [Santade 2017] Santade, F. (2017). Análise dinâmica de amortecedores não lineares assimétricos, com histerese e sujeitos a folga e avaliação do efeito temperatura.
- [Shirahatti et al. 2008] Shirahatti, A., Prasad, P., Panzade, P., and Kulkarni, M. (2008). Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding. *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering - J BRAZ SOC MECH SCI ENG*, 30.
- [Soliman and Kaldas 2021] Soliman, A. and Kaldas, M. (2021). Semi-active suspension systems from research to mass-market – a review. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40(2):1005–1023.
- [Song et al. 2005] Song, X., Ahmadian, M., and Southward, S. (2005). Modeling magneto-rheological dampers with application of nonparametric approach. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures - J INTEL MAT SYST STRUCT*, 16:421–432.
- [Tusset et al. 2012] Tusset, A., Balthazar, J., Chavarette, F., and Felix, J. (2012). On energy transfer phenomena, in a nonlinear ideal and nonideal essential vibrating systems, coupled to a (mr) magneto-rheological damper. *Nonlinear Dynamics*, 69.
- [Wang et al. 2004] Wang, E. R., Ma, X. Q., Rakheja, S., and Su, C. Y. (2004). Modeling asymmetric hysteretic properties of an mr fluids damper. *43rd IEEE Conference on Decision and Control*.
- [Wei and Taghavifar 2017] Wei, C. and Taghavifar, H. (2017). A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: Half-vehicle model. *Energy*, 134:279–288.
- [Zhang et al. 2013] Zhang, H., Wang, E., Min, F., Subash, R., and Su, C. (2013). Skyhook-based semi-active control of full-vehicle suspension with magneto-rheological dampers. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(3):498–505.
- [Zhang et al. 2012] Zhang, X., Ahmadian, M., and Guo, K.-H. (2012). On the benefits of semi-active suspensions with inerters. *Shock and Vibration*, 19:257–272.

5.3 Codigos de validação

```
1 redo = 1;
2
3
4 K = [10500 1e5]; %Rigidez das molas, N*m
5 M = [800 50]; %Massa dos corpos, Kg
6
7 comeco = 0;
8 fim = 10;
9 dt = 1e-5; %segundos
10 tempo = comeco:dt:fim; %segundos
11
12
13 % modelagem para o dominio da frequencia
14 hz1 = 0; %hz
15 hz2 = 5e3; %hz
16 freqotimizacao = hz1*2*pi:0.05:hz2*2*pi;
17
18 % Parametros de otimizacao
19 K0 = 3;
20 K1 = 5;
21 C0 = 2;
22 C1 = 5;
23 n = 80;
24 %n = 2;
25 Kotimizacao = logspace(K0,K1,n);
26 Cotimizacao = logspace(C0,C1,n);
27 %Kotimizacao = [1e4 1e5];
28 %Cotimizacao = [1e4 1e5];
29 razamort = Cotimizacao./(4*Kotimizacao.*M(1)).^0.5;
30 Kotmeestatico = 1e5;
31
32 freqspecnat = (Kotimizacao.*Kotmeestatico./(Kotimizacao+Kotmeestatico)/M
    (1)).^0.5/2/pi;
33 ksi = transpose(Cotimizacao)*(4*Kotimizacao*M(1)).^-1;
34 freqspecmort = freqspecnat.*((1-ksi.^2).^0.5);
35
36
37 %K da roda - considerado estatico para a
    otimizacao, tanto para
38 %facilitar a analise quanto para refletir que a
39 %rigidez do penulo estatica.
40
41
42
43 valores = [K M 0.5175 0 0.5 0.5 0.5]; %constantes para o controle.
44 freq = 0.5; % Frequencia de oscilacao, hz
45 amp = 0.02; % Altura da oscilacao, m
```

```

46 modo = 1; % 1 = skyhook , 2 = groundhook , 3 = hidbrido , 4 = LSQ, 5=
    otimizacao skyhook
47
48 % checa se a variavel x j existe ou se desejado rodar a simula o
49 % novamente.
50 if exist('x','var') == 0 || redo == 1
51 %     x = zeros(length(tempo),4);
52     x = [0;0;0;0];
53     dx = [0;0];
54     ddx = zeros(length(tempo),2);
55
56 %     ddx1 = zeros(length(tempo1),2);
57 %     ddx2 = zeros(length(tempo2),2);
58 %     ddx3 = zeros(length(tempo3),2);
59
60     redo = 0;
61     resul = zeros(length(tempo),4);
62     resul_frequencia = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),3);
63     resul_frequencia1 = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),1);
64     resul_frequencia2 = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),1);
65     resul_frequencia3 = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),1);
66 end
67
68
69 %[t,resul] = ode45(@(t,resul) somatorioForcas(resul,U,M,K,modo,
    valores),tempo,x);
70 mode = 3; % define se a analise ser no dominio da frequencia, do tempo
    via fourier ou do tempo
71 if mode == 1
72     U=0;
73     Kutil = Kotmeestatico/M(1); %K1
74     ki = M(2)/M(1);
75
76     for r = 1:n
77         for s = 1:n
78
79             Kmenosutil = Kotimizacao(r)/M(1); %K2
80             Cutil = Cotimizacao(s)/M(1);
81
82
83             kd = (ki.*freqotimizacao.^4-(Kutil+Kmenosutil+Kmenosutil*ki)
                .*freqotimizacao.^2+Kutil*Kmenosutil)+ 1j*(Kutil*Cutil.*
                freqotimizacao-freqotimizacao.^3*Cutil*(1+ki));
84
85             Hst = (Kutil*(Kmenosutil+ 1j*(Cutil.*freqotimizacao)))/(kd);
86             Hst = abs(Hst).^2;
87             Htt = (-Kutil*(Kmenosutil + 1j*(Cutil.*freqotimizacao)-(
                freqotimizacao.^2)))/(kd);
88             [resul_frequencia(r,s,1),resul_frequencia(r,s,2)] = max((Htt

```



```

-1));
89   %resul_frequencia(r,s,2) = freqotimizacao(resul_frequencia(r,
      s,2))./(((1. - (Cotimizacao(s)./(4 * Kotimizacao(r). *M(1))
      .^0.5).^2)).^0.5);
90   resul_frequencia(r,s,2) = (Kotimizacao(r)*Kotmeestatico/(
      Kotimizacao(r)+Kotmeestatico)/M(1))^0.5;
91   if abs(resul_frequencia(r,s,2)) > 10*1e1
92       resul_frequencia(r,s,2) = 0;
93   end
94
95
96   resul_frequencia(r,s,3) = (trapz(freqotimizacao ,Hst))/length(
      freqotimizacao);
97   if r == 32 && s == 32
98       hold on
99       figure(5)
100      plot(freqotimizacao/2/pi ,Hst)
101      figure(6)
102      plot(freqotimizacao/2/pi ,abs(Hst)/(length(freqotimizacao
      )))
103      hold off
104   end
105   end
106   end
107   % hold off
108   % plots
109   hold on
110
111   figure(1)
112   %h1 = surf(Kotimizacao ,razamort ,abs(resul_frequencia(:,: ,1)) , (abs(
      freqotmnatural(resul_frequencia(:,: ,2))).*(abs(freqotmnatural(
      resul_frequencia(:,: ,2))<=200*2*pi)))));
113   h1 = surf(Cotimizacao ,Kotimizacao ,abs(resul_frequencia(:,: ,1)) , abs(
      resul_frequencia(:,: ,2))/2/pi);
114   xlabel('C')
115   ylabel('K')
116   set(h1,'LineStyle','none')
117
118   figure(2)
119   h2 = surf(Cotimizacao(:) ,Kotimizacao(:) ,abs(resul_frequencia(:,: ,1)) ,
      log10(abs(resul_frequencia(:,: ,1))));
120   xlabel('C')
121   ylabel('K')
122   set(h2,'LineStyle','none')
123
124
125   figure(3)
126   %h3 = surf(Kotimizacao ,razamort ,real(resul_frequencia(:,: ,3)) , real(
      resul_frequencia(:,: ,3)));

```

```

127     h3 = surf(Cotimizacao (:), Kotimizacao (:), abs(resul_frequencia (:, :, 3)))
128         ;
129     %~min(min(real(resul_frequencia (:, :, 3)))));
130     xlabel('C')
131     ylabel('K')
132     set(h3, 'LineStyle', 'none')
133
134
135
136     figure(4)
137     h4 = surf(Cotimizacao, Kotimizacao, abs(resul_frequencia (:, :, 2))/2/pi,
138         (abs(resul_frequencia (:, :, 2))/2/pi));
139     set(h4, 'LineStyle', 'none')
140     xlabel('C')
141     ylabel('K')
142     hold off
143
144     elseif mode == 2
145         pp = 1;
146         U = wgn(length(tempo), 1, 1);
147         tt = 1:1:length(tempo);
148         odeset('Vectorized', 'on')
149         %for i = tempo
150             %ddx(pp, :) = somatorioForcas(x, U(pp), M, K, 1, modo, valores);
151             %dx = [ dx(1)+ddx(pp, 1)*dt; dx(2)+ddx(pp, 2)*dt ];
152             %x = [ x(1)+dx(1)*dt; x(2)+dx(2)*dt; dx(1); dx(2) ];
153             [te, x] = ode45(@(t, x) somatorioForcas(t, x, U, M, K, 2e3, modo,
154                 valores), tt, [0, 0, 0, 0]);
155             resul=x;
156             %pp = pp + 1;
157         %end
158         hold on
159
160         figure(1)
161         XX = fft(resul(:, 1), length(te));
162         F = ((0:1/length(te):1-1/length(te))/dt);
163         plot(F(1:length(te)/2), abs(XX(1:length(te)/2)));
164
165         hold off
166
167     elseif mode == 3
168         pp = 1;
169         % U = wgn(length(tempo), 1, 1);
170         % U1 = wgn(length(tempo), 1, 1);
171         % U2 = wgn(length(tempo), 1, 1);
172         %odeset('Vectorized', 'on');
173         %[te, x1] = ode45(@(t, x) somatorioForcas(t, x, [U, U1, U2], M, K, 2e3,

```

```

        modo, valores), tt, [0,0,0,0]);
173 for i = tempo
174
175     U = sin(i*2*pi*freq)*amp;
176     % U = 0.02;
177     ddx(pp,:) = somatorioForcas(1, x, U, M, K, 1200, modo, valores);
178     dx = [dx(1)+ddx(pp,1)*dt;dx(2)+ddx(pp,2)*dt];
179     x = [x(1)+dx(1)*dt;x(2)+dx(2)*dt; dx(1); dx(2)];
180 %     x = [x(1)+dx(1)*dt+ddx(pp,1)*dt^2/2;x(2)+dx(2)*dt+ddx(pp,2)*dt
181 %         ^2/2; dx(1); dx(2)];
181     resul(pp,:)=x;
182     pp = pp + 1;
183 end
184
185 %     XX = fft(resul(:,1),length(tempo));
186 % %     X1 = fft(x1(:,1),length(te));
187 %     F = ((0:1/length(tempo):1-1/length(tempo))/dt);
188 %     figure(3)
189 %     hold on
190 %     plot(F(1:length(tempo)/2),abs(XX(1:length(tempo)/2))/length(U));
191 %     plot(F(1:length(te)/2),abs(X1(1:length(te)/2)));
192 %     hold off
193 figure(2)
194
195 %     plot(t, resul(1:length(x1),1)-x1(:,1));
196 %     hold on
197
198 plot(tempo, resul(:,1));
199 xlabel('Tempo')
200 ylabel('Deslocamento (m)')
201 % plot(tempo, resul(:,2));
202 % plot(tempo, resul(:,3));
203 % plot(tempo, resul(:,4));
204 % plot(tempo, ddx(:,1));
205 %     plot(tempo, sin(tempo*2*pi*freq)*amp);
206 %     hold off
207
208
209 elseif mode == 4
210     U = wgn(length(tempo),1,1);
211 %     F = ((0:1/length(tempo):1-1/length(tempo))/dt);
212 Massa = M(1);
213
214 parfor r = 1:n
215     for s = 1:n
216         resul1 = zeros(length(tempo),1);
217         resul2 = zeros(length(tempo),1);
218         %resul3 = zeros(length(tempo));
219         %resul4 = zeros(length(tempo));

```

```

220     variavel_teste = wgn(length(tempo)*2,1,1);
221 %     pp = 1;
222     x = [0; 0; 0; 0];
223     dx = [0;0];
224
225     K = [Kotimizacao(r),10500];
226     C = Cotimizacao(s);
227     valores = [K M C/(2*(K(1)*Massa).^0.5) 0 0.5 0.5 0.5];
228
229
230     %ddx = zeros(length(tempo),2);
231 %     tt = 1:length(tempo);
232     for pp = 1:length(tempo)
233 %
234         ddx = somatorioForcas(pp, x, U, M, K, C, modo, valores);
235         dx = [dx(1)+ddx(3)*dt;dx(2)+ddx(4)*dt];
236         x = [x(1)+dx(1)*dt;x(2)+dx(2)*dt; dx(1); dx(2)];
237
238         resul1(pp) = x(1);
239         resul2(pp) = x(2);
240         %resul3(pp) = x(3);
241         %resul4(pp) = x(4);
242
243     end
244     x=resul1;
245     %[te,x] = ode45(@(t,x) somatorioForcas(t, x, U, M, K, C, modo
246         , valores), tt, [0,0,0,0]);
247     te = tempo;
248
249     XX = fft(x(:),length(te));
250     YY = fft(resul2(:),length(te));
251     F = ((0:1/length(te):1-1/length(te))/dt);
252     resul_frequencia3(r,s) = trapz(F,abs(XX).^2);
253
254     %[resul_frequencia1(r,s),resul_frequencia2(r,s)] = max(abs(XX
255         ));
256     [resul_frequencia1(r,s),resul_frequencia2(r,s)] = max(abs(YY
257         .* (fft(U,length(te)).^-1) -1));
258     %resul_frequencia(r,s,2) = freqotimizacao(resul_frequencia(r,
259         s,2))./((1.-(Cotimizacao(s)./(4*Kotimizacao(r).*M(1))
260         .^0.5).^2).^0.5);
261
262     resul_frequencia2(r,s) = F(resul_frequencia2(r,s));
263
264     if abs(resul_frequencia2(r,s)) > 5*1e1
265         resul_frequencia2(r,s) = -100;
266     end
267     if isnan(resul_frequencia1(r,s))

```

```

264         resul_frequencial(r,s) = -100;
265     end
266
267     %         if s == n
268     %             hold on
269     %             figure(5)
270     %             plot(H)
271     %             figure(6)
272     %             plot(abs(H))
273     %
274     %         end
275     end
276 end
277
278 figure(1)
279
280 %h1 = surf(Kotimizacao,razamort,abs(resul_frequencia(:,:,1)), (abs(
    freqotmnatural(resul_frequencia(:,:,2)).*(abs(freqotmnatural(
    resul_frequencia(:,:,2))<=200*2*pi)))));
281 h1 = surf(Cotimizacao,Kotimizacao,abs(resul_frequencial(:,:)), abs(
    resul_frequencial(:,:)));
282 xlabel('C')
283 ylabel('K')
284 set(h1,'LineStyle','none')
285
286 figure(2)
287 h2 = surf(Cotimizacao(:),Kotimizacao(:),abs(resul_frequencial(:,:)),
    log10(abs(resul_frequencial(:,:))));
288 xlabel('C')
289 ylabel('K')
290 set(h2,'LineStyle','none')
291
292
293 figure(3)
294 %h3 = surf(Kotimizacao,razamort,real(resul_frequencia(:,:,3)), real(
    resul_frequencia(:,:,3)));
295 h3 = surf(Cotimizacao(:),Kotimizacao(:),real(resul_frequencia3(:,:)))
    ;
296 xlabel('C')
297 ylabel('K')
298 set(h3,'LineStyle','none')
299
300
301
302
303 figure(4)
304 h4 = surf(Cotimizacao,Kotimizacao,abs(resul_frequencia2(:,:))/2/pi, (
    abs(resul_frequencia2(:,:))/2/pi));
305 set(h4,'LineStyle','none')

```

```

306
307 end
308 %[X,Y] = meshgrid(logspace(K0,K1,2000),logspace(C0,C1,2000));
309
310
311
312
313
314
315 hold off
316 redo = 1;

```

5.4 Solução numérica

```

1  redo = 1;
2
3
4  K0 = 3;
5  K1 = 5;
6  C0 = 2;
7  C1 = 5;
8  n = 20;
9  %n = 2;
10 Kotimizacao = logspace(K0,K1,n);
11 Cotimizacao = logspace(C0,C1,n);
12
13 if exist('resul_frequencia1','var') == 0 || redo == 1
14 % x = zeros(length(tempo),4);
15 % x = [0;0;0;0];
16 % dx = [0;0];
17 % ddx = zeros(length(tempo),2);
18 %
19 % ddx1 = zeros(length(tempo1),2);
20 % ddx2 = zeros(length(tempo2),2);
21 % ddx3 = zeros(length(tempo3),2);
22
23 redo = 0;
24 % resul = zeros(length(tempo),4);
25 resul_frequencia = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),3);
26 resul_frequencia1 = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),1);
27 resul_frequencia2 = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),1);
28 resul_frequencia3 = zeros(length(Kotimizacao),length(Cotimizacao),1);
29 end
30
31 for r = 1:n
32 K = Kotimizacao(r);
33 parfor s = 1:n
34 fitness = runge_kutta_2gdl_carro_fitness([K,Cotimizacao(s),0.5,
0.5]);

```

```

35     resul_frequencia1(r,s) = fitness(1);
36     resul_frequencia2(r,s) = fitness(2);
37     resul_frequencia3(r,s) = fitness(3);
38
39     fprintf('%f, %f \n', [r,s]);
40
41     end
42     if mod(r,5) == 0
43         save('tabela_noise_r4')
44     end
45 end
46 save('tabela_noise_r4')
47 figure(1)
48 h1 = surf(Cotimizacao, Kotimizacao, abs(resul_frequencia1(:,:)), abs(
    resul_frequencia2(:,:)));
49 xlabel('C')
50 ylabel('K')
51 set(h1,'LineStyle','none')
52
53 figure(2)
54 h2 = surf(Cotimizacao(:), Kotimizacao(:), abs(resul_frequencia1(:,:)), log10
    (abs(resul_frequencia1(:,:))));
55 xlabel('C')
56 ylabel('K')
57 set(h2,'LineStyle','none')
58
59
60 figure(3)
61 %h3 = surf(Kotimizacao, raza_mort, real(resul_frequencia(:,:,3)), real(
    resul_frequencia(:,:,3)));
62 h3 = surf(Cotimizacao(:), Kotimizacao(:), real(resul_frequencia3(:,:)));
63 xlabel('C')
64 ylabel('K')
65 set(h3,'LineStyle','none')
66
67
68
69
70 figure(4)
71 h4 = surf(Cotimizacao, Kotimizacao, abs(resul_frequencia2(:,:)), (abs(
    resul_frequencia2(:,:))));
72 set(h4,'LineStyle','none')

```

5.4.1 Mapa de resposta

```

1 function fitness = runge_kutta_2gdl_carro_fitness(argumentos)
2
3 if argumentos(2) > 5e4
4     dt = 1e-4;

```

```

5  elseif argumentos(2) > 1e4
6      dt = 1e-4;
7  else
8      dt = 1e-4;
9  end
10
11 temporal = (0:dt:600);
12 t = length(temporal);
13 tempo = (1:1:t);
14 n_testes = 7;
15 U = wgn(length(tempo), n_testes, 1);
16
17 %[te, x] = ode45(@(t, x) funcao(argumentos), tempo, [0,0,0,0]);
18 K = [argumentos(1) 1e5]; %Rigidez das molas, N*m
19 M = [250 25]; %Massa dos corpos, Kg
20 C = argumentos(2);
21 zed = argumentos(3);
22 eta = argumentos(4);
23 % valores = [K M C/(2*(K(1)*M(1)).^0.5) C/(2*(K(2)*M(2)).^0.5) 0.5 0.5
24             zed];
25
26 valores = [K M C C 0.5 0.5 zed eta];
27
28
29 %[te, x] = ode23(@(t, x) somatorioForcas(t, x, U, M, K, C, 0, valores),
30               tempo, [0,0,0,0]);
31
32
33 % x = [0;0;0;0];
34 % dx = [0;0];
35
36
37 y = zeros(t,1);
38 z = zeros(t,1);
39
40 F = ((0:1/t:1-1/t)/dt);
41
42
43 bsize = length(F);
44 XX = zeros(bsize,1);
45 YY = zeros(bsize,1);
46
47 for j = 1:n_testes
48     x = [0;0;0;0];
49     dx = [0;0];
50
51     for pp = tempo
52         %U = sin(i*2*pi*freq)*amp;
53         ddx = somatorioForcas(1/(dt^0.5), x, U(pp,j), M, K, C, 8, valores
54             );
55         %
56         x = [x(1)+dx(1)*dt+ddx(1)*dt^2/2; x(2)+dx(2)*dt+ddx(2)*dt^2/2;
57             dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
58         dx = [dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
59         x = [x(1)+dx(1)*dt; x(2)+dx(2)*dt; dx(1); dx(2)];

```



```

50         z(pp) = z(pp) + x(1);
51         y(pp) = y(pp) + x(2);
52     end
53     %fprintf('%i \n', j)
54     XX = XX + abs(fft(z))/n_testes/t;
55     YY = YY + abs(fft(y))/n_testes/t;
56 end
57
58 clear K M C valores U tempo z y n_testes temporal dt bsize;
59
60 XX = XX(1:floor(t/2));
61 XX = abs(XX).^2;
62 XX = smoothdata(XX,'gaussian','includenan','SmoothingFactor',0.17);
63 YY = YY(1:floor(t/2));
64 YY = smoothdata(YY,'gaussian','includenan','SmoothingFactor',0.17);
65
66 % fitness = max(YY);
67 % uga = fft(U);
68 % uga = uga(1:floor(t/2));
69 % figure(1);
70 % plot(F(1:floor(t/2)),abs(XX));
71 % figure(2);
72 % plot(F(1:floor(t/2)),abs(YY));
73 [temp1,temp2] = max(YY);
74 fitness = [temp1 F(temp2) trapz(F(1:floor(t/2)),XX)];
75 % fitness = trapz(F(1:floor(t/2)),XX);
76 % fitness = max(YY);
77 % fitness = y;
78 if any(isnan(fitness))
79     fitness = [-1 -1 -1];
80 %     fitness = 1e6;
81 end
82 % plot(F(1:floor(t/2)),abs(XX));
83 end

```

5.4.2 Somatório de forças utilizado para sistema com integração de Euler

```

1 function x1 = somatorioForcas(t, x, U, M, K, Cc, modo, valores)
2
3 %K carro = K(1);
4 %K roda = K(2);
5 %Massa carro = M(1);
6 %Massa roda = M(2);
7
8 % Corpo de cima = X1, Corpo de baixo = X2, Estrada = U
9 % Ordem de x: X1 X2 dX1/dt dX2/dt
10 % Equa o: dx/dt = (Mola+Amortecimento)*x-Terreno*U
11 C = controleC(x, modo, valores, Cc);

```

```

12 Mola = [ %0 0 0 0 ;
13 % 0 0 0 0 ;
14 -K(1)/M(1) K(1)/M(1) 0 0 ;
15 K(1)/M(2) -(K(1)+K(2))/M(2) 0 0];
16 Amortecimento = [%0 0 1 0 ;
17 % 0 0 0 1 ;
18 0 0 -C/M(1) C/M(1);
19 0 0 C/M(2) -C/M(2)];
20 % Terreno = [0; 0; 0; K(2)/M(2)];
21 Terreno = [ 0; K(2)/M(2)];
22
23 % if t == floor(t)
24 % Ut = U(t,1);
25 % else
26 % Ut = (U(floor(t))*(t-floor(t)) + U(ceil(t))*(ceil(t)-t))/2;
27 % end
28
29 x1 = (Mola+Amortecimento)*x+Terreno.*U*t;
30
31 end

```

5.4.3 Entrada da função para os sistemas MR com 2 graus de liberdade e função principal

```

1 path = 'Imagens/auto/';
2 fow = 71.6 ;
3 io = 0.05 ;
4 i1 = -0.08 ;
5 a0 = 1300 ;
6 a1= 1.75 ;
7 a2 = 2.85 ;
8 a3 = 1.55 ;
9 a4 = 4.6 ;
10 k0 = 112.5 ;
11 k1c = 2.5 ;
12 k1e = 5.2 ;
13 k2 = 19.4 ;
14 k3 = 2.9 ;
15 k4 = 0.095 ;
16 k5 = 0.65 ;
17 k6 = 0.12 ;
18 C1c = fow*k1c;
19 C1e = fow*k1e;
20 comeco = 0;
21 fim = 600;
22 dt = 5e-3; %segundos
23 tempo = comeco:dt:fim; %segundos
24 tamanho = length(tempo);
25 mag = 1e-3;

```

```

26 max_freq = 1/dt;
27 targ_freq = 20;
28 nbins = tamanho;
29 targ_freq_index = floor(nbins*targ_freq/max_freq);
30
31 x1 = sine_road(tempo,mag,3);
32 x2 = step_road(tamanho,mag,1/dt+1);
33 x3 = random_road(tamanho,mag)./dt^0.5;
34 key = 1;
35 modo = mode_type(key);
36
37 if 3 < 0
38 y1 = implicito_2gdl_carro_fitness([19.96e3,2e2,0.5,0.5, key, fow, io, il,
    a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6,1]);
39 y2 = implicito_2gdl_carro_fitness([19.96e3,2e2,0.5,0.5, key, fow, io, il,
    a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6,2]);
40 y3 = implicito_2gdl_carro_fitness([19.96e3,2e2,0.5,0.5, key, fow, io, il,
    a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6,3]);
41 end
42 % salva_imagem(tempo,y1(1:end-1),0, strcat(modo,"seno"),"linear",2,'(m)',
    'Tempo (s)');
43 % salva_imagem(tempo,y2(1:end-1),0, strcat(modo,"step"),"linear",2,'(m)',
    'Tempo (s)');
44 % salva_imagem(tempo,y3(1:end-1),0, strcat(modo,"barulho"),"linear",2,'(m)
    '), 'Tempo (s)');
45 %
46 % salva_imagem(tempo(1:5/dt),y1(1:5/dt),0, strcat(modo,"seno_curto"),"
    linear",2,'(m)', 'Tempo (s)');
47 % salva_imagem(tempo(1:5/dt),y2(1:5/dt),0, strcat(modo,"step_curto"),"
    linear",2,'(m)', 'Tempo (s)');
48
49 % objetos = findobj('type','figure');
50 % n = length(objetos);
51 % figure(n+1)
52 % h = plot(tempo,y1(1:end-1));
53 % xlabel('Tempo (s)')
54 % ylabel('Amplitude (m)')
55 % set(gcf,'rendermode','manual');
56 % set(gca,'fontsize',14);
57 % set(gca,'fontweight','bold');
58 % saveas(gca, strcat(path,'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
59 %
60 % objetos = findobj('type','figure');
61 % n = length(objetos);
62 % figure(n+1)
63 % h = plot(tempo,y2(1:end-1));
64 % xlabel('Tempo (s)')
65 % ylabel('Amplitude (m)')
66 % set(gcf,'rendermode','manual');

```

```

67 % set(gca, 'fontsize', 14);
68 % set(gca, 'fontweight', 'bold');
69 % saveas(gcf, strcat(path, 'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
70 %
71 % objetos = findobj('type', 'figure');
72 % n = length(objetos);
73 % figure(n+1)
74 % h = plot(tempo, y3(1:end-1));
75 % xlabel('Tempo (s)')
76 % ylabel('Amplitude (m)')
77 % set(gcf, 'renderermode', 'manual');
78 % set(gca, 'fontsize', 14);
79 % set(gca, 'fontweight', 'bold');
80 % saveas(gcf, strcat(path, 'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
81 %
82 F = ((0:1/tamanho:1-1/tamanho)/dt);
83 Y1 = abs(fft(y1(1:end-1)))/tamanho*mag;
84 Y2 = abs(fft(y2(1:end-1)))/tamanho*mag;
85 Y3 = abs(fft(y3(1:end-1)))/tamanho*mag;
86
87 Y1 = Y1(1:floor(tamanho/2));
88 Y2 = Y2(1:floor(tamanho/2));
89 Y3 = Y3(1:floor(tamanho/2));
90
91 % salva_imagem(F(1:floor(tamanho/2)), Y1, 0, strcat(modos, "seno_freq"), "
    linear", 2, '', 'Frequencia (Hz)');
92 % salva_imagem(F(1:floor(tamanho/2)), Y2, 0, strcat(modos, "step_freq"), "
    linear", 2, '', 'Frequencia (Hz)');
93 % salva_imagem(F(1:floor(tamanho/2)), Y3, 0, strcat(modos, "barulho_freq"), "
    linear", 2, '', 'Frequencia (Hz)');
94
95 salva_imagem(F(1:targ_freq_index), Y1(1:targ_freq_index), 0, strcat(modos, "
    seno_freq"), "linear", 2, '', 'Frequencia (Hz)');
96 salva_imagem(F(1:targ_freq_index), Y2(1:targ_freq_index), 0, strcat(modos, "
    step_freq"), "linear", 2, '', 'Frequencia (Hz)');
97 salva_imagem(F(1:targ_freq_index), Y3(1:targ_freq_index), 0, strcat(modos, "
    barulho_freq"), "linear", 2, '', 'Frequencia (Hz)');
98 %
99 % objetos = findobj('type', 'figure');
100 % n = length(objetos);
101 % figure(n+1)
102 % h = plot(F(1:floor(tamanho/2)), Y1);
103 % xlabel('Frequencia (Hz)')
104 % ylabel('Magnitude')
105 % set(gcf, 'renderermode', 'manual');
106 % set(gca, 'fontsize', 14);
107 % set(gca, 'fontweight', 'bold');
108 % saveas(gcf, strcat(path, 'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
109 %

```

```

110 % objetos = findobj('type','figure');
111 % n = length(objetos);
112 % figure(n+1)
113 % h = plot(F(1:floor(tamanho/2)),Y2);
114 % xlabel('Frequencia (Hz)')
115 % ylabel('Magnitude')
116 % set(gcf,'rendermode','manual');
117 % set(gca,'fontsize',14);
118 % set(gca,'fontweight','bold');
119 % saveas(gcf, strcat(path,'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
120 %
121 % objetos = findobj('type','figure');
122 % n = length(objetos);
123 % figure(n+1)
124 % h = plot(F(1:floor(tamanho/2)),Y3);
125 % xlabel('Frequencia (Hz)')
126 % ylabel('Magnitude')
127 % set(gcf,'rendermode','manual');
128 % set(gca,'fontsize',14);
129 % set(gca,'fontweight','bold');
130 % saveas(gcf, strcat(path,'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
131 %
132 % save('dados_magneto_reologico_skyhook');
133 %
134
135
136 function call = simul_tempo(r,t,modo,dt)
137     call = zeros(4, t);
138     K = [1.05e4 1e5]; %Rigidez das molas, N*m
139     M = [800 50]; %Massa dos corpos, Kg
140     valores = [K M 0 0 0.5 0.5 0.5 0.5];
141     fow = 71.6 ;
142     io = 0.05 ;
143     i1 = -0.08 ;
144     a0 = 1300 ;
145     a1= 1.75 ;
146     a2 = 2.85 ;
147     a3 = 1.55 ;
148     a4 = 4.6 ;
149     k0 = 112.5 ;
150     k1c = 2.5 ;
151     k1e = 5.2 ;
152     k2 = 19.4 ;
153     k3 = 2.9 ;
154     k4 = 0.095 ;
155     k5 = 0.65 ;
156     k6 = 0.12 ;
157     C1c = fow*k1c;
158     C1e = fow*k1e;

```

```

159     B = funcao_forcas_aux2(M, K);
160     for i = 2:1:t
161         call(:, i) = evol(call(:, i-1), r(i), dt, modo, valores, K, M,
            fow, io, il, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5,
            k6, C1c, C1e, B);
162     end
163 end
164
165 function x = evol(x, U, dt, modo, valores, K, M, fow, io, il, a0, a1, a2,
    a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6, C1c, C1e, B)
166 %     delay = 0;
167 %     if mod(i, delay) > dt
168     options = optimset('Display','off','UseParallel',0, 'MaxIter',
        400);
169     state_bank = x;
170 %     end
171
172     if (x(3)-x(4)) > 0
173         C = C1c;
174     else
175         C = C1e;
176     end
177     A_0 = funcao_forcas_aux(x, M, K, C, modo, valores);
178     ddx = (A_0*x+U.*B)*dt;
179     chute_0 = x+ddx;
180
181     vm = (abs((x(3)-x(4))^2-(x(1)-x(2))*(ddx(3)-ddx(4))))^0.5; %
        velocidade maxima calcula pela velocidade instantanea do
        amortecedor
182     valores(9) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2), state_bank(3)-
        state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c,
        k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 0)/abs(state_bank(3)-state_bank(4)));
183     valores(10) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2), state_bank(3)
        -state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c,
        k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 1e2)/abs(state_bank(3)-state_bank(4))
        );
184     if any(x) == 0 || any(isnan(valores)) == 1 || any(isinf(valores))
        == 1
185         valores(9) = 1e2;
186         valores(10) = 5e3;
187     end
188
189     forcas = @(ss) funcao_forcas(ss,U,A_0,B,dt, M, K, C, modo, valores
        , x);
190
191     x = fsolve(forcas, chute_0, options);
192
193 end
194

```

```

195 function sine_function = sine_road(t,mag,freq)
196     sine_function = sin(t*2*pi*freq)*mag;
197 end
198
199 function step_function = step_road(t,mag,instant)
200     step_function = t;
201     for i = t
202         if t < instant
203             step_function(t) = 0;
204         else
205             step_function(t) = mag;
206         end
207     end
208 end
209
210 function random_function = random_road(t,mag)
211     random_function = wgn(t,1,1).*mag;
212 end
213
214 function salva_imagem(x,y,z,nome,scale , ndim , unidade , eixo_x)
215     path = 'Imagens/auto/';
216     objetos = findobj('type','figure');
217     n = length(objetos);
218     figure(n+1);
219     if ndim == 3
220         h = surf(x,y,z);
221         set(gca, 'ZScale', scale)
222         colormap jet;
223         xlabel('C');
224         ylabel('K');
225
226         set(h,'LineStyle','none');
227         set(gca, 'XScale', scale);
228         set(gca, 'YScale', scale);
229         set(gcf,'rendermode','manual');
230         set(gca,'fontsize',14);
231         set(gca,'fontweight','bold');
232     else
233         h = plot(x,y);
234         xlabel(eixo_x);
235         ylabel(strcat('Amplitude', unidade));
236
237         if contains(eixo_x,"Frequencia (Hz)")
238             xlim([-1. inf]);
239             set(gca, 'YScale', 'log')
240         end
241         set(gcf,'rendermode','manual');
242         set(gca,'fontsize',14);
243         set(gca,'fontweight','bold');

```

```

244     end
245
246     saveas(gcf, strcat(path, 'figura_', nome, '.jpeg'));
247     saveas(gcf, strcat(path, 'figura_', nome
248 end
249
250 function modo = mode_type(key)
251     if key == 1
252         modo = "passivo_";
253     end
254     if key == 2
255         modo = "skyhook_";
256     end
257     if key == 3
258         modo = "groundhook_";
259     end
260     if key == 4
261         modo = "passivo_MR_";
262     end
263     if key == 5
264         modo = "skyhook_MR_";
265     end
266     if key == 6
267         modo = "groundhook_MR_";
268     end
269     if key == 7
270         modo = "beta_MR_";
271     end
272
273 end

```

Função filha:

```

1 function resul = implicito_2gdl_carro_fitness(argumentos)
2
3 if argumentos(2) > 5e4
4     dt = 1e-4;
5 elseif argumentos(2) > 1e4
6     dt = 1e-4;
7 else
8     dt = 5e-3;
9 end
10
11 options = optimset('Display','off','UseParallel',0, 'MaxIter', 400);
12 pow = 1e-3;
13 delay = 0/1000;
14 temporal = [zeros(1), (0:dt:600)];
15 t = length(temporal);
16 tempo = (1:1:t);
17 n_testes = 1;

```



```

18 % U = wgn(t+1,n_testes,1)/pow;
19
20 %[te,x] = ode45(@(t,x) funcao(argumentos), tempo, [0,0,0,0]);
21 K = [argumentos(1) 155.9e3]; %Rigidez das molas, N*m
22 M = [288.9 28.58]; %Massa dos corpos, Kg
23 % K = [argumentos(1) 1e5]; %Rigidez das molas, N*m
24 % M = [800 50]; %Massa dos corpos, Kg
25 C = argumentos(2);
26 zed = argumentos(3);
27 eta = argumentos(4);
28 % valores = [K M C/(2*(K(1)*M(1)).^0.5) C/(2*(K(2)*M(2)).^0.5) 0.5 0.5
    zed];
29 valores = [K M C C 0.5 0.5 zed eta];
30
31
32 %[te,x] = ode23(@(t,x) somatorioForcas(t, x, U, M, K, C, 0, valores),
    tempo, [0,0,0,0]);
33
34
35 % x = [0;0;0;0];
36 % dx = [0;0];
37
38 y = zeros(t,1);
39 z = zeros(t,1);
40
41 F = ((0:1/t:1-1/t)/dt);
42
43 bsize = length(F);
44 % XX = zeros(bsize,1);
45 % YY = zeros(bsize,1);
46
47
48 %%%
49 if argumentos(5) < 4
50     if argumentos(5) == 1
51         modo = 0;
52     elseif argumentos(5) == 2
53         modo = 9;
54     else
55         modo = 10;
56     end
57 %%%
58 if argumentos(22) == 1
59     U = sine_road(temporal,pow,3);
60 elseif argumentos(22) == 2
61     U = step_road(tempo,pow,20);
62 else
63     U = random_road(t,pow) ./ dt ^0.5;
64 end

```

```

65
66
67 B = funcao_forcas_aux2(M, K);
68 for j = 1:n_testes
69     x = [0;0;0;0];
70
71     for pp = tempo
72         % U = sin(i*2*pi*freq)*amp;
73         % if mod(temporal(pp),delay) > dt
74         %     state_bank = x;
75         %     end
76
77         A_0 = funcao_forcas_aux(x, M, K, C, modo, valores);
78         ddx = (A_0*x+U(pp).*B)*dt;
79         chute_0 = x+ddx;
80
81         % C = valores(9);
82         % if (x(3)-x(4)) > 0
83         %     C = C1c;
84         % else
85         %     C = C1e;
86         % end
87         forcas = @(ss) funcao_forcas(ss,U(pp),A_0,B,dt, M, K, C, modo,
88             valores, x);
89
90         x = fsolve(forcas, chute_0, options);
91         % if verific < 1
92         %     verific = verific
93         %     pp = pp
94         %     j = j
95         % end
96         % ddx = somatorioForcas(state_bank, x, U(pp,j));
97         % x = [x(1)+dx(1)*dt+ddx(1)*dt^2/2; x(2)+dx(2)*dt+ddx(2)*dt
98         % ^2/2; dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
99         % dx = [dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
100        % x = [x(1)+ddx(1)*dt; x(2)+ddx(2)*dt; ddx(1); ddx(2)];
101        z(pp) = z(pp) + x(1);
102        y(pp) = y(pp) + x(2);
103
104    end
105    %fprintf('%i \n', j)
106    % XX = XX + abs(fft(z))/n_testes/t*pow;
107    % YY = YY + abs(fft(y))/n_testes/t*pow;
108
109 end
110
111 else
112     if argumentos(5) == 4
113         modo = 0;

```

```

112     elseif argumentos(5) == 5
113         modo = 9;
114     else
115         modo = 10;
116     end
117     if argumentos(22) == 1
118         U = sine_road(temporal ,pow,3);
119     elseif argumentos(22) == 2
120         U = step_road(tempo ,pow,20);
121     else
122         U = random_road(t ,pow) ./ dt ^0.5;
123     end
124
125     fow = argumentos(6) ;
126     io  = argumentos(7) ;
127     i1  = argumentos(8) ;
128     a0  = argumentos(9) ;
129     a1  = argumentos(10) ;
130     a2  = argumentos(11) ;
131     a3  = argumentos(12) ;
132     a4  = argumentos(13) ;
133     k0  = argumentos(14) ;
134     k1c = argumentos(15) ;
135     k1e = argumentos(16) ;
136     k2  = argumentos(17) ;
137     k3  = argumentos(18) ;
138     k4  = argumentos(19) ;
139     k5  = argumentos(20) ;
140     k6  = argumentos(21) ;
141
142     B = funcao_forcas_aux2(M, K);
143     for j = 1:n_testes
144         x = [0;0;0;0];
145         % dx = [0;0];
146         % ddx = [0;0];
147         % state_bank = x;
148
149         for pp = tempo
150             % U = sin(i*2*pi*freq)*amp;
151             % if mod(temporal(pp),delay) > dt
152             % state_bank = x;
153             % end
154             state_bank = x;
155             A_0 = funcao_forcas_aux(x, M, K, C, modo, valores);
156             ddx = (A_0*x+U(pp).*B)*dt;
157             chute_0 = x+ddx;
158
159             vm = (abs((x(3)-x(4))^2-(x(1)-x(2))*(ddx(3)-ddx(4))))^0.5; %
                velocidade maxima calcula pela velocidade instantanea do

```

```

160         amortecedor
valores(9) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2), state_bank
    (3)-state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2, a3, a4, k0
    , k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 0)/abs(state_bank(3)-
    state_bank(4)))*3;
161     valores(10) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2),
    state_bank(3)-state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2,
    a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 1e2)/abs(
    state_bank(3)-state_bank(4)))*3;
162     if any(x) == 0 || any(isnan(valores)) == 1 || any(isinf(
    valores)) == 1 || any((valores(9:10)) > 1e4) == 1
163         valores(9) = 1e2;
164         valores(10) = 5e3;
165     end
166     % C = valores(9);
167     % if (x(3)-x(4)) > 0
168     % C = C1c;
169     % else
170     % C = C1e;
171     % end
172     forcas = @(ss)funcao_forcas(ss,U(pp),A_0,B,dt,M,K,C,modo,
    valores,x);
173
174     x = fsolve(forcas,chute_0,options);
175     % if verific < 1
176     % verific = verific
177     % pp = pp
178     % j = j
179     % end
180     % ddx = somatorioForcas(state_bank,x,U(pp,j));
181     % x = [x(1)+dx(1)*dt+ddx(1)*dt^2/2; x(2)+dx(2)*dt+ddx(2)*dt
    ^2/2; dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
182     % dx = [dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
183     % x = [x(1)+ddx(1)*dt; x(2)+ddx(2)*dt; ddx(1); ddx(2)];
184     z(pp) = z(pp) + x(1);
185     y(pp) = y(pp) + x(2);
186
187
188     end
189     %fprintf('%i \n',j)
190     % XX = XX + abs(fft(z))/n_testes/t*pow;
191     % YY = YY + abs(fft(y))/n_testes/t*pow;
192 end
193 end
194 % clear K M C valores U tempo z y n_testes temporal dt bsize;
195
196 % XX = XX(1:floor(t/2));
197 % XX = abs(XX).^2;
198 % XX = smoothdata(XX,'gaussian','includenan','SmoothingFactor',0.17);

```

```

199 % YY = YY(1:floor(t/2));
200 % YY = smoothdata(YY, 'gaussian', 'includenan', 'SmoothingFactor', 0.17);
201 %
202 % % fitness = max(YY);
203 % % uga = fft(U);
204 % % uga = uga(1:floor(t/2));
205 % figure(1);
206 % plot(F(1:floor(t/2)), abs(XX));
207 % figure(2);
208 % plot(F(1:floor(t/2)), abs(YY));
209 %
210 % [temp1, temp2] = max(YY);
211 % fitness = [temp1 F(temp2) trapz(F(1:floor(t/2)), XX)];
212 % % fitness = trapz(F(1:floor(t/2)), XX);
213 % % fitness = max(YY);
214 % % fitness = y;
215 % if any(isnan(fitness))
216 %     fitness = [-1 -1 -1];
217 % % fitness = 1e6;
218 % end
219 % plot(F(1:floor(t/2)), abs(XX));
220 resul = z;
221 end
222
223 function sine_function = sine_road(t, mag, freq)
224     sine_function = sin(t*2*pi*freq)*mag;
225 end
226
227 function step_function = step_road(t, mag, instant)
228     step_function = t;
229     for i = t
230         if i < instant
231             step_function(i) = 0;
232         else
233             step_function(i) = mag;
234         end
235     end
236
237 end
238
239 function random_function = random_road(t, mag)
240     random_function = wgn(t, 1, 1).*mag;
241 end

```

5.4.4 Entrada da função para os sistemas MR com 4 graus de liberdade

```

1 path = 'Imagens/auto/';
2 fow = 71.6*4 ;
3 io = 0.05 ;

```

```

4  i1 = -0.08 ;
5  a0 = 1300 ;
6  a1= 1.75 ;
7  a2 = 2.85 ;
8  a3 = 1.55 ;
9  a4 = 4.6 ;
10 k0 = 112.5 ;
11 k1c = 2.5 ;
12 k1e = 5.2 ;
13 k2 = 19.4 ;
14 k3 = 2.9 ;
15 k4 = 0.095 ;
16 k5 = 0.65 ;
17 k6 = 0.12 ;
18 C1c = fow*k1c;
19 C1e = fow*k1e;
20 comeco = 0;
21 fim = 600;
22 dt = 5e-4; %segundos
23 tempo = comeco:dt:fim; %segundos
24 tamanho = length(tempo);
25 mag = 1e-3;
26 max_freq = 1/dt;
27 targ_freq = 20;
28 nbins = tamanho;
29 targ_freq_index = floor(nbins*targ_freq/max_freq);
30
31
32 x1 = sine_road(tempo,mag,3);
33 x2 = step_road(tamanho,mag,1/dt+1);
34 x3 = random_road(tamanho,mag)./dt^0.5;
35 key = 4;
36 modo = mode_type(key);
37 % modo = "groundhook_MR_4gdl_";
38 % [y1,y1b1,y1c1,y1d1] = implicito_4gdl_carro_fitness([19.96e3,2e2
    ,0.5,0.5, key, fow, io, i1, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3,
    k4, k5, k6,1]);
39
40 if 3 < 0
41 [y1,y1b1,y1c1,y1d1] = implicito_4gdl_carro_fitness([19.96e3,2e2,0.5,0.5,
    key, fow, io, i1, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6
    ,1]);
42 [y2,y2b1,y2c1,y2d1] = implicito_4gdl_carro_fitness([19.96e3,2e2,0.5,0.5,
    key, fow, io, i1, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6
    ,2]);
43 [y3,y3b1,y3c1,y3d1] = implicito_4gdl_carro_fitness([19.96e3,2e2,0.5,0.5,
    key, fow, io, i1, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6
    ,3]);
44 end

```

```

45
46 salva_imagem(tempo , y1(1: end-1) , 0 , strcat(modo, " seno " ) , " linear " , 2 , ' (m)' , '
    Tempo (s)' );
47 salva_imagem(tempo , y2(1: end-1) , 0 , strcat(modo, " step " ) , " linear " , 2 , ' (m)' , '
    Tempo (s)' );
48 salva_imagem(tempo , y3(1: end-1) , 0 , strcat(modo, " barulho " ) , " linear " , 2 , ' (m)'
    , ' Tempo (s)' );
49
50 salva_imagem(tempo(1:5/ dt) , y1(1:5/ dt) , 0 , strcat(modo, " seno_curto " ) , " linear
    " , 2 , ' (m)' , ' Tempo (s)' );
51 salva_imagem(tempo(1:5/ dt) , y2(1:5/ dt) , 0 , strcat(modo, " step_curto " ) , " linear
    " , 2 , ' (m)' , ' Tempo (s)' );
52
53 F = ((0:1/tamanho:1-1/tamanho)/ dt);
54 Y1 = abs( fft(y1(1: end-1)))/tamanho*mag;
55 Y2 = abs( fft(y2(1: end-1)))/tamanho*mag;
56 Y3 = abs( fft(y3(1: end-1)))/tamanho*mag;
57
58 Y1 = Y1(1: floor(tamanho/2));
59 Y2 = Y2(1: floor(tamanho/2));
60 Y3 = Y3(1: floor(tamanho/2));
61
62 salva_imagem(F(1: floor(tamanho/2)) , Y1, 0 , strcat(modo, " seno_freq " ) , " linear
    " , 2 , '' , 'Frequencia (Hz)' );
63 salva_imagem(F(1: floor(tamanho/2)) , Y2, 0 , strcat(modo, " step_freq " ) , " linear
    " , 2 , '' , 'Frequencia (Hz)' );
64 salva_imagem(F(1: floor(tamanho/2)) , Y3, 0 , strcat(modo, " barulho_freq " ) , "
    linear " , 2 , '' , 'Frequencia (Hz)' );
65
66 salva_imagem(F(1: targ_freq_index) , Y1(1: targ_freq_index) , 0 , strcat(modo, "
    seno_freq " ) , " linear " , 2 , '' , 'Frequencia (Hz)' );
67 salva_imagem(F(1: targ_freq_index) , Y2(1: targ_freq_index) , 0 , strcat(modo, "
    step_freq " ) , " linear " , 2 , '' , 'Frequencia (Hz)' );
68 salva_imagem(F(1: targ_freq_index) , Y3(1: targ_freq_index) , 0 , strcat(modo, "
    barulho_freq " ) , " linear " , 2 , '' , 'Frequencia (Hz)' );
69
70
71 modo = strcat(" rot_" , mode_type(key));
72
73 salva_imagem(tempo , y1c1(1: end-1) , 0 , strcat(modo, " seno " ) , " linear " , 2 , ' (rad)
    ' , ' Tempo (s)' );
74 salva_imagem(tempo , y2c1(1: end-1) , 0 , strcat(modo, " step " ) , " linear " , 2 , ' (rad)
    ' , ' Tempo (s)' );
75 salva_imagem(tempo , y3c1(1: end-1) , 0 , strcat(modo, " barulho " ) , " linear " , 2 , ' (
    rad)' , ' Tempo (s)' );
76
77 salva_imagem(tempo(1:5/ dt) , y1c1(1:5/ dt) , 0 , strcat(modo, " seno_curto " ) , "
    linear " , 2 , ' (rad)' , ' Tempo (s)' );
78 salva_imagem(tempo(1:5/ dt) , y2c1(1:5/ dt) , 0 , strcat(modo, " step_curto " ) , "

```

```

    linear",2,' (rad)', 'Tempo (s)');
79
80 F = ((0:1/tamanho:1-1/tamanho)/dt);
81 Y1 = abs(fft(y1c1(1:end-1)))/tamanho*mag;
82 Y2 = abs(fft(y2c1(1:end-1)))/tamanho*mag;
83 Y3 = abs(fft(y3c1(1:end-1)))/tamanho*mag;
84
85 Y1 = Y1(1:floor(tamanho/2));
86 Y2 = Y2(1:floor(tamanho/2));
87 Y3 = Y3(1:floor(tamanho/2));
88
89 salva_imagem(F(1:floor(tamanho/2)),Y1,0, strcat(modos," seno_freq"), " linear
    ",2,'','Frequencia (Hz)');
90 salva_imagem(F(1:floor(tamanho/2)),Y2,0, strcat(modos," step_freq"), " linear
    ",2,'','Frequencia (Hz)');
91 salva_imagem(F(1:floor(tamanho/2)),Y3,0, strcat(modos," barulho_freq"), "
    linear",2,'','Frequencia (Hz)');
92
93 salva_imagem(F(1:targ_freq_index),Y1(1:targ_freq_index),0, strcat(modos,"
    seno_freq"), " linear",2,'','Frequencia (Hz)');
94 salva_imagem(F(1:targ_freq_index),Y2(1:targ_freq_index),0, strcat(modos,"
    step_freq"), " linear",2,'','Frequencia (Hz)');
95 salva_imagem(F(1:targ_freq_index),Y3(1:targ_freq_index),0, strcat(modos,"
    barulho_freq"), " linear",2,'','Frequencia (Hz)');
96 % objetos = findobj('type','figure');
97 % n = length(objetos);
98 % figure(n+1)
99 % h = plot(tempo,y1(1:end-1));
100 % xlabel('Tempo (s)')
101 % ylabel('Amplitude (m)')
102 % set(gcf,'rendermode','manual');
103 % set(gca,'fontsize',14);
104 % set(gca,'fontweight','bold');
105 % saveas(gca, strcat(path,'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
106 %
107 % objetos = findobj('type','figure');
108 % n = length(objetos);
109 % figure(n+1)
110 % h = plot(tempo,y2(1:end-1));
111 % xlabel('Tempo (s)')
112 % ylabel('Amplitude (m)')
113 % set(gcf,'rendermode','manual');
114 % set(gca,'fontsize',14);
115 % set(gca,'fontweight','bold');
116 % saveas(gcf, strcat(path,'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
117 %
118 % objetos = findobj('type','figure');
119 % n = length(objetos);
120 % figure(n+1)

```



```

121 % h = plot(tempo, y3(1:end-1));
122 % xlabel('Tempo (s)')
123 % ylabel('Amplitude (m)')
124 % set(gcf, 'renderermode', 'manual');
125 % set(gca, 'fontsize', 14);
126 % set(gca, 'fontweight', 'bold');
127 % saveas(gcf, strcat(path, 'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
128 %
129
130 %
131 % objetos = findobj('type', 'figure');
132 % n = length(objetos);
133 % figure(n+1)
134 % h = plot(F(1:floor(tamanho/2)), Y1);
135 % xlabel('Frequencia (Hz)')
136 % ylabel('Magnitude')
137 % set(gcf, 'renderermode', 'manual');
138 % set(gca, 'fontsize', 14);
139 % set(gca, 'fontweight', 'bold');
140 % saveas(gcf, strcat(path, 'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
141 %
142 % objetos = findobj('type', 'figure');
143 % n = length(objetos);
144 % figure(n+1)
145 % h = plot(F(1:floor(tamanho/2)), Y2);
146 % xlabel('Frequencia (Hz)')
147 % ylabel('Magnitude')
148 % set(gcf, 'renderermode', 'manual');
149 % set(gca, 'fontsize', 14);
150 % set(gca, 'fontweight', 'bold');
151 % saveas(gcf, strcat(path, 'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
152 %
153 % objetos = findobj('type', 'figure');
154 % n = length(objetos);
155 % figure(n+1)
156 % h = plot(F(1:floor(tamanho/2)), Y3);
157 % xlabel('Frequencia (Hz)')
158 % ylabel('Magnitude')
159 % set(gcf, 'renderermode', 'manual');
160 % set(gca, 'fontsize', 14);
161 % set(gca, 'fontweight', 'bold');
162 % saveas(gcf, strcat(path, 'figura_skyhook_', num2str(n), '.jpeg'))
163 %
164 % save('dados_magneto_reologico_skyhook');
165 %
166
167
168 function call = simul_tempo(r, t, modo, dt)
169     call = zeros(4, t);

```

```

170     K = [1.05e4 1e5]; %Rigidez das molas, N*m
171     M = [800 50]; %Massa dos corpos, Kg
172     valores = [K M 0 0 0.5 0.5 0.5 0.5];
173     fow = 71.6 ;
174     io = 0.05 ;
175     i1 = -0.08 ;
176     a0 = 1300 ;
177     a1= 1.75 ;
178     a2 = 2.85 ;
179     a3 = 1.55 ;
180     a4 = 4.6 ;
181     k0 = 112.5 ;
182     k1c = 2.5 ;
183     k1e = 5.2 ;
184     k2 = 19.4 ;
185     k3 = 2.9 ;
186     k4 = 0.095 ;
187     k5 = 0.65 ;
188     k6 = 0.12 ;
189     C1c = fow*k1c;
190     C1e = fow*k1e;
191     B = funcao_forcas_aux2(M, K);
192     for i = 2:1:t
193         call(:, i) = evol(call(:, i-1), r(i), dt, modo, valores, K, M,
194             fow, io, i1, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5,
195             k6, C1c, C1e, B);
196     end
197     end
198     function x = evol(x, U, dt, modo, valores, K, M, fow, io, i1, a0, a1, a2,
199         a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6, C1c, C1e, B)
200     %     delay = 0;
201     %     if mod(i, delay) > dt
202         options = optimset('Display','off','UseParallel',0, 'MaxIter',
203             400);
204         state_bank = x;
205     %     end
206
207     if (x(3)-x(4)) > 0
208         C = C1c;
209     else
210         C = C1e;
211     end
212     A_0 = funcao_forcas_aux(x, M, K, C, modo, valores);
213     ddx = (A_0*x+U.*B)*dt;
214     chute_0 = x+ddx;
215
216     vm = (abs((x(3)-x(4))^2-(x(1)-x(2))*(ddx(3)-ddx(4))))^0.5; %
217         velocidade maxima calcula pela velocidade instantanea do

```

```

    amortecedor
214     valores(9) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2), state_bank(3)-
        state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c,
        k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 0)/abs(state_bank(3)-state_bank(4)));
215     valores(10) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2), state_bank(3)
        -state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c,
        k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 1e2)/abs(state_bank(3)-state_bank(4))
        );
216     if any(x) == 0 || any(isnan(valores)) == 1 || any(isinf(valores))
        == 1
217         valores(9) = 1e2;
218         valores(10) = 5e3;
219     end
220
221     forcas = @(ss) funcao_forcas(ss,U,A_0,B,dt, M, K, C, modo, valores
        , x);
222
223     x = fsolve(forcas ,chute_0 ,options);
224
225 end
226
227 function sine_function = sine_road(t,mag,freq)
228     sine_function = sin(t*2*pi*freq)*mag;
229 end
230
231 function step_function = step_road(t,mag,instant)
232     step_function = t;
233     for i = t
234         if t < instant
235             step_function(t) = 0;
236         else
237             step_function(t) = mag;
238         end
239     end
240 end
241
242 function random_function = random_road(t,mag)
243     random_function = wgn(t,1,1).*mag;
244 end
245
246 function salva_imagem(x,y,z,nome,scale, ndim, unidade, eixo_x)
247     path = 'Imagens/auto/';
248     objetos = findobj('type','figure');
249     n = length(objetos);
250     figure(n+1);
251     if ndim == 3
252         h = surf(x,y,z);
253         set(gca, 'ZScale', scale)
254         colormap jet;

```

```

255     xlabel('C');
256     ylabel('K');
257
258     set(h,'LineStyle','none');
259     set(gca, 'XScale', scale);
260     set(gca, 'YScale', scale);
261     set(gcf,'rendermode','manual');
262     set(gca,'fontSize',14);
263     set(gca,'fontweight','bold');
264     else
265     h = plot(x,y);
266     xlabel(eixo_x);
267     ylabel(strcat('Amplitude', unidade));
268
269     if contains(eixo_x,"Frequencia (Hz)")
270         xlim([-1. inf]);
271         set(gca, 'YScale', 'log')
272     end
273
274     set(gcf,'rendermode','manual');
275     set(gca,'fontSize',14);
276     set(gca,'fontweight','bold');
277     end
278
279 %     saveas(gcf, strcat(path, 'figura_', nome, '.jpeg'));
280 %     saveas(gcf, strcat(path, 'figura_', nome
281 end
282
283 function modo = mode_type(key)
284     if key == 1
285         modo = "passivo_4gdl_";
286     end
287     if key == 2
288         modo = "skyhook_4gdl_";
289     end
290     if key == 3
291         modo = "groundhook_4gdl_";
292     end
293     if key == 4
294         modo = "passivo_MR_4gdl_";
295     end
296     if key == 5
297         modo = "skyhook_MR_4gdl_";
298     end
299     if key == 6
300         modo = "groundhook_MR_4gdl_";
301     end
302     if key == 7
303         modo = "beta_MR_4gdl_";

```

304 **end**

305

306 **end**

Função filha:

```
1 function [z, y, w, q] = implicito_4gdl_carro_fitness(argumentos)
2
3 if argumentos(2) > 5e4
4     dt = 1e-4;
5 elseif argumentos(2) > 1e4
6     dt = 1e-4;
7 else
8     dt = 5e-4;
9 end
10 velocidade = 10; %m/s
11 options = optimset('Display','off','UseParallel',0, 'MaxIter', 400);
12 pow = 1e-3;
13 delay = 0/1000;
14 temporal = [zeros(1), (0:dt:600)];
15 t = length(temporal);
16 tempo = (1:1:t);
17 n_testes = 1;
18 % U = wgn(t+1,n_testes,1)/pow;
19 d1 = 0.9; %metros
20 d2 = 1.1; %metros
21 % [te, x] = ode45(@(t, x) funcao(argumentos), tempo, [0,0,0,0]);
22 K = [argumentos(1) 155.9e3 argumentos(1) 155.9e3]; %Rigidez das molas, N
    *m
23 M = [288.9*2      28.58      277.34      28.58]; %Massa dos corpos, Kg
24 % K = [argumentos(1) 1e5]; %Rigidez das molas, N*m
25 % M = [800 50]; %Massa dos corpos, Kg
26 C = [argumentos(2) argumentos(2)];
27 zed = argumentos(3);
28 eta = argumentos(4);
29 % valores = [K M C/(2*(K(1)*M(1)).^0.5) C/(2*(K(2)*M(2)).^0.5) 0.5 0.5
    zed];
30 valores = [K M C C 0.5 0.5 zed eta zed eta];
31
32
33 % [te, x] = ode23(@(t, x) somatorioForcas(t, x, U, M, K, C, 0, valores),
    tempo, [0,0,0,0]);
34
35
36 % x = [0;0;0;0];
37 % dx = [0;0];
38
39 q = zeros(t,1);
40 w = zeros(t,1);
41 y = zeros(t,1);
```

```

42 z = zeros(t,1);
43
44 F = ((0:1/t:1-1/t)/dt);
45
46 bsize = length(F);
47 % XX = zeros(bsize,1);
48 % YY = zeros(bsize,1);
49
50
51 %%%
52 if argumentos(5) < 4
53     if argumentos(5) == 1
54         modo = 0;
55     elseif argumentos(5) == 2
56         modo = 9;
57     else
58         modo = 10;
59     end
60
61     if argumentos(22) == 1
62         U_f = sine_road(temporal,pow,3);
63         U_t = [zeros(1,ceil((d1+d2)/velocidade/dt)) U_f];
64 %     U_t = [sine_road(ceil((d1+d2)/velocidade/dt),pow,3) U_f];
65     elseif argumentos(22) == 2
66         U_f = step_road(tempo,pow,20);
67         U_t = [zeros(1,ceil((d1+d2)/velocidade/dt)) U_f];
68     else
69         U_f = random_road(t,pow) ./ dt ^0.5;
70         U_t = [zeros(1,ceil((d1+d2)/velocidade/dt)) U_f];
71     end
72
73
74 B = funcao_forcas_aux2_4gd1(M, K);
75 for j = 1:n_testes
76     x = [0;0;0;0;0;0;0;0];
77
78     for pp = tempo
79 %         U = sin(i*2*pi*freq)*amp;
80 %         if mod(temporal(pp),delay) > dt
81 %             state_bank = x;
82 %         end
83         U_inst = [0;0;0;B(4).*U_f(pp);0;0;0;B(8).*U_t(pp)];
84
85         A_0 = funcao_forcas_aux_4gd1(x, M, K, C, modo, valores);
86         ddx = (A_0*x+U_inst).*dt;
87         chute_0 = x+ddx;
88
89         if any(x) == 0 || any(isnan(valores)) == 1 || any(isinf(
            valores)) == 1

```

```

90         valores(9) = 1e2;
91         valores(10) = 5e3;
92     end
93
94
95     forcas = @(ss) funcao_forcas_4gd1(ss, U_inst, A_0, 1, dt, M, K, C,
          modo, valores, x);
96
97     x = fsolve(forcas, chute_0, options);
98     %     if verific < 1
99     %         verific = verific
100    %         pp = pp
101    %         j = j
102    %     end
103    %     ddx = somatorioForcas(state_bank, x, U(pp, j));
104    %     x = [x(1)+dx(1)*dt+ddx(1)*dt^2/2; x(2)+dx(2)*dt+ddx(2)*dt
^2/2; dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
105    %     dx = [dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
106    %     x = [x(1)+ddx(1)*dt; x(2)+ddx(2)*dt; ddx(1); ddx(2)];
107    z(pp) = z(pp) + x(1);
108    y(pp) = y(pp) + x(2);
109    w(pp) = w(pp) + x(5);
110    q(pp) = q(pp) + x(6);
111
112    end
113    %fprintf('%i \n', j)
114    %    XX = XX + abs(fft(z))/n_testes/t*pow;
115    %    YY = YY + abs(fft(y))/n_testes/t*pow;
116    end
117 else
118     fow = argumentos(6) ;
119     io = argumentos(7) ;
120     i1 = argumentos(8) ;
121     a0 = argumentos(9) ;
122     a1 = argumentos(10) ;
123     a2 = argumentos(11) ;
124     a3 = argumentos(12) ;
125     a4 = argumentos(13) ;
126     k0 = argumentos(14) ;
127     k1c = argumentos(15) ;
128     k1e = argumentos(16) ;
129     k2 = argumentos(17) ;
130     k3 = argumentos(18) ;
131     k4 = argumentos(19) ;
132     k5 = argumentos(20) ;
133     k6 = argumentos(21) ;
134
135     % Clc = fow*k1c;
136     % Cle = fow*k1e;

```

```

137  %%%
138
139  if argumentos(5) == 4
140      modo = 0;
141  elseif argumentos(5) == 5
142      modo = 9;
143  else
144      modo = 10;
145  end
146
147  if argumentos(22) == 1
148      U_f = sine_road(temporal,pow,3);
149      U_t = [zeros(1,ceil((d1+d2)/velocidade/dt)) U_f];
150  %     U_t = [sine_road(ceil((d1+d2)/velocidade/dt),pow,3) U_f];
151  elseif argumentos(22) == 2
152      U_f = step_road(tempo,pow,20);
153      U_t = [zeros(1,ceil((d1+d2)/velocidade/dt)) U_f];
154  else
155      U_f = random_road(t,pow)./dt^0.5;
156      U_t = [zeros(1,ceil((d1+d2)/velocidade/dt)) U_f];
157  end
158
159
160  B = funcao_forcas_aux2_4gdl(M, K);
161  for j = 1:n_testes
162      x = [0;0;0;0;0;0;0;0];
163  %     dx = [0;0];
164  %     ddx = [0;0];
165  %     state_bank = x;
166
167      for pp = tempo
168  %         U = sin(i*2*pi*freq)*amp;
169  %         if mod(temporal(pp),delay) > dt
170  %             state_bank = x;
171  %         end
172      U_inst = [0;0;0;B(4).*U_f(pp);0;0;0;B(8).*U_t(pp)];
173      state_bank = x;
174      A_0 = funcao_forcas_aux_4gdl(x, M, K, C, modo, valores);
175      ddx = (A_0*x+U_inst).*dt;
176      chute_0 = x+ddx;
177
178      vm = (abs((x(3)-x(4))^2-(x(1)-x(2))*(ddx(3)-ddx(4))))^0.5; %
179      %     velocidade maxima calcula pela velocidade instantanea do
180      %     amortecedor
181      valores(9) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2), state_bank
182          (3)-state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2, a3, a4, k0
183          , klc, kle, k2, k3, k4, k5, k6, 0)/abs(state_bank(3)-
184          state_bank(4)));
185      valores(10) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(2),

```



```

state_bank(3)-state_bank(4), vm, fow, io, il, a0, a1, a2,
a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 1e2)/abs(
state_bank(3)-state_bank(4));
181
vm = (abs((x(3)-x(8))^2-(x(1)-x(2))*(ddx(3)-ddx(8))))^0.5;
182
valores(11) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(6),
183 state_bank(3)-state_bank(8), vm, fow, io, il, a0, a1, a2,
a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 0)/abs(
state_bank(3)-state_bank(8)));
184
valores(12) = abs(wang(state_bank(1)-state_bank(6),
state_bank(3)-state_bank(8), vm, fow, io, il, a0, a1, a2,
a3, a4, k0, k1c, k1e, k2, k3, k4, k5, k6, 1e2)/abs(
state_bank(3)-state_bank(8)));
185
if any(x(3:4)) == 0 || any(isnan(valores(9:10))) == 1 || any(
186 isinf(valores(9:10))) == 1 || any((valores(9:10)) > 1e4)
== 1
187 valores(9) = 1e2;
188 valores(10) = 5e3;
189 end
190 if any([x(3) x(8)]) == 0 || any(isnan(valores(11:12))) == 1
|| any(isinf(valores(11:12))) == 1 || any((valores(11:12))
> 5e4)
191 valores(11) = 1e2;
192 valores(12) = 5e3;
193 end
194
195 if argumentos(5) == 4
196 C = [valores(9) valores(11)];
197 end
198 % if (x(3)-x(4)) > 0
199 % C = Clc;
200 % else
201 % C = Cle;
202 % end
203 %
204 forcas = @(ss) funcao_forcas_4gdl(ss, U_inst, A_0, 1, dt, M, K, C,
modo, valores, x);
205
206 x = fsolve(forcas, chute_0, options);
207 % if any(x > 1e2)
208 % kkkkk = 'wtf'
209 % end
210 % if verific < 1
211 % verific = verific
212 % pp = pp
213 % j = j
214 % end
215 % ddx = somatorioForcas(state_bank, x, U(pp, j));

```

```

216     %           x = [x(1)+dx(1)*dt+ddx(1)*dt^2/2; x(2)+dx(2)*dt+ddx(2)*dt
           ^2/2; dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
217     %           dx = [dx(1)+ddx(1)*dt; dx(2)+ddx(2)*dt];
218     %           x = [x(1)+ddx(1)*dt; x(2)+ddx(2)*dt; ddx(1); ddx(2)];
219     z(pp) = z(pp) + x(1);
220     y(pp) = y(pp) + x(2);
221     w(pp) = w(pp) + x(5);
222     q(pp) = q(pp) + x(6);
223
224     end
225     %fprintf('%i \n',j)
226     %     XX = XX + abs(fft(z))/n_testes/t*pow;
227     %     YY = YY + abs(fft(y))/n_testes/t*pow;
228     end
229 end
230 % clear K M C valores U tempo z y n_testes temporal dt bsize;
231
232 % XX = XX(1:floor(t/2));
233 % XX = abs(XX).^2;
234 % XX = smoothdata(XX, 'gaussian', 'includenan', 'SmoothingFactor',0.17);
235 % YY = YY(1:floor(t/2));
236 % YY = smoothdata(YY, 'gaussian', 'includenan', 'SmoothingFactor',0.17);
237 %
238 % % fitness = max(YY);
239 % % uga = fft(U);
240 % % uga = uga(1:floor(t/2));
241 % figure(1);
242 % plot(F(1:floor(t/2)),abs(XX));
243 % figure(2);
244 % plot(F(1:floor(t/2)),abs(YY));
245 %
246 % [temp1,temp2] = max(YY);
247 % fitness = [temp1 F(temp2) trapz(F(1:floor(t/2)),XX)];
248 % % fitness = trapz(F(1:floor(t/2)),XX);
249 % % fitness = max(YY);
250 % % fitness = y;
251 % if any(isnan(fitness))
252 %     fitness = [-1 -1 -1];
253 % %     fitness = 1e6;
254 % end
255 % plot(F(1:floor(t/2)),abs(XX));
256 % resul = [z y w q];
257 end
258
259 function sine_function = sine_road(t,mag,freq)
260     sine_function = sin(t*2*pi*freq)*mag;
261 end
262
263 function step_function = step_road(t,mag,instant)

```

```

264     step_function = t;
265     for i = t
266         if i < instant
267             step_function(i) = 0;
268         else
269             step_function(i) = mag;
270         end
271     end
272
273 end
274
275 function random_function = random_road(t,mag)
276     random_function = wgn(1,t,1).*mag;
277 end

```

5.4.5 Somatório de forças com 2 graus de liberdade, amortecimento MR e integração Crank-Nicholson com funções filhas

```

1  function z = funcao_forcas(x, U, A_0, B, dt, M, K, Cc, modo, valores, v0)
2
3  %K carro      = K(1);
4  %K roda      = K(2);
5  %Massa carro = M(1);
6  %Massa roda  = M(2);
7
8  % Corpo de cima = X1, Corpo de baixo = X2, Estrada = U
9  % Ordem de x: X1 X2 dX1/dt dX2/dt
10 % Equação: dx/dt = (Mola+Amortecimento)*x-Terreno*U
11 % vm = (x(2)^2-x(3)*x(1))^0.5;
12 % atualmente, t representa o valor de x como mensurado pelo medidor
13
14
15 % U_b = U(0)+U(1)*;
16
17 % if t == floor(t)
18 %     Ut = U(t,1);
19 % else
20 %     Ut = (U(floor(t))*(t-floor(t)) + U(ceil(t))*(ceil(t)-t))/2;
21 % end
22 I= eye(4,4);
23 arg1 = (I+A_0.*dt./2);
24 A_1 = funcao_forcas_aux(x, M, K, Cc, modo, valores);
25 arg2 = (I-A_1.*dt./2);
26 z = -arg2*x+(arg1*v0+B.*U*dt);
27
28 end

```

Função filha:

```

1  function A = funcao_forcas_aux(x_0, M, K, Cc, modo, valores)

```

```

2
3
4 C = controleC(x_0, modo, valores, Cc);
5
6 Mola = [ 0 0 0 0 ;
7 0 0 0 0 ;
8 -K(1)/M(1) K(1)/M(1) 0 0 ;
9 K(1)/M(2) -(K(1)+K(2))/M(2) 0 0];
10 Amortecimento = [0 0 1 0 ;
11 0 0 0 1 ;
12 0 0 -C/M(1) C/M(1);
13 0 0 C/M(2) -C/M(2)];
14 % B = [ 0; K(2)/M(2)];
15
16 A = Mola+Amortecimento;
17 end

```

Função filha:

```

1 function B = funcao_forcas_aux2(M, K)
2
3
4 B = [0; 0; 0; K(2)/M(2)];
5 % B = [ 0; K(2)/M(2)];
6
7 end

```

5.4.6 Somatório de forças com 4 graus de liberdade, amortecimento MR e integração Crank-Nicholson com funções filhas

```

1 function z = funcao_forcas_4gdl(x, U, A_0, B, dt, M, K, Cc, modo, valores
, v0)
2
3 %K carro = K(1);
4 %K roda = K(2);
5 %Massa carro = M(1);
6 %Massa roda = M(2);
7
8 % Corpo de cima = X1, Corpo de baixo = X2, Estrada = U
9 % Ordem de x: X1 X2 dX1/dt dX2/dt
10 % Equação: dx/dt = (Mola+Amortecimento)*x-Terreno*U
11 % vm = (x(2)^2-x(3)*x(1))^0.5;
12 % atualmente, t representa o valor de x como mensurado pelo medidor
13
14
15 % U_b = U(0)+U(1)*;
16
17 % if t == floor(t)
18 % Ut = U(t,1);
19 % else

```

```

20 %    Ut = (U(floor(t))*(t-floor(t)) + U(ceil(t))*(ceil(t)-t))/2;
21 % end
22 I= eye(8,8);
23 arg1 = (I+A_0.*dt./2);
24 A_1 = funcao_forcas_aux_4gdl(x, M, K, Cc, modo, valores);
25 arg2 = (I-A_1.*dt./2);
26 z = -arg2*x+(arg1*v0+B.*U.*dt);
27
28 end

```

Função filha:

```

1  function A = funcao_forcas_aux_4gdl(x_0, M, K, Cc, modo, valores)
2
3  %# d1 = distancia da roda 1 ao cg; d2 = distancia da roda 2 (traseira)
   ao cg; J = momento de inercia da carroceria; dt = distancia total da
   carroceria
4  %K carro      = K(1), K(3); (frontal-traseira)
5  %K roda      = K(2), K(4); (frontal-traseira)
6  %Massa carro = M(1), M(3); (Total - InerciaJ)
7  %Massa roda  = M(2), M(4); (frontal-traseira)
8  % Sentido esquerda direita , com theta positivo
9  %
10 %
11 %
12 d1 = 0.9;
13 d2 = 1.1;
14
15 posf = [(x_0(1)+d1*x_0(5)) x_0(2) (x_0(3)+d1*x_0(7)) x_0(4)];
16 post = [(x_0(1)-d2*x_0(5)) x_0(6) (x_0(3)-d2*x_0(7)) x_0(8)];
17 Cf = controleC(posf, modo, valores, Cc(1));
18 valores(9) = valores(11);
19 valores(10) = valores(12);
20 Ct = controleC(post, modo, valores, Cc(2));
21
22 Mola          = [ 0              0
                   0              0
                   0              0
                   0              0
                   ; %posi   o x1          - CG da carroceria
                   0              0
                   0              0
                   0              0
                   0              0
                   ; %posi   o x2
                   - roda frontal
23   -(K(1)+K(3))./M(1)          K(1)./M(1)
                   0              0
                   (d1.*K(1)-d2.*K(3))./M(1)          K(3)./M(1)

```

```

0
0
; %velocidade x1 - CG da carroceria
25 K(1) ./M(2) - (K(1)+K(2)) ./M(2)
0 0
d1 .*K(1) ./M(2) 0
0 0
; %velocidade x2 -
roda frontal
26 0 0 0
0 0
0 0
0 0
; %posi o x3
- angulo da carroceria
27 0 0
0 0
0 0
0 0
; %
posi o x4 - roda traseira
28 (d1 .*K(1)-d2 .*K(3)) ./M(3) -d1 *K(1) ./M
(3) 0
0 (d1 ^2 .*K(1)-d2 ^2 .*K
(3)) ./M(3) d2 *K(3) /M(3)
0
0 ; %
velocidade x3 - velocidade angular
da carroceria
29 K(3) ./M(4) 0
0
0
-d2 .*K(3) ./M(4)
-(K(3)+K(4)) ./M(4)
0
0 ] ; %velocidade
x4 - roda traseira
30
31 Amortecimento = [ 0 0
1 0
0 0 ; %
0 0

```

```

32      posi o x1 - CG da carroceria
0      0      0      0      1
      0      0      0      0
      0      0      0      0
      ; %posi o x2 - roda frontal
33      0
0      0
      -(Cf+Ct) ./M(1)      Cf ./M(1)
      0      0
      (d1 .* Cf - d2
      .* Ct) ./M(1)      Ct ./M(1)
      ; %velocidade x1 - CG da carroceria
34      0
0      0
      Cf ./M(2)
      -Cf ./M(2)      0
      0
      d1 .* Cf ./M(2)      0
      ; %velocidade x2 - roda frontal
35      0
0      0      0
      0      0      0
      0      0      0
      1      0
      ; %posi o x3
      - angulo da carroceria
36      0
0      0      0
      0      0      0
      0      0      0
      1
      ; %posi o x4 -
      roda traseira
37      0
0      0      (d1
      .* Cf - d2 .* Ct) ./M(3)      -d1 .* Cf ./M(3)
      0      0
      (d1 ^ 2 .* Cf - d2 ^ 2 .* Ct
      ) ./M(3)      d2 .* Ct ./M(3)      ; %
      velocidade x3 - velocidade angular
      da carroceria

```



```

22 elseif modo == 2
23     K2 = valores(2);
24     M2 = valores(4);
25     ksy_ground = valores(6);
26     C = 2*ksy_ground*((K2*M2)^0.5*x(4)) / (x(3)-x(4));
27     if x(4) == x(3)
28         C = max(1200,Coptm) ;
29     end
30
31 elseif modo == 3
32     K1 = valores(1);
33     K2 = valores(2);
34     M1 = valores(3);
35     M2 = valores(4);
36     ksy_sky = valores(5);
37     ksy_ground = valores(6);
38     alpha = valores(7);
39     beta = valores(8);
40     C = alpha*2*ksy_sky*(K1*M1*x(3)) / (x(4)-x(3))+ beta*2*ksy_ground*(K2
        *M2*x(4)) / (x(3)-x(4));
41     if x(4) == x(3)
42         C = max(1200,Coptm) ;
43     end
44 elseif modo == 4
45     % temporario , ainda n o finalizado
46     C = 1e3;
47
48 elseif modo == 5
49 %     K1 = valores(1);
50 %     M1 = valores(3);
51 %     ksy_sky = valores(5);
52     z = valores(9);
53 %     C = 2*ksy_sky*(K1*M1)^0.5* abs(x(3) / (x(3)-x(4)) ) ;
54     C = Coptm* (x(3) / (x(3)-x(4)) ) ;
55     if C > Coptm*(1+z)
56         C = Coptm*(1+z);
57     end
58     if C < Coptm*(1-z)
59         C = Coptm*(1-z);
60     end
61     if x(4) == x(3)
62         C = max(1200,Coptm) ;
63     end
64
65
66
67
68 elseif modo == 6
69 %     K2 = valores(2);

```

```

70 %     M2 = valores(4);
71 %     ksy_ground = valores(6);
72     z = valores(9);
73 %     C = 2*ksy_ground*(K2*M2)^0.5* abs(x(4) / (x(4)-x(3)) ) ;
74     C = Coptm*(-x(4) / (x(3)-x(4)) ) ;
75     if C > Coptm*(1+z)
76         C = Coptm*(1+z);
77     end
78     if C < Coptm*(1-z)
79         C = Coptm*(1-z);
80     end
81     if x(4) == x(3)
82         C = max(1200,Coptm) ;
83     end
84
85     elseif modo == 7
86 %     K1 = valores(1);
87 %     M1 = valores(3);
88 %     ksy_sky = valores(5);
89     z = valores(9);
90     eta = valores(10);
91 %     C = 2*ksy_sky*(K1*M1)^0.5* abs(x(3) / (x(3)-x(4)) ) ;
92     C = Coptm*( x(3) / (x(3)-x(4)) ) ;
93     if C > Coptm*(1+z)
94         C = Coptm*(1+z);
95     end
96     if C < Coptm*(1-eta)
97         C = Coptm*(1-eta);
98     end
99     if x(4) == x(3)
100         C = max(1200,Coptm) ;
101     end
102
103     elseif modo == 8
104 %     K2 = valores(2);
105 %     M2 = valores(4);
106 %     ksy_ground = valores(6);
107     z = valores(9);
108     eta = valores(10);
109 %     C = 2*ksy_ground*(K2*M2)^0.5* abs(x(4) / (x(4)-x(3)) ) ;
110     C = Coptm*(-x(4) / (x(3)-x(4)) ) ;
111     if C > Coptm*(1+z)
112         C = Coptm*(1+z);
113     end
114     if C < Coptm*(1-eta)
115         C = Coptm*(1-eta);
116     end
117     if x(4) == x(3)
118         C = max(1200,Coptm) ;

```

```

119     end
120 elseif modo == 9
121     %     K2 = valores(2);
122     %     M2 = valores(4);
123     %     ksy_ground = valores(6);
124     z = valores(9);
125     eta = valores(10);
126     %     C = 2*ksy_ground*(K2*M2)^0.5* abs(x(4) / (x(4)-x(3)) ) ;
127     C = Coptm*(x(3) / (x(3)-x(4)) ) ;
128     if C > eta
129         C = eta;
130     end
131     if C < z
132         C = z;
133     end
134     if x(4) == x(3)
135         C = 0;
136     end
137
138 elseif modo == 10
139     %     K2 = valores(2);
140     %     M2 = valores(4);
141     %     ksy_ground = valores(6);
142     z = valores(9);
143     eta = valores(10);
144     %     C = 2*ksy_ground*(K2*M2)^0.5* abs(x(4) / (x(4)-x(3)) ) ;
145     C = Coptm*(-x(4) / (x(3)-x(4)) ) ;
146     if C > eta
147         C = eta;
148     end
149     if C < z
150         C = z;
151     end
152     if x(4) == x(3)
153         C = 0;
154     end
155 else
156     C = 1000;
157
158 end
159
160 end

```

Validação do modelo de Wang:

```

1 % fow = 2.757;
2 % io = 0.085;
3 % il = -0.353;
4 % a0 = 1826;
5 % a1= - 4.441;

```

```

6 % a2 = 0.04;
7 % a3 = -0.033;
8 % a4 = 0.769;
9 % k0 = 58.2;
10 % k1c = 7.96;
11 % k1e = 6.4;
12 % k2 = 59.4;
13 % k3 = 8.48;
14 % k4 = 0.019;
15 % k5 = -0.013;
16 % k6 = 0.013;
17
18 fow = 71.6 ;
19 io = 0.05 ;
20 i1 = -0.08 ;
21 a0 = 1300 ;
22 a1= 1.75 ;
23 a2 = 2.85 ;
24 a3 = 1.55 ;
25 a4 = 4.6 ;
26 k0 = 112.5 ;
27 k1c = 7 ;
28 k1e = 3.2 ;
29 % k1c = 5.2;
30 % k1e = k1c*2/exp(1);
31 % k1c = 5.2;
32 % k1e = 2.5;
33 k2 = 19.4 ;
34 k3 = 2.9 ;
35 k4 = 0.095 ;
36 k5 = 0.65 ;
37 k6 = 0.12 ;
38
39 for I = (0:1:150)
40
41 n = 1e4;
42 te = linspace(0,10,n);
43 % I = 0.0;
44 % A = 2.5e-3;
45 vm = 0.2;
46 freq = 0.5;
47 A = vm/(2*pi*freq);
48 % A = 2.5e-3;
49 % freq = vm/(2*pi*A);
50 u = cos(2*pi*freq*te)*A;
51 ud = -sin(2*pi*freq*te)*2*pi*freq*A;
52 % vm = 2*pi*freq*A;
53 % f = wang(u(t), ud(t), vm, fow, io, i1, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c, k1e
, k2, k3, k4, k5, k6, I);

```

```

54 f = linspace(0,100,1000);
55
56 vd = k6*vm;
57 ft = fow*(1+exp(a1*vm))*(1+k2/(1+exp(-a2*(I+io)))-k2/(1+exp(-a2*io))) ;
58 fd = k5*ft;
59 alpha = a0/(1+k0*vm);
60 vh = -k4*vm* (1+k3/(1+exp(-a3*(I+i1)))-k3/(1+exp(-a3*i1))) ;
61 kvc = k1c*exp(-a4*vm);
62 kve = k1e*exp(-a4*vm);
63
64 for t = 1:n
65     f(t) = wang2(u(t), ud(t), vd, vh, ft, fd, alpha, kvc, kve);
66 end
67 hold on
68 plot(ud,f,'DisplayName',compose("%.2f A",I));
69 hold off
70 end
71 grid on;
72 xlabel('Velocidade (m/s)');
73 ylabel('For a (N)');
74 legend('Location','southeast');
75 yticks((-4000:800:1600));
76 ylim([-4000,1600]);
77 xlim([-0.24,0.24]);

```

Função auxiliar para a validação:

```

1 function f = wang(u, ud, vm, fow, io, i1, a0, a1, a2, a3, a4, k0, k1c,
2     k1e, k2, k3, k4, k5, k6, I)
3
4 vd = k6*vm;
5 ft = fow*(1+exp(a1*vm))*(1+k2/(1+exp(-a2*(I+io)))-k2/(1+exp(-a2*io)));
6 fd = k5*ft;
7 alpha = a0/(+k0*vm);
8 vh = -sign(u)*k4*vm*(1+k3/(1+exp(-a3*(I+i1)))-k3/(1+exp(-a3*i1)));
9
10 t = exp(-alpha*(ud+vh+vd));
11 f = ft*((1-t)/(1+t))-fd;
12 if ud >= 0
13     kvc = k1c*exp(-a4*vm);
14     f = f*(1+kvc*abs(ud));
15 else
16     kve = k1e*exp(-a4*vm);
17     f = f*(1+kve*abs(ud));
18 end
19
20
21 end

```

Função auxiliar para os modelos MR:

```
1 function f = wang2(u, ud, vd, vh, ft, fd, alpha, kvc, kve)
2
3
4
5
6 vh = sign(u)*vh;
7
8 t = exp(-alpha*(ud+vh+vd));
9 F = ft*((1-t)/(1+t))-fd;
10 if ud >= 0
11     f = F*(1+kvc*abs(ud));
12 else
13     f = F*(1+kve*abs(ud));
14 end
15
16
17 end
```