

**FRANCISCO TAGOMORI LOPES  
JOSÉ IGNACIO WINDISCH OLENSCKI**

**E-CARGO BIKE - FRAME DESIGN PARA  
ENTREGAS URBANAS EM LOGÍSTICAS DE  
CURTA DISTÂNCIA**

São Paulo  
2021

**FRANCISCO TAGOMORI LOPES  
JOSÉ IGNACIO WINDISCH OLENSCKI**

**E-CARGO BIKE - FRAME DESIGN PARA  
ENTREGAS URBANAS EM LOGÍSTICAS DE  
CURTA DISTÂNCIA**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do Título de Engenheiro Mecatrônico.

São Paulo  
2021

**FRANCISCO TAGOMORI LOPES  
JOSÉ IGNACIO WINDISCH OLENSCKI**

**E-CARGO BIKE - FRAME DESIGN PARA  
ENTREGAS URBANAS EM LOGÍSTICAS DE  
CURTA DISTÂNCIA**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do Título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador:  
Prof. Dr. Marcílio Alves

São Paulo  
2021

## Dedicatória

## **ACKNOWLEDGMENTS**

Primeiramente a Deus, a Nossa Senhora e aos santos padroeiros São José e Santo Inácio de Loyola e São Francisco pelas graças obtidas.

Aos meus pais que me incentivaram a cada momento e não permitiram que eu desistisse, aos meus irmãos e irmãs pela compreensão quando me afastei dos afazeres domésticos

Ao meu professor orientador que me acompanhou durante todos esses meses, dando todo o auxílio necessário para a evolução do projeto

Aos meus professores do curso de Engenharia Mecatrônica, que me forneceram um ensino de excelência.

Aos meus amigos, pela compreensão e apoio apesar das ausências e afastamento temporário

José Ignacio Windisch Olenscki e Francisco Tagomori Lopes dos Santos

*“Epígrafe”*

-”A human and a bicycle are the perfect synthesis of body and machine” - Richard Ballantine

## RESUMO

Bicicletas cargueiras elétricas tem surgido como fortes alternativas não poluentes ao transporte urbano. Com o objetivo de desenvolver uma adaptação de e-Cargo Bike no cenário brasileiro, realizou-se a modelagem, através de um algoritmo em *Python*, do quadro estrutural de uma bicicleta, utilizando como base teórica o modelo de Carvallo-Whipple e as análises de estabilidade de Meijaard. Ao final do projeto, obteve-se uma configuração de quadro plenamente estável sob diversas condições de uso.

**Palavras-Chave** – e-Cargo Bike, Bicycle Stability, Whipple Model, Design Flow, Electric Bicycle.

## ABSTRACT

Electric cargo bikes have emerged as strong non-polluting alternatives to urban transportation. Aiming to develop an adaptation of an e-Cargo Bike in the Brazilian scenario, a modeling of the structural frame of the bicycle was performed, using the Carvallo-Whipple model and Meijaard's stability analyses as theoretical basis. At the end of the project, a fully stable frame configuration was obtained under various conditions of use.

**Keywords** – e-Cargo Bike, Bicycle Stability, Whipple Model, Design Flow, Electric Bicycle.

## LIST OF FIGURES

1	Pesquisa da Aliança Bikes sobre a remuneração dos entregadores por aplicativo . . . . .	15
2	Entregadores da empresa Rappi utilizando bicicletas . . . . .	16
3	Topologias de bicicletas cargueiras. Retirado de <a href="http://www.bikecitizens.net">www.bikecitizens.net</a> . . .	18
4	Capacidade de carga dependendo da topologia. Retirado de: EUMA2021 <sup>13</sup>	18
5	Comparativo de Bicicletas com topologias diferentes. Construção própria. .	20
6	Comparativo de Bicicletas com topologias diferente. Construção própria. .	21
7	Projeto elétrico convencional de uma e-Bike de pedal assistido. Retirado de Texas Instruments <sup>9</sup> . . . . .	27
8	Tabela comparativa entre materiais . . . . .	28
9	Matriz de decisão para escolha do material . . . . .	29
10	Design Flow do projeto . . . . .	30
11	Parametrização do Modelo de Whipple. Retirado de <sup>11</sup> . . . . .	32
12	Coordenadas generalizadas do modelo adotado. Retirado de <sup>11</sup> . . . . .	33
13	Representação de uma <i>Long John</i> pelo modelo de Whipple . . . . .	33
14	Quadro da bicicleta calculado pelo código . . . . .	34
15	Modelo Carvallo-Whipple da bicicleta . . . . .	34
16	Análise da plotagem dos autovalores em função da velocidade. Retirado de <sup>11</sup>	35
17	Gráfico dos autovalores da bicicleta de referência (esquerda), e dos autovalores da cargo <i>bike</i> calculados pelo programa (direita) . . . . .	35
18	Processo de análise das dimensões da bicicleta . . . . .	36
19	Processo implementado no algoritmo Python . . . . .	37
20	Fluxograma da classe CargoBike . . . . .	37
21	Função principal para o cálculo dos parâmetros, composta pelas funções auxiliares . . . . .	38

22	Trecho do código para geração da geometria da bicicleta . . . . .	38
23	Pontos gerados pelo código . . . . .	39
24	Pontos transladados pelo código . . . . .	39
25	Trecho do código para geração da lista de massas . . . . .	40
26	Barras e suas respectivas massas . . . . .	40
27	Trecho do código para cálculo dos centros de massa . . . . .	41
28	Função para o cálculo da inercia de uma barra . . . . .	42
29	Função para aplicar o teorema dos eixos paralelos . . . . .	42
30	Geometria dos corpos do sistema . . . . .	43
31	Fluxograma da rotina para iterações de medidas . . . . .	43
32	Parâmetros iterados . . . . .	44
33	Gráfico de autovalores plotado pelo programa . . . . .	44
34	Partes STL geradas pelo código . . . . .	45
35	CAD da e-Cargo Bike . . . . .	45
36	Esboço da roda dianteira. . . . .	47
37	Exemplo de tolerância $x$ entre o quadro e roda dianteira igual a 0cm . . . . .	48
38	Nós do quadro. . . . .	48
39	Dimensões implícitas da bicicleta . . . . .	49
40	Parâmetros no cálculo do volume de carga . . . . .	50
41	Parâmetros de um tubo genérico . . . . .	51
42	Variáveis do modelo, $L_{46}, h$ e $\lambda$ . . . . .	54
43	Dimensionamento da carga dentro do bagageiro para os <i>Setups</i> 2 e 3 . . . . .	56
44	Diferença na plotagem de gráficos, utilizando a função <i>scipy.interpolate</i> . .	59
45	Velocidades mínimas estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15\text{cm}$ . . . . .	60
46	Velocidades mínimas estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15 \text{ cm}$ e $\lambda = 20^\circ$ . . . . .	61
47	Velocidades mínimas estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15 \text{ cm}$ e $\lambda = 27^\circ$ . . . . .	62

48	Velocidades mínimas estáveis para cada <i>Setup</i> , com a variação de $h$ . $L_{46} = 75$ cm e $\lambda = 27^\circ$ .	63
49	Range de velocidades estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15\text{cm}$ .	63
50	Range de velocidades estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15$ cm e $\lambda = 20^\circ$ .	64
51	Range de velocidades estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15$ cm e $\lambda = [16^\circ : 20^\circ]$	65
52	Range de velocidades estáveis para cada <i>Setup</i> . $\lambda = 20^\circ$ .	65
53	Velocidades mínimas estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15$ cm e $\lambda = 16^\circ$ .	67
54	Velocidades máximas estáveis para cada <i>Setup</i> . $h = 15$ cm e $\lambda = 16^\circ$ .	67
55	CAD do quadro + garfo	68
56	Nós do quadro da bicicleta (1 - 9)	69
57	Visão lateral do CAD da bicicleta completa.	70
58	Visão superior do CAD da bicicleta completa.	70
59	Curva de estabilidade do modelo - <i>Setup 1</i>	71
60	Curva de estabilidade do modelo - <i>Setup 2</i>	71
61	Curva de estabilidade do modelo - <i>Setup 3</i>	71
	Lista de símbolos...	

# CONTENTS

<b>Part I: INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1 Motivação</b>	<b>14</b>
1.1 Interesse Social e Econômico . . . . .	14
1.2 Mérito Técnico . . . . .	16
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>17</b>
<b>3 Objetivos</b>	<b>23</b>
<b>4 Recursos</b>	<b>24</b>
<b>Part II: DESIGN DO <i>FRAME</i></b>	<b>25</b>
<b>5 Características de e-Cargo Bikes</b>	<b>26</b>
5.1 Componentes Elétricos . . . . .	26
5.2 Montagem Mecânica . . . . .	27
<b>6 Metodologia</b>	<b>30</b>
6.1 Design Flow . . . . .	30
6.2 Requisitos de Projeto . . . . .	30
<b>7 Teoria</b>	<b>32</b>
7.1 Modelos de Bicicleta . . . . .	32
7.2 Estabilidade . . . . .	33
7.3 Equação de Movimento . . . . .	35
<b>8 Modelo Python</b>	<b>36</b>

8.1	Classe CargoBike . . . . .	37
8.2	Iteração de Modelos . . . . .	42
8.3	CAD dos Modelos . . . . .	44
<b>9</b>	<b>Design da Bicicleta</b>	<b>46</b>
9.1	Dimensões das Rodas . . . . .	46
9.1.1	Roda Traseira . . . . .	46
9.1.2	Roda Dianteira . . . . .	46
9.1.3	Manobrabilidade da roda dianteira . . . . .	47
9.2	Dimensões do Quadro . . . . .	48
9.3	Cargo Space . . . . .	49
9.3.1	Volume de carga . . . . .	49
9.3.2	Massa do quadro . . . . .	50
9.3.3	MPW - Maximum Permissible Weight . . . . .	51
<b>Part III: RESULTADOS</b>	<b>53</b>	
<b>10</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>54</b>
10.1	Premissas . . . . .	54
10.2	<i>Setups</i> de simulação . . . . .	55
10.3	Limites de simulação das variáveis . . . . .	56
<b>11</b>	<b>Manuseio dos dados</b>	<b>58</b>
11.1	Visualização dos dados . . . . .	58
<b>12</b>	<b>Resultado das Simulações</b>	<b>60</b>
12.1	Análise de Velocidade Mínima . . . . .	60
12.1.1	Impacto da altura $h$ na velocidade mínima estável . . . . .	62
12.2	Faixa de Velocidade Estável . . . . .	62

12.2.1 Impacto da altura $h$ no Range de velocidades estáveis . . . . .	65
<b>13 Modelo Final</b>	<b>66</b>
13.0.1 Dimensões e CAD . . . . .	66
13.0.2 Análise de Capacidade de Carga . . . . .	69
13.0.3 Estabilidade Dinâmica . . . . .	70
<b>14 Bibliografia</b>	<b>72</b>
<b>Appendix A</b>	<b>74</b>
<b>Appendix B – Beta</b>	<b>75</b>
<b>Annex A – Alpha</b>	<b>76</b>
<b>Annex B</b>	<b>77</b>

# PART I

## INTRODUÇÃO

# 1 MOTIVAÇÃO

## 1.1 Interesse Social e Econômico

O projeto escolhido visa sugerir um meio de transporte para a cidade que ainda é timidamente utilizado: a bicicleta elétrica. Esse meio de transporte não poluente pode fornecer para a cidade:

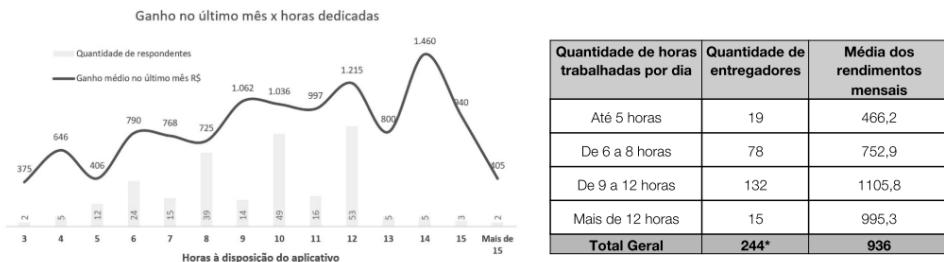
1. Alívio no trânsito de veículos;
2. Uso das grandes (ainda que não conectadas) malhas ciclovárias da cidade;
3. Consciência ecológica, fortalecendo uma cadeia logística não poluente;

As e-cargo bikes, são massivamente implantadas na Europa, sendo utilizadas como um modal logístico no transporte de cargas, sendo um case de sucesso na substituição das bicicletas tradicionais. Os motivos para o sucesso desse modal baseiam-se nas seguintes vantagens proporcionadas ao condutor:

1. Poupa esforços e uma situação degradante quando comparada às bicicletas comuns
  - Retira o peso das costas e menor esforço por pedalada;
2. Maior capacidade de carga, permitindo realizar entregas de maior peso e volume;
3. Maior segurança para o usuário e para a carga - Ao invés de transportar a carga nas costas, a carga fica em um compartimento específico.

O presente projeto não pretende desenvolver uma bicicleta elétrica por completo, mas apenas o quadro estrutural (*frame*) da mesma. A motivação para essa decisão, teve mérito técnico, como será abordado a seguir, mas também econômico: as opções que

## DEDICAÇÃO AOS APLICATIVOS



Ciclistas entregadores ganham, em média, **R\$ 936 por mês.**

Figure 1: Pesquisa da Aliança Bikes sobre a remuneração dos entregadores por aplicativo

existem hoje no mercado brasileiro passam pela importação de produtos custosos, que não oferecem vantagem competitiva com relação a outras alternativas poluentes como motocicletas e até carros. Dessa forma, a motivação econômica do projeto é oferecer uma opção de quadro estrutural simples, acessível às camadas sociais média-baixa e que possibilite a transformação de bicicletas comuns em bicicletas cargueiras motorizadas através de simples manufatura.

A motivação social se relaciona fortemente com o público alvo do produto desenvolvido: entregadores de aplicativo que utilizem bicicleta para suas entregas

De acordo com um estudo realizado pela Aliança Bikes (Figura 3.1), em São Paulo, a média da remuneração mensal de um entregador por aplicativo é de 936,00 Reais. Além disso, o mesmo estudo conclui que esses entregadores trabalham em média 9h24min por dia e pedalam cerca de 40km, apenas fazendo entregas. Agrava-se ainda o fato de que esses trabalhadores passam a maior parte do tempo com uma mochila térmica, carregada com itens, o que é um fator degradante não apenas para a saúde humana como para a qualidade do produto a ser entregue, uma vez que ele fica exposto a avarias, fortes angulações e até a furtos.

Como dito anteriormente, uma solução para esse problema muito utilizada nos países de alta renda são as bicicletas cargueiras, mas a ausência de produtos de qualidade nacionais torna inviável a adoção desse modal no Brasil. Um produto importado é, na maioria dos casos, inacessível para estes usuários, podendo custar entre US 1.500 e US 5.000, sem considerar taxas de importação. Dito isso, nos motiva propor uma solução economicamente viável, sustentável e de qualidade suficiente para melhorar as condições de trabalho desses trabalhadores.



Figure 2: Entregadores da empresa Rappi utilizando bicicletas

## 1.2 Mérito Técnico

As bicicletas sofreram transformações nas suas geometrias ao longo dos anos, sendo nos últimos anos uma forte tendência, a eletrificação das mesmas. A utilização de motores e baterias traz um novo grau de complexidade na utilização dos modelos matemáticos clássicos como o de Whipple, 1899.

Os modelos clássicos da literatura permitem, no entanto, a adoção das mais diversas geometrias de bicicleta, como é por exemplo o caso das bicicletas cargueiras, que são notáveis pelas suas geometrias de grande comprimento e estabilidade desafiadora. Pensando nisso, pouco se encontra hoje, da aplicação dos modelos clássicos em geometrias modernas, como é o caso das bicicletas cargueiras e bicicletas elétricas.

A motivação técnico científica é, portanto, realizar uma aplicação dos modelos já consolidados na literatura com novas complexidades como por exemplo para uma geometria específica de uma Cargo Bike e na inclusão de baterias e motores na estrutura da bicicleta. Soma-se a essas motivações anteriores, a necessidade de propor uma solução técnica que seja economicamente viável, focado na necessidade do usuário final. o que adiciona mais um nível de complexidade ao projeto.

## 2 ESTADO DA ARTE

As bicicletas cargueiras existem há dezenas de anos. O primeiro registro de uma bicicleta cargueira foi em 1877<sup>1</sup>, no Reino Unido, e desde então diversas topologias e usabilidades surgiram. Na Figura 3, temos as configurações mais comuns de 2 rodas (Einspurig) e 3 rodas (Mehrspurig). Levaremos em conta na evolução deste presente trabalho, as vantagens e desvantagens em cada uma das topologias.

Na Figura 4, retirado do mesmo site, temos a capacidade de carga recomendada para cada tipo. Existem diversos parâmetros que definem a topologia ideal para cada uso da bicicleta, e entraremos em mais detalhes na seção de Requisitos. Mas de antemão, um dos parâmetros mais importantes é o peso estimado de cada configuração, uma vez que o peso tem influência no esforço físico necessário por pedalada, nos esforços impostos a estrutura, na estabilidade, manobrabilidade, etc.

As bicicletas cargueiras, por terem um peso acumulado muito superior a bicicletas convencionais, são o parceiro perfeito no uso de motores elétricos. E por essa razão, iremos abordar em mais detalhes as bicicletas elétricas. As bicicletas elétricas podem ser divididas em 3 classes de acordo com a função do motor elétrico:

- Classe 1: Pedal Assistido - O motor apenas auxilia o movimento quando o usuário pedala. Tem velocidade máxima de 20 mph.
- Classe 2: *Throttle on demand* - O motor funciona como resposta a um movimento na manopla. Tem velocidade máxima de 20 mph.
- Classe 3: *Speed Pedelec* - Essas bicicletas precisam de um velocímetro, e podem ou não ter uma manopla de controle de velocidade. Tem velocidade máxima de 28 mph.

No Brasil, de acordo com a Resolução 465 do Contran, apenas bicicletas motorizadas de pedal assistido (Classe 1) são permitidas sem necessidade de habilitação. Nessas bicicletas, o motor apenas auxilia o movimento, realizando trabalho apenas quando o usuário está pedalando, o que as torna mais "seguras" uma vez que o usuário não pode acelerá-la sem esforço físico. Essas bicicletas também tem uma velocidade máxima de 20 mph

## CARGOBIKE TYPOLOGIE

### EINSPURIG



### MEHRSPURIG



Figure 3: Topologias de bicicletas cargueiras. Retirado de [www.bikecitizens.net](http://www.bikecitizens.net)

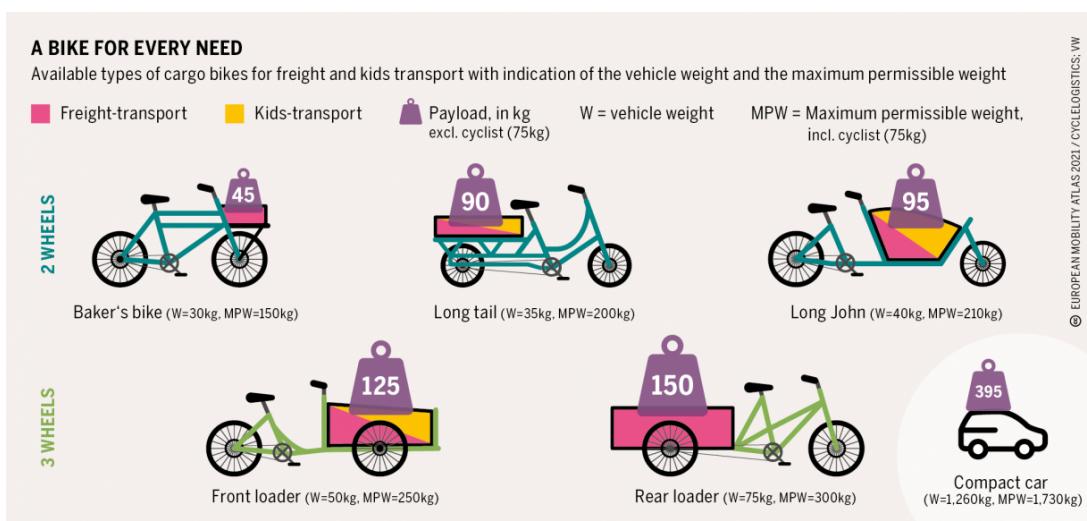


Figure 4: Capacidade de carga dependendo da topologia. Retirado de: EUMA2021<sup>13</sup>

(cerca de 32 km/h), o que as torna "friendly" no compartilhamento de ciclofaixas com bicicletas convencionais, evitando acidentes. Por essa razão, inclusive, é necessário, para bicicletas elétricas de Classe 2 e 3, uma habilitação ou autorização especial. Neste projeto, focaremos nas bicicletas Classe 1, que são a maioria hoje no mercado.

É importante para o presente leitor que tenha uma noção, ainda que básica, dos produtos que são hoje oferecidos no mercado. Para isso, preparamos uma tabela com diferentes bicicletas e suas características.

Na Figura 5, temos 6 modelos de bicicletas elétricas. Suas classificações por topologia são:

Bike 1: Bicicleta convencional

Bike 2: *Long Tail*

Bike 3: *Long Tail*

Bike 4: *Long John* de 3 rodas

Bike 5: *Long Tail*

Bike 6: *Long John*

Todas as bicicletas tem o motor e bateria incluso no preço. Cabe o adendo sobre o preço da bicicleta 3 (Laranja), que tem um preço menor (US 1.500). Essa bicicleta tem motorização *hub-gearred*, ou seja, o motor está acoplado à roda (neste caso traseira), o que do ponto de vista do mercado, é um fator "barateador" do produto. Entraremos em mais detalhes quanto as diferenças do posicionamento do motor no capítulo de Mechanical Assembly. As demais bicicletas da Figura 6 tem o motor "midmounted", configuração comum, ainda que mais cara, na maior parte das e-Bikes.

Ainda sobre a Figura 5, o leitor deve se atentar aos pesos de cada e-bike. Uma e-bike convencional, tem em torno de 24kg, enquanto bikes cargueiras de 2 rodas podem ter entre 28 e 34 kg. e-Bikes de 3 rodas (bicicleta no. 4) geralmente tem peso superior a 45 kg, sendo a apresentada na Figura com 52 kg. Por que isso é relevante? Um maior peso estrutural acarreta em menor autonomia, o que para bicicletas elétricas é um ponto chave e algo que entraremos em mais detalhes na seção de Requisitos. Na Figura 5, estão descritos os aspectos eletrônicos, elencado as diversas configurações hoje utilizadas, com seus respectivos torques, tempo de carregamento da bateria, autonomia, velocidade máxima, etc.

Além do aspecto comercial das bicicletas elétricas, é importante para o nosso tema,

Introduction		MAKE:	OHM	PRICE:	\$1,499
BIKE CLASS		SUGGESTED USE:	Urban, Commuting Neighborhood, Urban, Cargo	SUGGESTED USE:	Urban, Commuting, Cargo
TOTAL WEIGHT:	23.99 kg		28.12 kg	33.11 kg	32.0 kg
BATTERY WEIGHT:	2.67 kg		2.58 kg	3.49 kg	2.6 kg
MOTOR WEIGHT:	2.49 kg		3.99 kg	4.62 kg	4.0 kg
FRAME MATERIAL:	ADVANCE™ Hydroformed Aluminum		Chromoly Steel	6061 Aluminum Alloy	Hardened Aluminum Alloy
FRAME SIZES:	16.5 in (41.91 cm) 18.5 in (46.99 cm) 20 .5 in (52.07 cm) 22.5 in (57.15 cm)		17 in (43.18 cm)	17 in (43.18 cm)	49.5 cm
GEARING DETAILS:	10-Speed X10 Shimano Deore with One-Way Clutch, 11-36 tooth		10-Speed X10 Shimano Deore 5-L-16000 Derailleur with Shadow+, Derailleur, DNP nickel plated 11-34	11 speed	10 speed
ESTIMATED SUPPORTED WEIGHT	40 kg		80 kg	80 kg	80 kg
WHEEL SIZES:	27.5 in (69.85cm)		20 in (50.8cm) 26 in (66.04cm)	26 in (66.04cm)	20 in, 26 in

**Bicycle Details**

Figure 5: Comparativo de Bicicletas com topologias diferentes. Construção própria.

<b>MOTOR BRAND:</b>	Shimano E7000	Bosch Performance Line CX	Bosch Performance Line
<b>MOTOR TYPE:</b>	Mid-Mounted Geared Motor	Rear-Mounted Geared Motor	Mid-Mounted Geared Motor
<b>MOTOR NOMINAL OUTPUT:</b>	250 watts	250 watts	350 watts
<b>MOTOR PEAK OUTPUT:</b>	440 watts	600 watts	570 watts
<b>MOTOR TORQUE:</b>	60 Newton meters (Explore Mode); Boost and Trail are Set to Medium; LG Brand 18050 Format, 3500mA LGM1 Cells	75 Newton meters	40 Newton meters
<b>BATTERY BRAND:</b>		Bosch PowerPack 500	Samsung
<b>BATTERY VOLTAGE:</b>	36.3 volts	36 volts	36 volts
<b>BATTERY AMP HOURS:</b>	14 ah	3.4 ah (Optional 26.8 ah with Second Battery)	14 ah
<b>BATTERY WATT HOURS:</b>	508.2 wh	2.4 wh (Optional 964.8 wh with Second Battery)	672 wh
<b>BATTERY CHEMISTRY:</b>	Lithium-Ion	Lithium NCA (LiNiCoAlO <sub>2</sub> )	Lithium-Ion
<b>CHARGE TIME:</b>	7 hours	3.5 hours	3 hours
<b>ESTIMATED MIN RANGE:</b>	60 miles (97 km)	30 miles (48 km)	30 miles
<b>ESTIMATED MAX RANGE:</b>	120 miles (193 km)	160 miles (257 km)	45 miles (72 km)
<b>DRIVE MODE:</b>	Advanced Pedal Assist (Measures Rear Wheel Speed, Pedal Cadence and Pedal Torque, Power Output relative to Pedal Input)	Advanced Pedal Assist (Measures Wheel Speed, Pedal Cadence and Pedal Torque, Over 1,000 Readings/Per Second, Power Output Relative to Pedal Input: Eco 50%–40 Nm, Tour 120% 50 Nm, eMTB 120% to 300% 75Nm, Turbo 200% 75Nm)	Cadence Sensing Pedal Assist, Twist Throttle (12-Magnet Cadence Sensor)
<b>TOP SPEED:</b>	20 mph (32 km/h)	mph (28 MPH with Bosch Performance Line S)	20 mph (32 kph)
			20 mph
			20 mph

Figure 6: Comparativo de Bicicletas com topologias diferentes. Construção própria.

explicarmos o Estado da Arte bibliográfico das bicicletas cargueiras. Diversos artigos e estudos já foram feitos sobre o tema de e-cargo bikes, principalmente em universidades europeias e americanas. No entanto, pouco se encontrou sobre o tema, através de uma perspectiva de países emergentes como o Brasil.

No livro "Sustainable Transportation and Smart Logistics"<sup>3</sup>, são analisadas as aplicações de cargo bikes em operações de entrega, assim como o planejamento necessário para essa integração, apresentando seus problemas e como soluções sustentáveis podem impactar positivamente a cidade. Imaginamos esse artigo como referência na elaboração de um produto sustentável que seja bem aceito tanto pela cidade como pelos seus consumidores.

No artigo produzido por GRUBER, J. et. al<sup>4</sup>, analisa-se o uso da e-cargo bike e suas diversas configurações para substituir carros em entregas feitas dentro de cidades, explorando seu potencial mercado e comparando-o aos que existiam em 2014, utilizando tanto enquetes direcionadas a entregadores como dados de empresas atuando em diversas cidades alemãs, averiguando sua viabilidade em relação às características, em termos de entregas feitas por meio de carros e bicicletas convencionais, de suas respectivas cidades.

De modo similar, em outro artigo do mesmo autor<sup>5</sup>, analisa-se a efetividade e interesse de entregadores em e-cargo bikes através dos resultados de um projeto fundado pelo ministério alemão (German Federal Ministry for the Environment), que distribuiu e-cargo bikes para entregadores experimentarem, ao mesmo tempo que os observavam e ofereciam inquéritos para coletar suas opiniões. O projeto gera uma caracterização dos entregadores alemães, que é interpretada no artigo.

Muito já existe sobre otimização de quadros de bicicleta tradicionais, utilizando diversas ferramentas como por exemplo Método de Elementos Finitos (FEM). Dentre os artigos lidos, destaca-se o produzido por COVILLO et. al<sup>6</sup>, no qual os autores abordam e discutem sobre as diversas cargas de estresse sobre a qual um quadro de bicicleta tradicional de ferro é submetido. Este estudo será utilizado como referência para o nosso projeto, de forma a extrapolar os estudos de carga de uma bicicleta tradicional para uma bicicleta cargueira. Outro fato importante deste artigo é que os autores utilizaram Elementos de Métodos Finitos (FEM) para a elaboração da cargas e esforços no quadro, que é a mesma abordagem que pretendemos utilizar para cálculo e simulação de esforços.

### 3 OBJETIVOS

Pretendemos abordar a resolução desse problema através do desenvolvimento de um quadro de bicicleta cagueira, com a possibilidade de eletrificá-la. Para isso, iremos nos inspirar nas diversas configurações de sucesso do mercado, realizando adaptações para as condições e limitações do Brasil. Essas condições estão definidas no capítulo de Requisito de Projeto. O objetivo final é propor uma solução que não apenas atenda a todos os requisitos mas também seja satisfatória na adoção dos modelos clássicos da literatura no cálculo de estabilidade de uma estrutura tão desafiadora como é a de uma bicicleta cagueira.

A penúltima etapa da metodologia, para a resolução do problema proposto é a realização das simulações dos ensaios de estresse na estrutura, no modelo de CAD. Dessa forma, outro objetivo do projeto é ter uma estrutura com resultados positivos nas simulações.

Do ponto de vista pessoal, esperamos desenvolver uma solução que possibilite uma continuação de projeto a partir dos estudos aqui realizados, enquanto que do ponto de vista do produto, podemos enumerar os resultados esperados de forma que a bicicleta cagueira:

1. tenha simples manufatura;
2. seja economicamente viável comparado a opções estrangeiras;
3. suporte cargas típicas de entregas simples;
4. esteja adaptada para as condições das malhas ciclovárias da cidade;
5. possibilite sua eletrificação, garantindo espaço e modularidade com motores, baterias, controladores etc oferecidos pelo mercado.

## 4 RECURSOS

No desenvolvimento do modelo, utilizou-se a linguagem *Python* em conjunto com a biblioteca *BicycleParameters*, de Moore, 2012<sup>7</sup>, para realizar as análises de estabilidade da bicicleta para o Modelo de Carvallo-Whipple, 1899. A classe **Bicycles** do pacote engloba, através de métodos, todas as equações de movimento utilizadas pelos modelos de Whipple, que é essencial para o nosso projeto, e portanto foi efetivamente utilizada como classe pai no nosso módulo.

Para a modelagem do ciclista do sistema, consultamos a documentação da biblioteca *Yeadon*, de Chris Dembia<sup>19</sup>. Apesar de não diretamente utilizarmos a biblioteca no código, os dados disponibilizados foram essenciais para criar um modelo simples e preciso de um corpo humano.

Para manipulações matemáticas e de matrizes, utilizou-se funções da biblioteca *NumPy*<sup>20</sup>, como por exemplo a função `poly1d` para realizar regressões quadráticas de dados; para manipulações de dataframes, utilizou-se funções da biblioteca *Pandas*<sup>22</sup>, como por exemplo a função `read_excel` para receber dados de tabelas *Excel*; para o tratamento dos dados coletados, utilizou-se funções da biblioteca *SciPy*<sup>20</sup>, como por exemplo a função `interpolate.bisplrep` para obter representações de superfícies tridimensionais; para a plotagem de dados, utilizou-se a biblioteca *Matplotlib*<sup>21</sup>, mais especificamente as funções do `matplotlib.pyplot`, e para a visualização 3D dos modelos gerados, utilizou-se a biblioteca de CAD *py-MADCAD*<sup>18</sup>, mais especificamente as funções para geração de meshes para partes STL.

## **PART II**

**DESIGN DO *FRAME***

## 5 CARACTERÍSTICAS DE E-CARGO BIKE

### 5.1 Componentes Elétricos

Os componentes elétricos definem diversas características de uma e-Bike como torque máximo, autonomia da bateria, peso, localização do centro de massa, etc. Dentre as topologias hoje existentes, existem 3 configurações principais, que definem vários desses parâmetros e são determinadas pela posição do motor. Dessa forma, as 3 configurações existentes são:

*Mid-mounted e Hub-mounted(Front or rear-mounted)*

Na primeira configuração o motor se localiza na pedaleira (mid) enquanto que na segunda o motor está posicionado nas rodas (dianteira ou traseira).

De acordo com um estudo<sup>8</sup> da fabricante de motores elétricos, Bosch, o posicionamento do motor no pedal (*mid-mounted*) é a configuração mais benéfica ao usuário, pois garante um centro de massa melhor localizado (mais baixo e centralizado), garantindo também melhor estabilidade. Além disso, o motor gira com mesma velocidade de rotação que a pedaleira, e por exemplo, na subida de um morro, momento em que o motor é altamente requisitado, o eixo do pedal estará numa velocidade de rotação maior do que o das rodas, tornando o trabalho realizado pelo motor mais eficiente e evitando superaquecimentos. Por outro lado a configuração *hub-mounted* tem a vantagem de ter simples manufatura, afinal, não é necessário ter um espaço específico na pedaleira para o motor. Além disso, permite a fácil substituição de motores e inclusive a transformação de uma bicicleta elétrica em convencional - basta trocar a roda.

De acordo com o preço dos produtos da Bafang, empresa chinesa e maior produtora de motores elétricos para bicicletas do mundo, a configuração *mid-mounted* é a mais cara. O preço de um motor elétrico *mid-mounted* varia entre 300 e 700 dólares, enquanto um motor elétrico *hub-mounted* (na roda dianteira ou traseira) da mesma fabricante custa entre 50 e 150 dólares. Outras empresas como a Bosch, por exemplo, produzem apenas

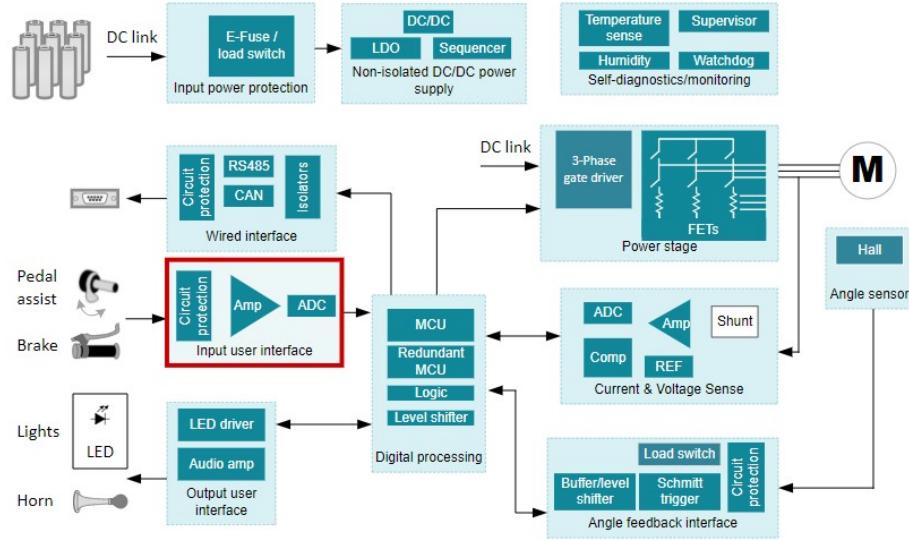


Figure 7: Projeto elétrico convencional de uma e-Bike de pedal assistido. Retirado de Texas Instruments<sup>9</sup>

motores *mid-mounted* já que seu foco são consumidores de alto poder aquisitivo, e são largamente utilizadas na Europa.

Pensando nos requisitos de projeto e no público alvo do nosso projeto, decidimos adotar a opção menos eficiente, porém mais econômica e de assembly mais simples: a *hub-mounted*.

O projeto elétrico de uma bicicleta elétrica, é, independente da configuração de posicionamento do motor escolhida, a mesma. Na imagem abaixo, retirado do site da Texas Instruments, temos um esquemático dos diversos sub-sistemas presentes numa e-Bike.

Veja que nesse diagrama, o pedal assistido, configuração que escolhemos nos requisitos de projeto, realiza o controle do motor através da interface do usuário, que recebe um sinal analógico, converte em digital, que posteriormente é processado pela MCU e transmite o sinal ao motor.

## 5.2 Montagem Mecânica

A escolha do material do quadro da bicicleta afeta a bicicleta em diversos fatores. Desde o custo do material até o peso total da bicicleta, e dentre as opções de fácil manufatura que se encontra no mercado, tomamos 3 opções principais para fazer nossa análise:

**Alumínio (Al6061):** a série 6000 é uma das mais utilizadas na fabricação de quadros de bicicleta, sendo uma liga de alumínio com magnésio e silício, com excelente facilidade

Characteristic \ Material	Al 6061	Ti6Al4V	Carbon Fiber
Young's modulus / N/m <sup>2</sup> x 10 <sup>3</sup>	68,9	115	50 - 150
Yield Strength / N/m <sup>2</sup>	260 - 290	880 - 1100	Varies
Tensile Strength / N/m <sup>2</sup>	300 - 320	950 - 1170	250 - 400
Elongation / %	17	10	2,5
Density / kg/m <sup>3</sup>	2,7	4,43	1,800
Weldability and Machinability	Excellent	Fair	Fair
Cost / € per kg	1,5	45	Varies

Figure 8: Tabela comparativa entre materiais

de manufatura e largamente empregada no mercado;

Titânio (Ti6Al4V): utilizada principalmente em bicicletas de alto padrão, tem propriedade mecânicas excelentes e boa durabilidade;

Fibra de carbono: largamente utilizadas nas bicicletas de alta performance, especialmente Bicicletas de categoria "Speed". Suas vantagens são o baixo peso e a facilidade de moldar superfícies de forma a ocupar menos volume, tornar as bicicletas mais aerodinâmicas e extremamente eficientes.

Para uma bicicleta, principalmente de carga, o peso é um fator muito importante, de forma que a fibra de carbono, dentre os materiais selecionados, garante vantagens mecânicas interessantes, sendo o material mais leve e um dos mais resistentes. No entanto, somam contra ela, o alto custo e sua baixa absorção à impactos, de modo que pequenas imperfeições no solo são fortemente propagadas pela estrutura, potencialmente danificando a carga e tornando a viagem desagradável ao motorista. Na Figura 7, retirado de RONTESCU (2015)<sup>14</sup>, é possível ver um comparativo completo entre esses 3 materiais.

Outro material interessante nessa seleção é o Alumínio, uma vez que a liga Al6061 garante uma densidade razoavelmente baixa, aliado a um custo que se encaixa nos requisitos de projeto. Outra propriedade interessante é a facilidade de solda e sua facilidade em ser trabalhada com máquinas.

A decisão final sobre o material, seguiu os mesmos passos do estudo de RONTESCU (2015)<sup>14</sup>. Montou-se uma matriz de decisão com as 3 opções escolhidas e 4 parâmetros: custo, peso, resistência mecânica e facilidade de manufatura. Escolheu-se notas de 1-3 para os materiais, sendo 3 = Excelente, 2 = Bom e 1 = Regular, e para os pesos do parâmetros também de 1-3, sendo 3 = Extremamente relevante, 2 = Razoavelmente

Materiais/ Parâmetros	Custo	Peso	Resistência Mecânica	Facilidade de manufatura	Soma das notas
Al6061	3	2	2	3	21
Ti6Al4V	2	1	3	2	15
Fibra de carbono	1	3	1	1	12
Pesos das notas	3	2	1	2	24

Figure 9: Matriz de decisão para escolha do material

relevante, 1 = Pouco relevante.

Na Figura 8, é feita a somatória  $\sum_1^4 N_i k_i$ , onde  $N_i$  são as notas dadas por critério e  $k_i$  os pesos dados aos critérios. Ao final, a liga Al6061 foi a com maior pontuação (21), seguida da liga de titânio Ti6Al4V (15) e por fim a fibra de carbono (12).

## 6 METODOLOGIA

### 6.1 Design Flow

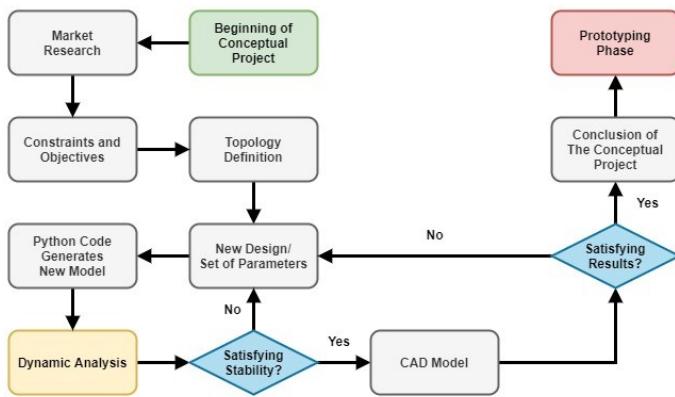


Figure 10: Design Flow do projeto

### 6.2 Requisitos de Projeto

Os requisitos de projeto se basearam em diversos fatores, desde aspectos legais das resoluções de transito do Contran até os aspectos físicos da cidade de São Paulo. Entendemos que alguns dos objetivos podem não ser alcançados, mas devem nos guiar na tentativa de alcançar um produto ideal. Seguem eles

- 1) Altura ao chão mínima e distância máxima entre as rodas: A cidade de São Paulo, diferentemente das cidades europeias onde a maior parte dos estudos citados no Estado da Arte foram feitos, é uma cidade de fortes declives, com subidas e descidas inclinadas e uma malha cicloviária ainda incipiente. Dessa forma, diversos obstáculos não-naturais surgem ao usuário de uma bicicleta como calçadas, lombadas e buracos. Dessa forma, decidimos que é essencial que a distância da base inferior ao chão seja de, no mínimo, 15 cm. Já a distância entre as rodas definimos como de, no máximo, 200 cm.

- 2) Largura máxima para caber nas ciclofaixas e calçadas: As ciclofaixas brasileiras

tem, em média, 120 centímetros de largura [Fonte = Caderno Técnico para Projetos de Mobilidade Urbana - Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana - SeMob] enquanto que na Europa as ciclofaixas tem, em média, 1,5m. Pensando que no Brasil, as ciclofaixas são irregulares, decidimos utilizar um fator de segurança de 2.0 e propomos 60 cm como largura máxima da bicicleta.

3) Velocidade e potência nominal máxima: De acordo com a Resolução 465 do Contran, as bicicletas elétricas de Classe 1 não podem ultrapassar o limite de velocidade de 25 km/h e não podem ter potência nominal do motor maior do que 350 W. Dessa forma, projetaremos uma estrutura que converse com essa configuração eletrônica.

4) Custo de fabricação: Um dos grandes desafios é trazer uma estrutura barata, principalmente quando comparada com as opções importadas. Dessa forma, definimos que o custo máximo do projeto não deve ultrapassar R\$ 4.000. Para alcançar esse requisito, levaremos em consideração a quantidade de matéria prima utilizada, número de soldas e suas complexidades, manufatura, entre outras coisas.

5) Peso da estrutura: Com a restrição anterior [3] de utilizarmos motores de até 350 W, definimos um peso máximo para a estrutura (sem contar bateria + motor). Baseando-se na Figura 4, definimos que o peso máximo da estrutura é de 35kg

6) Velocidade estável mínima: Para uma bicicleta convencional, a estabilidade é facilmente alcançável para baixas velocidades, mas para uma bicicleta comprida como uma *Long John*, é desafiador encontrar uma geometria satisfatória. Como requisito do projeto, definimos que a velocidade mínima estável deve ser de 21 km/h (5.8 m/s).

7) Velocidade estável máxima: A bicicleta deve permanecer estável dentro dos limites normais de uso. Considerando que o limite de velocidade imposto pelo Contran (Resolução 465) é de 25 km/h, e adotando um fator de segurança de 1.5, consideramos como limite de velocidade estável máxima 40 km/h (11.1 m/s).

8) A bicicleta deve ser capaz de transportar uma carga líquida mínima de 25 kg.

## 7 TEORIA

### 7.1 Modelos de Bicicleta

O primeiro modelo matemático pra descrever o comportamento dinâmico de um bicicleta foi proposto por Carvallo-Whipple, em 1899<sup>10</sup>, e tornou-se um clássico da literatura, gerando diversos outros modelos ao longo dos anos. O modelo é definido através das seguintes considerações:

- 1) Consiste de 4 corpos rígidos D, C, E e F, respectivamente a Roda traseira (D), Quadro traseiro (C), Guidão/garfo (E) e Roda dianteira (F).
- 2) As rodas são consideradas axi-simétricas, com contato roda-chão modelado como uma "ponta de faca", ou seja, como um disco muito fino que tem apenas um ponto de contato com o chão, e realiza seu movimento giratório sem escorregar. Dessa forma, despreza-se possíveis deformações do pneu.
- 3) A bicicleta é considerada axi-simétrica, com distribuição de massas e geometrias arbitrárias.

Existem diversas formas de parametrizar o modelo de Whipple, e nesta tese, adotou-se a parametrização de Moore, 2012<sup>11</sup>, indicada pela Figura 9.

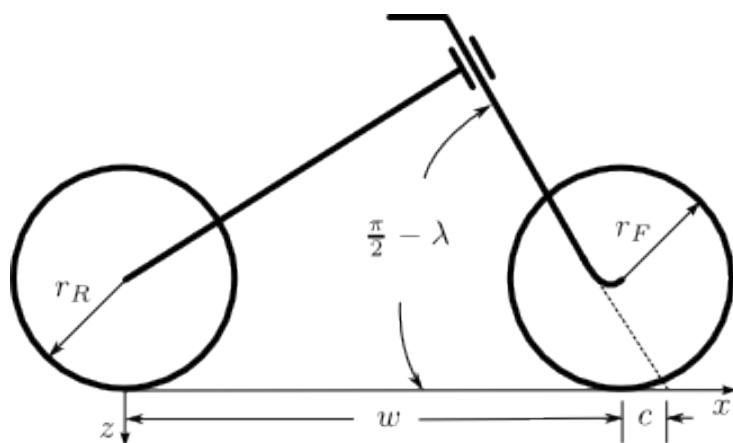


Figure 11: Parametrização do Modelo de Whipple. Retirado de <sup>11</sup>

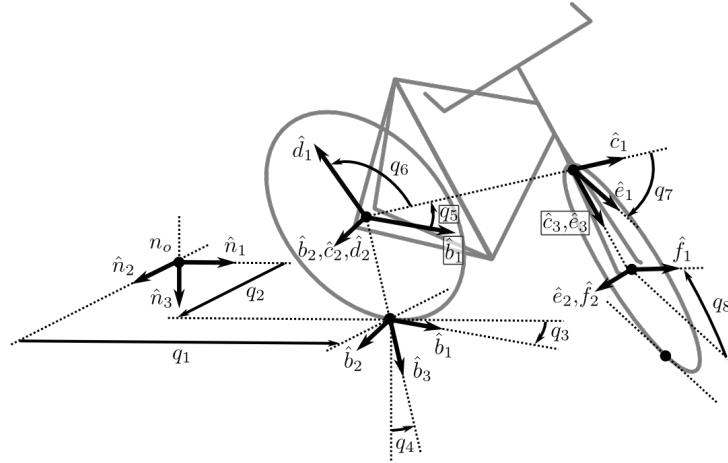


Figure 12: Coordenadas generalizadas do modelo adotado. Retirado de <sup>11</sup>

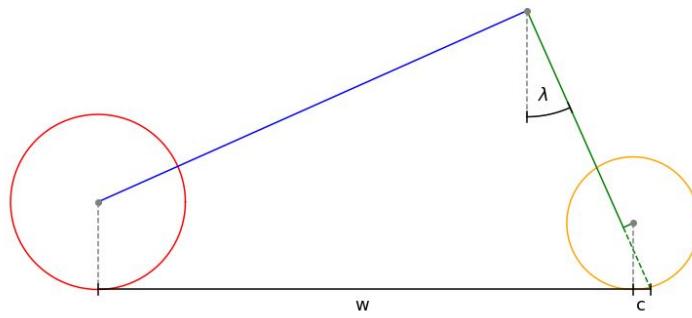


Figure 13: Representação de uma *Long John* pelo modelo de Whipple

Nessa parametrização, 3 variáveis são deixadas em evidência:

$w$  - distância entre as duas rodas;

$c$  - "trail", a distância entre o ponto de contato da roda dianteira no chão e o prolongamento do garfo da bicicleta;

$\lambda$  - o ângulo que o garfo faz com a vertical;

$r_i$  - o raio das rodas, sendo  $i = R, F$ .

As coordenadas utilizadas na formulação do modelo estão na Figura 10 e seguiram a configuração proposta por Moore, 2012

## 7.2 Estabilidade

Com o objetivo de otimizar o manuseio e estabilidade da nossa bicicleta, avaliaremos a estrutura do seu quadro, submetendo iterações de seus parâmetros à uma análise dinâmica

e comparando os autovalores característicos gerados ao de uma bicicleta de referência.

Para isso, condensamos sua geometria em um modelo Carvallo-Whipple, de modo que a sua parametrização seja análoga à de bicicletas convencionais.

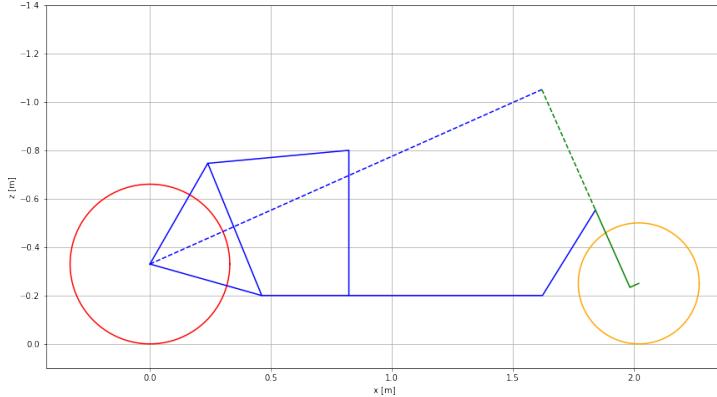


Figure 14: Quadro da bicicleta calculado pelo código

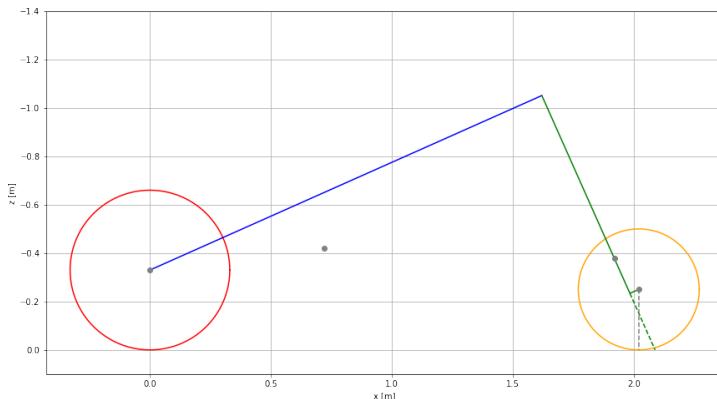


Figure 15: Modelo Carvallo-Whipple da bicicleta

Com os comprimentos das barras do quadro, calculamos as distâncias, centros de massa e tensores de inércias representados no modelo, podendo assim manuseá-los como se fossem de uma bicicleta tradicional, cuja análise é bem abordada na literatura. Como o diferencial de uma *Long John* está na sua dianteira, optamos por utilizar os comprimentos de uma bicicleta convencional para as barras posteriores do quadro, com o intuito de diminuir o custo computacional da análise.

Para a análise dinâmica, utilizamos o pacote *open-source BicycleParameters*<sup>7</sup>, para *Python*. O pacote contém as equações de movimento necessárias para o modelo Carvallo-Whipple, e funções para o cálculo de seus autovalores, dada as velocidades e parâmetros do modelo.

Pelo gráfico gerado, podemos identificar as velocidades em que a bicicleta terá autoestabilidade, indicadas pelos simultâneos valores negativos da parte real dos autovalores,

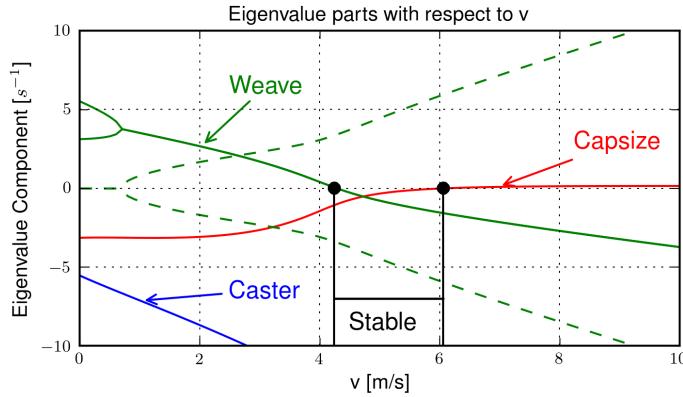


Figure 16: Análise da plotagem dos autovalores em função da velocidade. Retirado de <sup>11</sup>

assim como realizar uma comparação qualitativa com o gráfico de uma bicicleta de referência. Para a partida, uma velocidade crítica de *Weave* baixa é benéfica, enquanto uma ampla faixa de auto-estabilidade é desejada para diminuir a necessidade de interrupção do ciclista no controle da bicicleta durante a viagem.

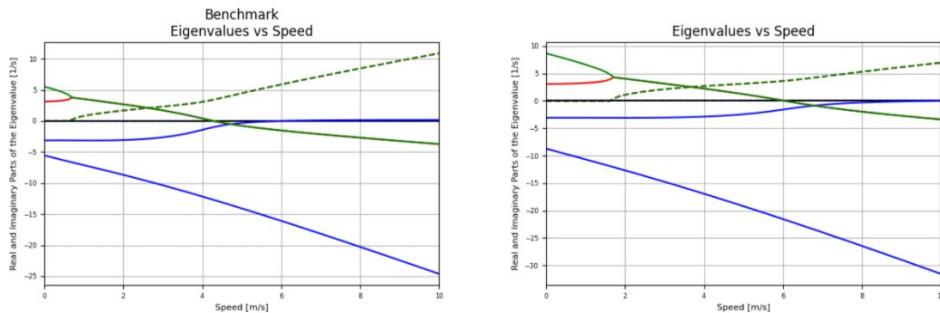


Figure 17: Gráfico dos autovalores da bicicleta de referência (esquerda), e dos autovalores da cargo *bike* calculados pelo programa (direita)

### 7.3 Equação de Movimento

As equações de movimento foram obtidas do modelo de Whipple<sup>10</sup> e linearizadas por Meijaard <sup>11</sup>. Através da biblioteca *BicycleParameters*<sup>7</sup> e sua documentação<sup>11</sup>, implementamos as equações de movimento em um código *Python*, via herança dos métodos fornecidos pela biblioteca em sua classe *Bicycle*.

## 8 MODELO PYTHON

Para auxiliar na análise dinâmica e visualização de diferentes iterações da bicicleta, utilizou-se um algoritmo em Python para automatizar o processo de modelagem e análise do quadro. Utilizando como parâmetros de entrada o sistema de corpos e a faixa de valores para as medidas que queremos obter, o código gera uma tabela contendo as propriedades dinâmicas de diferentes modelos da bicicleta, derivados da combinação de iterações das medidas desejadas. Com essa tabela, podemos analisar e escolher a melhor geometria para a bicicleta, de acordo com os critérios do projeto.

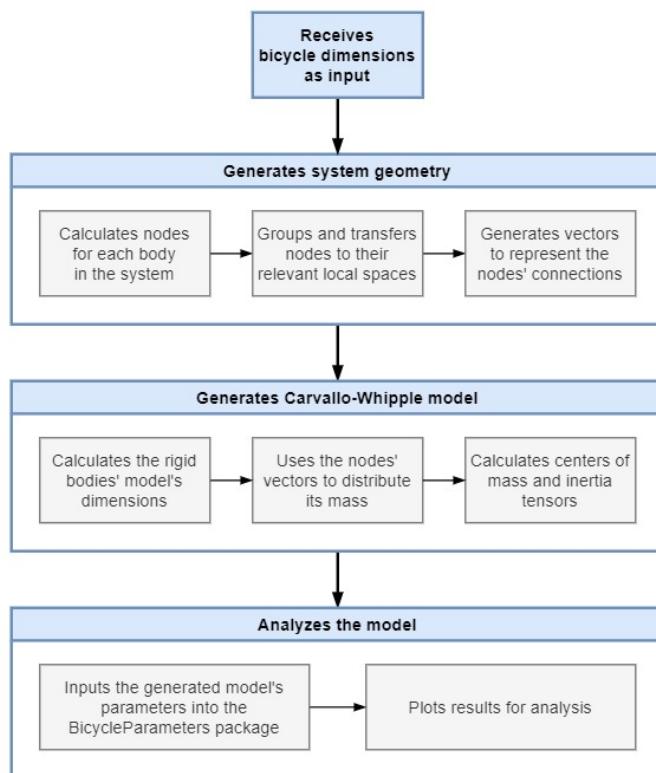


Figure 18: Processo de análise das dimensões da bicicleta

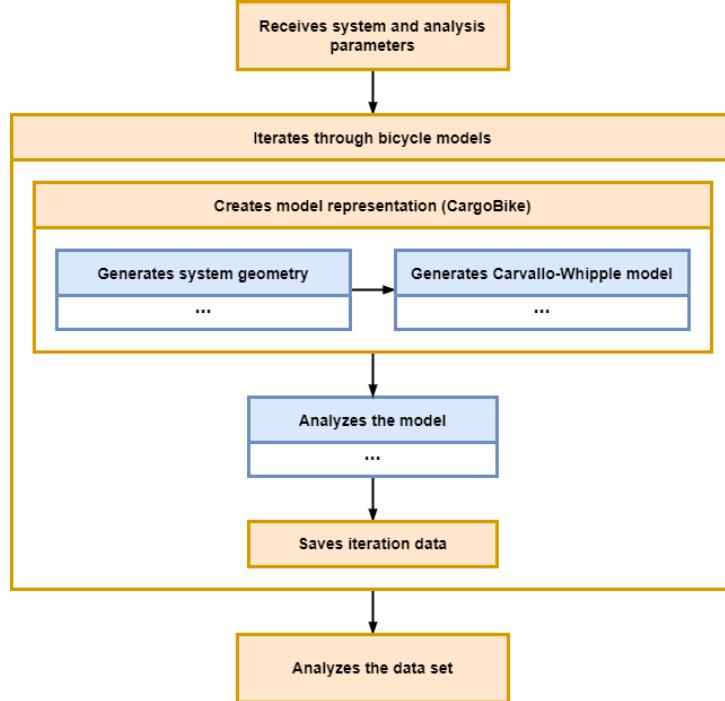


Figure 19: Processo implementado no algoritmo Python

## 8.1 Classe CargoBike

Para o processo de modelagem, criou-se a classe `CargoBike`, encarregada de receber os parâmetros do sistema e, através de uma sequência de funções auxiliares, gerar um objeto representando a bicicleta. O objeto, por sua vez, é responsável pela análise dinâmica do modelo, realizada através de métodos herdados da classe `Bicycle`, do pacote `BicycleParameters`<sup>7</sup>.

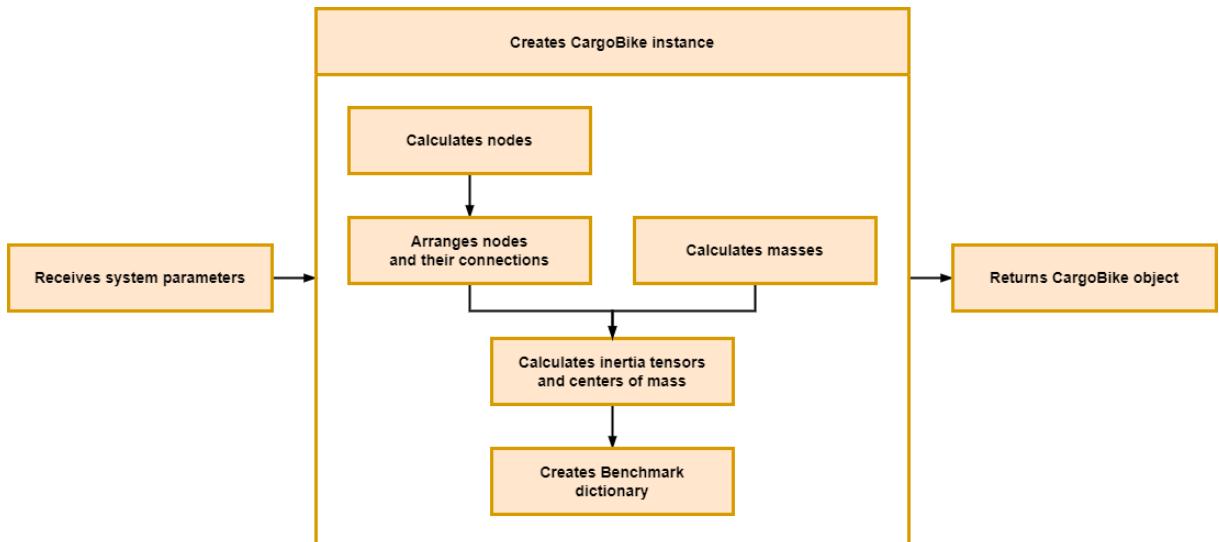


Figure 20: Fluxograma da classe CargoBike

```

def get_benchmark_params(system_params):

    nodes = get_nodes(system_params)
    invert_z_axis(nodes)
    change_basis(nodes)
    bars = get_bars(nodes)

    masses = get_masses(system_params)
    inertias = get_inertias(masses, bars)

    return create_benchmark_dictionary(system_params, inertias)

```

Figure 21: Função principal para o cálculo dos parâmetros, composta pelas funções auxiliares

Primeiro, a função `get_nodes` válida e gera a geometria de acordo com os parâmetros fornecidos, gerando listas de nós, que representam quatro corpos do sistema:

- A parte traseira do quadro;
- A parte dianteira do quadro;
- O corpo do ciclista, caso esteja no sistema;
- A carga levada pela bicicleta, caso esteja no sistema.

As rodas podem ser suficientemente representadas pelos seus raios e nós centrais, que já estão incluídos nos nós dos quadros, portanto não são representadas por uma lista de nós.

Uma quinta lista também é gerada, representando os nós da geometria da bicicleta gerada pela sua parametrização, que auxilia nas mudanças de bases que os corpos passam para atender os requisitos do modelo Carvallo-Whipple utilizado.

```

# BICYCLE NODES =====

# Rear frame nodes -----
N_RF = np.zeros([7, 2]) # Init. of the nodes (x, z) for the RF

N_RF[0] = [0, r_RW] # (1) - Rear wheel node

N_RF[1] = [sqrt(L[0]**2 - (r_RW - h_RF)**2), h_RF] # (2)
N_RF[2] = find_vertex(N_RF[0], N_RF[1], L[1], L[2]) # (3)
N_RF[3] = N_RF[1] + [L[3], 0] # (4)
N_RF[4] = N_RF[3] + [0, L[5]] # (5)
N_RF[5] = N_RF[3] + [L[6], 0] # (6)

```

Figure 22: Trecho do código para geração da geometria da bicicleta

Com todos os nós calculados, estes são invertidos, rotacionados e deslocados pelas funções `invert_z_axis` e `change_basis`, de modo que os corpos representados estejam nas bases especificadas pelo modelo.

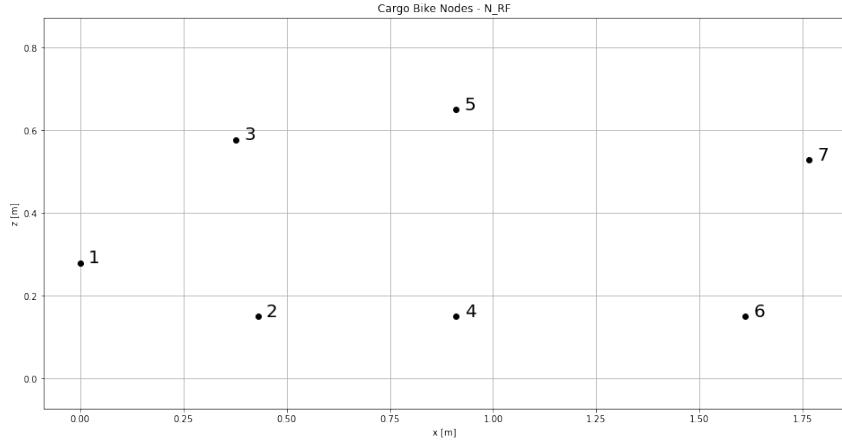


Figure 23: Pontos gerados pelo código

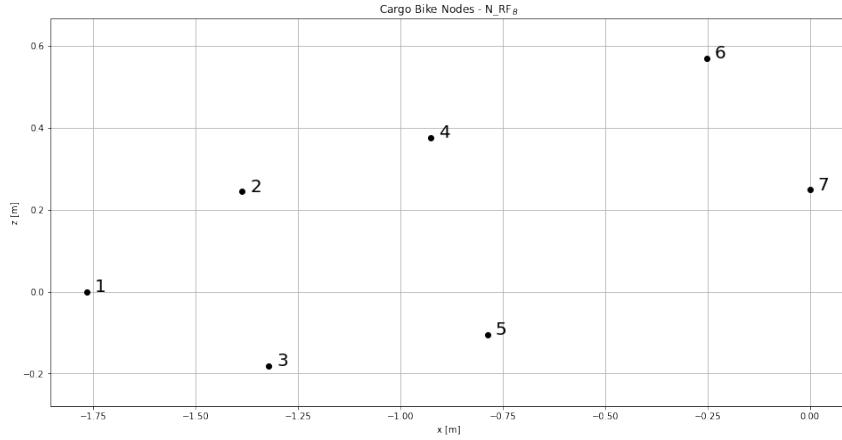


Figure 24: Pontos transladados pelo código

Em seguida, através das funções `get_bars` e `get_masses`, os nós são pareados, representando suas conexões, e agrupados nas listas de seus respectivos corpos, assim como suas massas, em preparação para o cálculo dos tensores de inercia:

- As conexões do quadro representam suas barras, cuja massas podem ser calculada através de seus comprimentos, raios, espessuras e densidade do seu material;
- As conexões do ciclista representam os membros do seu corpo, cuja massas são calculadas através da documentação da biblioteca *Yeadon*<sup>19</sup>, inclusa no pacote *BicycleParameters*<sup>7</sup>;
- As conexões da carga são uma simplificação do seu corpo, representado por duas barras, de mesmo comprimento, cruzadas diagonalmente, cuja massas somadas resultam na massa total da carga.

A massa das barras do quadro, representadas por  $M_k$ , é calculada pela equação

$$M_k = (\pi \cdot W_k \cdot (2 \cdot R_k - W_k)) \cdot L_k \cdot \rho_k, \quad (8.1)$$

onde  $W_k$ ,  $R_k$ ,  $L_k$  e  $\rho_k$  são, respectivamente, a espessura da parede, o raio, o comprimento e a densidade do material da barra  $k$ .

```
# BARS' MASSES =====
# Frame masses -----
# M = A(R, E)*L*p = (pi*E*(2*R - E))*L*p
p = system_params['frame']['material_density']
M_F = [(pi*w*(2*r - w))*l*p
        for w, r, l
        in zip(system_params['frame']['bars_thicknesses'],
               system_params['frame']['bars_radiuses'],
               system_params['frame']['bars_lengths'])]
```

Figure 25: Trecho do código para geração da lista de massas

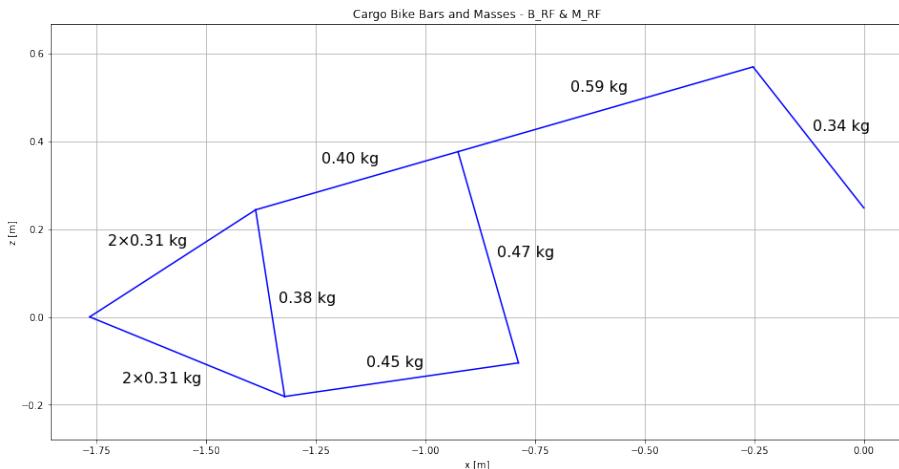


Figure 26: Barras e suas respectivas massas

Com as listas de conexões e as listas de massas dos corpos do sistema, seus centros de massa e tensores de inércia, necessários para os métodos de análise dinâmica, podem então ser calculados pela função `get_mechanical_properties`.

Para calcular os centros de massa, a função faz a média ponderada dos pontos médios das conexões e suas respectivas massas. No modelo utilizado, as massas do quadro traseiro, do ciclista e da carga são agrupadas em um mesmo corpo.

O centro de massa, representado por  $G$ , é definido como

$$G = \frac{\sum_k B_{km} \cdot M_k}{\sum_k M_k}, \quad (8.2)$$

onde  $B_{km}$  é a mediana da barra  $k$ .

```
# CENTERS OF MASS =====
# Local centers of mass
g_RF = np.average(np.mean(B_RF, axis=1), axis=0, weights=M_RF)
g_FF = np.average(np.mean(B_FF, axis=1), axis=0, weights=M_FF)
```

Figure 27: Trecho do código para cálculo dos centros de massa

Para calcular os tensores de inercia, cada conexão é abordada como uma barra delgada e de massa uniforme, configurando um angulo theta com o eixo x. Assim, o código descomplicadamente calcula as inercias individuais de cada barra em relação à suas respectivas medianas, e, em seguida, aplica o teorema do eixo paralelo para derivar suas inercias em relação ao centro de massa do corpo que pertencem. Por fim, a soma dessas inercias resultará no tensor de inercia do corpo. Analogamente ao cálculo do centro de massa, o quadro traseiro, o ciclista e a carga são agrupadas em um mesmo corpo para o cálculo da inercia.

O tensor de inercia de uma barra, representada por  $I_k$ , é definido como

$$I_k = \frac{M_k \cdot L_k^2}{12} \cdot \begin{bmatrix} \sin^2 \theta & 0 & -\sin \theta \cdot \cos \theta \\ 0 & \sin^2 \theta + \cos^2 \theta & 0 \\ -\sin \theta \cdot \cos \theta & 0 & \cos^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (8.3)$$

onde  $\theta$  é o angulo que a barra forma com o eixo-x.

Aplicando-se o teorema do eixo paralelo, temos que o tensor de inercia do corpo completo é dado pela equação

$$I = \sum_k \left( I_k + M_k \cdot \begin{bmatrix} z_{kh}^2 & 0 & -x_{kh} \cdot z_{kh} \\ 0 & x_{kh}^2 + z_{kh}^2 & 0 \\ -x_{kh} \cdot z_{kh} & 0 & x_{kh}^2 \end{bmatrix} \right), \quad (8.4)$$

onde  $(x_{kh}, z_{kh})$  é o vetor da distância entre a mediana da barra  $k$  e o centro de massa do corpo.

Com todos os parâmetros do modelo fornecidos e calculados, o código gera um dicionario *Benchmark*, que serve como parâmetro de entrada para os métodos de análise dinâmica do pacote *BicycleParameters*<sup>7</sup> herdados pelo objeto.

```

def bar_inertia(m, a, b):
    # Calculates the inertia tensor of bar of mass m, defined by the
    # points a and b, with respect to its midpoint

    l = dist(a, b) # Bar length
    t = angle(a, b) # Bar angle

    Ixx = m*(l*sin(t))**2/12
    Izz = m*(l*cos(t))**2/12
    Iyy = Ixx + Izz
    Ixz = -m*l**2*sin(t)*cos(t)/12

    I = np.array([[Ixx, 0, Ixz],
                  [0, Iyy, 0],
                  [Ixz, 0, Izz]])

    return I

```

Figure 28: Função para o cálculo da inercia de uma barra

```

def parallel_axis_theorem(I, m, h):
    # Applies the parallel axis theorem to a body with inertia tensor I
    # and mass m, across the vector h

    x, z = h

    Ixx_h = m*z**2
    Izz_h = m*x**2
    Iyy_h = Ixx_h + Izz_h
    Ixz_h = -m*x*z

    I_o = I + np.array([[Ixx_h, 0, Ixz_h],
                        [0, Iyy_h, 0],
                        [Ixz_h, 0, Izz_h]])

    return I_o

```

Figure 29: Função para aplicar o teorema dos eixos paralelos

## 8.2 Iteração de Modelos

Em seguida, executa-se uma rotina para iterar os valores das faixas das medidas desejadas, atualizando os parâmetros do sistema e instanciando objetos da classe `CargoBike` que representam os modelos gerados. Os objetos, por sua vez, permitem a visualização e análise de estabilidade de cada modelo, cujos resultados são armazenados em uma tabela.

A rotina primeiro define as dimensões e faixa de seus valores que irão variar com cada iteração da bicicleta. Para o projeto, itera-se os valores da altura  $h$  entre o chão e a base da bicicleta; o angulo  $\lambda$  do garfo; e o comprimento da barra  $L_{46}$ . Ao final das iterações, a rotina salva a tabela como um arquivo `.csv`.

Em seguida, a rotina inicializa os argumentos de entrada para a classe `CargoBike`, que é um dicionario de um até três dicionários aninhados, contendo as dimensões que

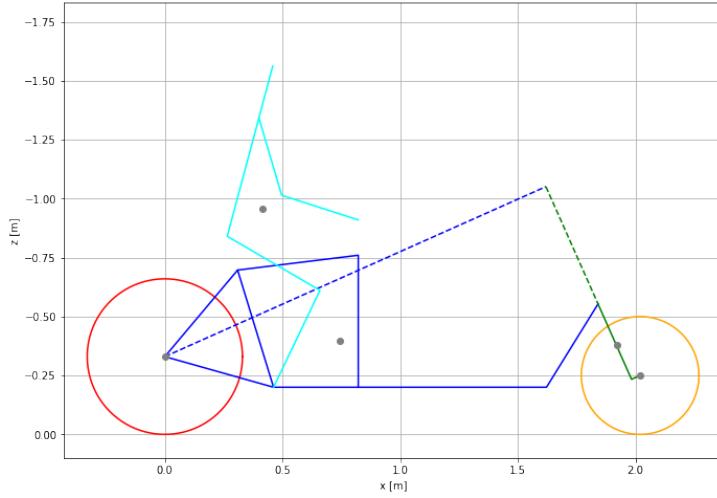


Figure 30: Geometria dos corpos do sistema

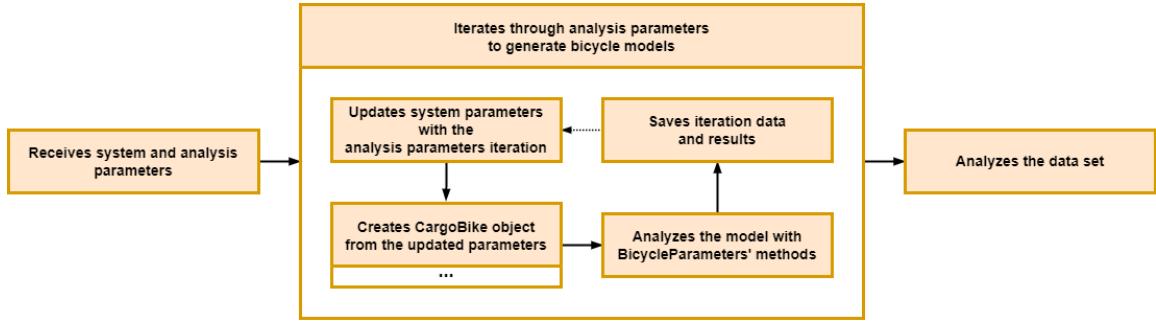


Figure 31: Fluxograma da rotina para iterações de medidas

serão constantes nas iterações da bicicleta. O número de dicionários aninhados depende do número de corpos no sistema, que por sua vez depende do *setup* da análise. No nosso caso, utilizamos três *setups*:

- A bicicleta e o ciclista;
- A bicicleta, o ciclista e uma carga cujo massa varia proporcionalmente ao comprimento da sua barra de carga  $L_{56}$ ;
- A bicicleta, o ciclista e uma carga de massa 40 kg.

Finalmente, para cada *setup*, a rotina passa pelas faixas de valores das dimensões, atualizando os dicionários dos argumentos de entrada com suas combinações, e cria os objetos representando as diferentes iterações da bicicleta. Para cada objeto criado, utiliza-se o método `eig`<sup>7</sup> para extrair do sistema os autovalores em respeito à sua velocidade, armazenando-os em uma tabela junto aos valores das dimensões que os geraram. Ao fim das iterações, a rotina salva a tabela como um arquivo *.csv*.

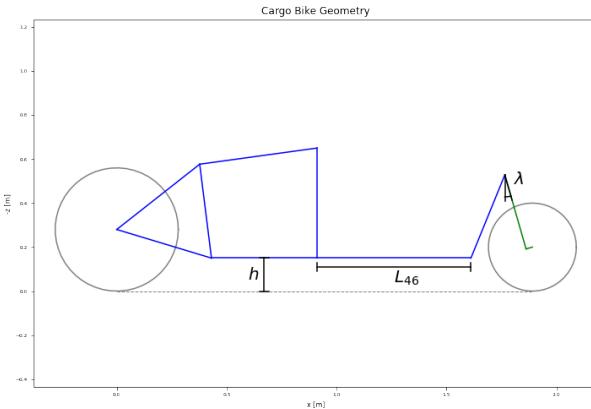


Figure 32: Parâmetros iterados

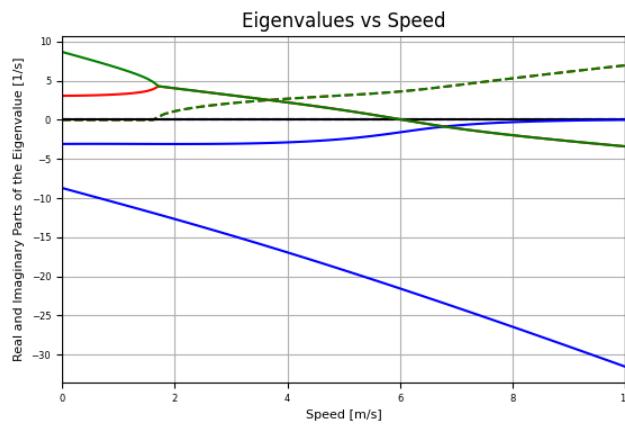


Figure 33: Gráfico de autovalores plotado pelo programa

### 8.3 CAD dos Modelos

Adicionalmente, utilizamos o pacote py-MADCAD<sup>18</sup> em um script que gera arquivos STL do quadro traseiro das bicicletas geradas, para podermos visualizar suas renderizações 3D via CAD. O script recebe como parâmetros os mesmos argumentos utilizados anteriormente.

Todas as funções e módulos de nossa autoria estão disponíveis em

<https://github.com/FranciscoTLS/ecargobike>

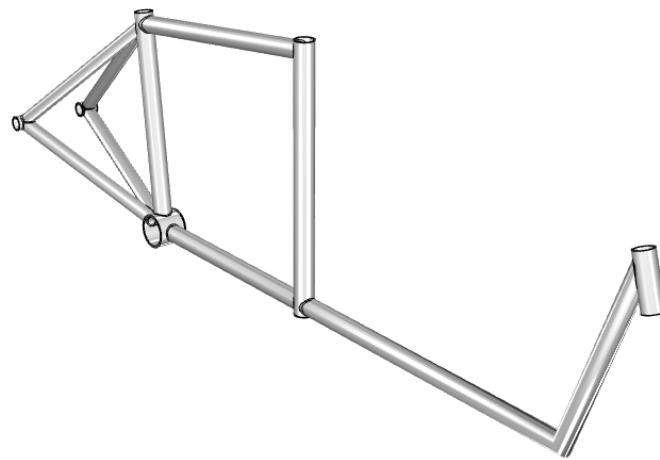


Figure 34: Partes STL geradas pelo código

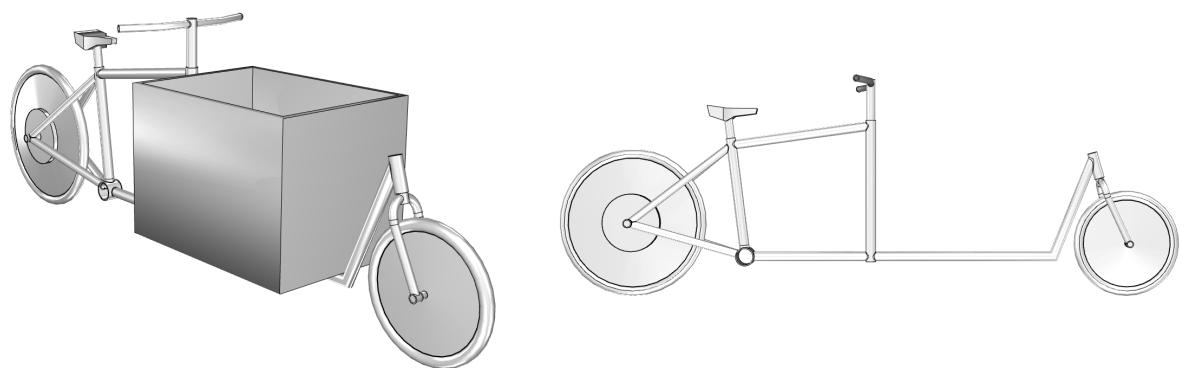


Figure 35: CAD da e-Cargo Bike

## 9 DESIGN DA BICICLETA

### 9.1 Dimensões das Rodas

#### 9.1.1 Roda Traseira

A roda traseira, tanto quanto outras partes da parte inferior da bicicleta, é baseada em uma bicicleta tradicional, inclusive a roda traseira. O tamanho dela foi dimensionada para ser compatível com a altura mediana de uma pessoa de porte médio (175cm). Além disso, ela deve ter tamanho e robustez capaz de suportar a carga e torque do motor elétrico a ser instalado nela.

De acordo com o site *Bicycle Guider*<sup>16</sup>, o aro comumente utilizado para pessoas com a estatura de 175cm é o aro 28cm (560mm de diâmetro). Com este tamanho de aro, há espaço de sobra para o posicionamento do motor no eixo da roda, que dimensionamos em torno de 10 cm de raio, de acordo com pesquisa de mercado feita previamente.

#### 9.1.2 Roda Dianteira

Durante a pesquisa de mercado e definição do Estado da Arte, observou-se que nos modelos *Long-John* é tradicionalmente utilizada uma roda de aro entre 18 e 22cm. Os modelos *Long John*, além dos dispostos nas Figuras 5 e 6, têm tradicionalmente o aro dianteiro com esse tamanho. Apesar de não encontrarmos uma fonte para justificar tal escolha, acredita-se que os aros pequenos facilitem a manobrabilidade da bicicleta e a compactação de uma bicicleta cujos comprimentos podem ultrapassar com facilidade 150 centímetros. Dessa forma, decidiu-se seguir o dimensionamento de roda registrado no Estado da Arte e optou-se por uma roda dianteira aro 20cm.

### 9.1.3 Manobrabilidade da roda dianteira

Durante o desenvolvimento do modelo em *Python*, percebeu-se que algumas variáveis deveriam ser definidas a fim de garantir a correta manobrabilidade da roda dianteira. Entre esta roda e o quadro, existe um distância  $x$ , que pode ser determinada no algoritmo em *Python*.

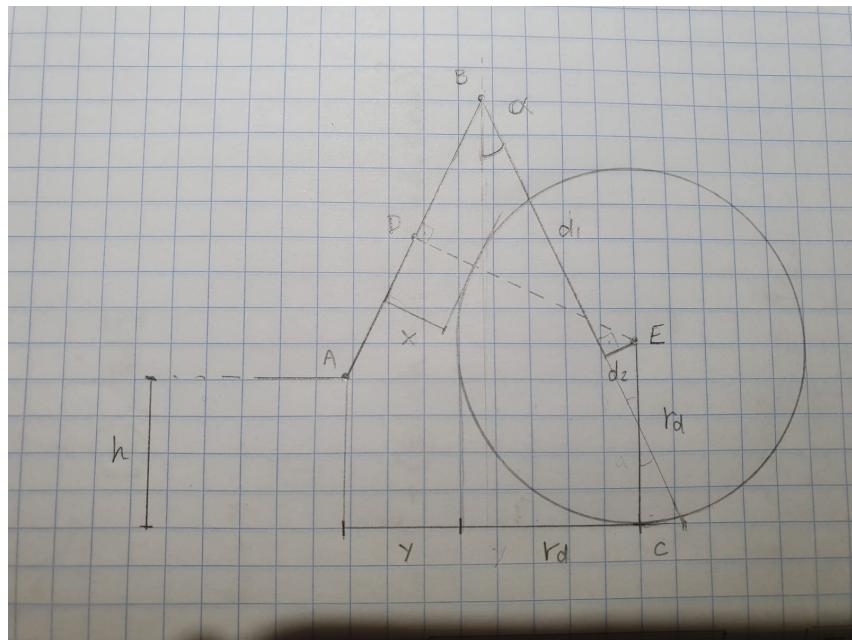


Figure 36: Esboço da roda dianteira.

A variável  $x$  define a menor distância entre a roda e o quadro, de forma que se considera o raio da roda como:

$$r_d = Raio_{aro} + Espessura_{pneu} \quad (9.1)$$

Adotando um Fator de Segurança de 20%, temos que  $x = r_d * 20\%$ , o que equivale a aproximadamente 4.0 cm. Este foi o valor escolhido nas simulações posteriores pois entendemos que é uma tolerância aceitável dentro do modelo.

No algoritmo em *Python*, esse parâmetro se relaciona com as outras variáveis através da equação (9.2). Escolheu-se isolar explicitamente  $y$

$$\begin{aligned} y = & -h + (L_{78} + L_{89}) \cos \alpha + L_{78} \sin \alpha - \\ & L_{89} \sin \alpha \tan \left( \arcsin \left( \frac{(r_d + x)}{\sqrt{L_{78}^2 + L_{89}^2}} \right) - \arctan \left( \frac{L_{89}}{L_{78}} \right) \right) \end{aligned} \quad (9.2)$$

onde  $L_{ij}$  é o comprimento da barra que liga os nós  $i$  e  $j$ ,  $h$  é a altura da bicicleta (variável do modelo) e  $c$  é o *trail*.

Abaixo, registramos na imagem o caso em que  $x$ , que pode ser escolhido pelo usuário, vale 0cm.

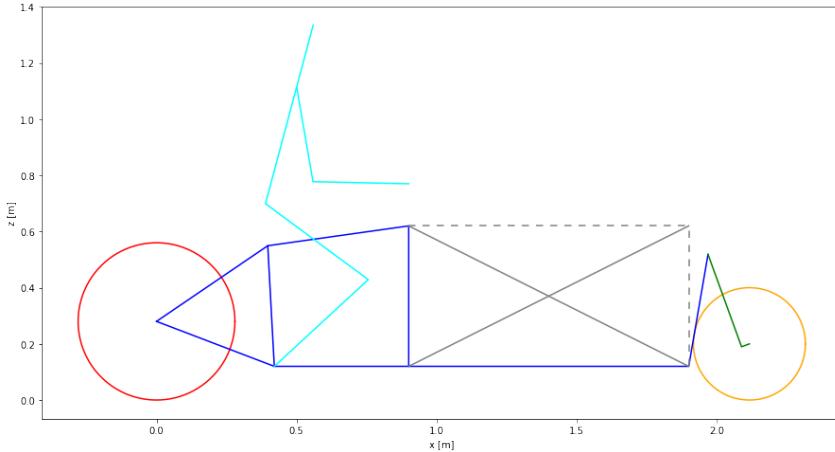


Figure 37: Exemplo de tolerância  $x$  entre o quadro e roda dianteira igual a 0cm

## 9.2 Dimensões do Quadro

O quadro pode ser dimensionado através de nove nós  $N_i$ , devidamente conectados por dez barras  $B_{ij}$ . Os nós  $N_1$  à  $N_7$ , e as barras que os conectam, representam o quadro traseiro da bicicleta, e os nós  $N_7$  à  $N_9$  e suas respectivas barras representam o garfo, conectados por um eixo no nó  $N_7$ .

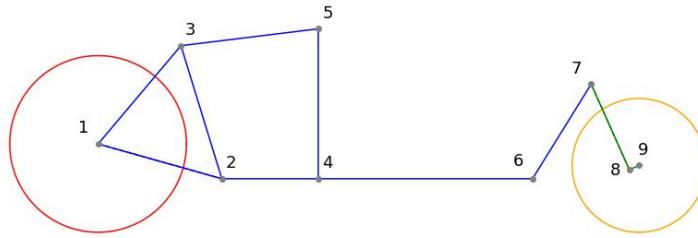


Figure 38: Nós do quadro.

As barras  $B_{24}$  e  $B_{46}$  são paralelas ao chão, e a barra  $B_{45}$  é perpendicular às duas. A barra  $B_{78}$  tem inclinação de  $(\pi/2 - \lambda)$  radianos em relação à horizontal, e é perpendicular à barra  $B_{89}$ .

Adicionalmente, definiu-se os comprimentos  $h_c$  para a distância mínima entre o quadro

e o chão,  $d_s$  para a distância entre o assento e  $N_3$ , paralela à  $B_{23}$ , e  $d_h$  para a distância entre  $N_5$  e o guidão, paralela à  $B_{45}$ .

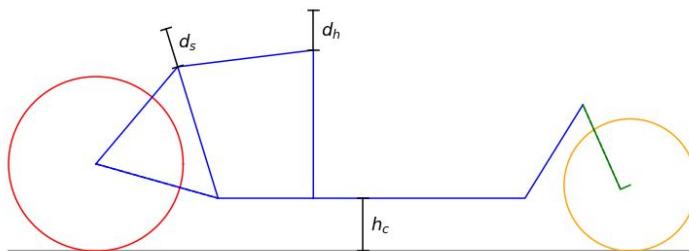


Figure 39: Dimensões implícitas da bicicleta

## 9.3 Cargo Space

Dentre todas as variáveis de uma bicicleta cargueira, o peso é uma das mais relevantes. Neste tópico discutiremos os diversos impactos que a geometria da bicicleta, o compartimento de carga e os materiais escolhidos tem no peso total da estrutura e consequentemente na capacidade de carga desse meio de transporte.

### 9.3.1 Volume de carga

Em uma bicicleta *Long John*, o compartimento de carga fica localizado em frente ao condutor, com dimensões definidas na Figura abaixo. Para efeitos de simplificação, o compartimento foi considerado como um paralelepípedo retangular, de dimensões  $h$ ,  $l$  e  $d_c$ , como mostra a Figura.

Dessa forma, o Volume de carga ( $V$ ) é simplificadamente calculado por  $V = h * l * d_c$ , e esta expressão será utilizada posteriormente, nas iterações de simulação do modelo.

Considerando que nosso usuário final deve ser um entregador de aplicativo, fizemos uma estimativa de "densidade" do produto levado por ele. A opção mais utilizada de mochila de entregas tem volume total de 60L, e estimamos que essa mochila, leva em média, por viagem, cerca de 10kg de peso líquido. Desta forma, a densidade líquida é de 167kg/m<sup>3</sup>.

Pesquisando sobre as opções de mercado, estimamos que a mochila quando vazia, pesa em média 3kg. Portanto o entregador carrega um peso total, em média, de 13kg, o que torna a densidade do produto carregado de 217kg/m<sup>3</sup>. Temos, portanto, duas den-

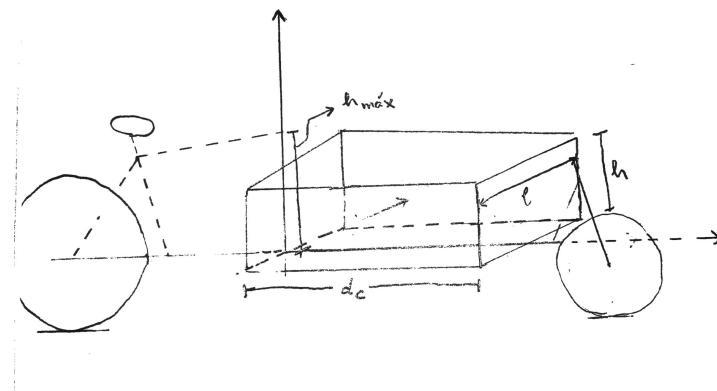


Figure 40: Parâmetros no cálculo do volume de carga

sidades, uma considerando que o entregador utilizará a mochila dentro do bagageiro, e portanto devemos considerar o peso desta na densidade de carga, e outra em que temos uma densidade "líquida", considerando apenas a carga propriamente dita. Pensamos que a segunda alternativa faz mais sentido para o projeto, uma vez que estamos interessados, nesse primeiro momento, em considerar a carga líquida transportada. Portanto, a densidade de carga adotada nas análises posteriores é de  $167 \text{ kg/m}^3$ .

Para os valores de largura  $l$  e altura  $h$  na Figura 27, foram adotados valores fixos nas simulações baseadas nos modelos *Long John* que utilizamos como referência no Estado da Arte (Figuras 5 e 6), sendo eles:

Largura (cm)	Altura (cm)
50	50

Dessa forma, o Volume de carga é dado por  $V = 0.25 * d_c [\text{m}^3]$ . Podemos relacionar o volume e massa através da densidade de carga e portanto chegamos à equação:

$$M = 41.8 * d_c [\text{kg}]$$

Portanto, estimamos que para o transporte dos mesmos 13 kg de alimento em uma bolsa de 60L, serão necessários aproximadamente 31cm de *Cargo Space* ( $d_c$ ).

### 9.3.2 Massa do quadro

A estimativa da massa total estrutural, baseia-se, principalmente, no tipo de material utilizado e sua quantidade. No capítulo 5.2 (Mechanical Assembly) já havíamos determinado o material utilizado como a liga de alumínio Al6061. A densidade  $\mu$  da liga de alumínio é  $2.7 \text{ kg/m}^3$ .

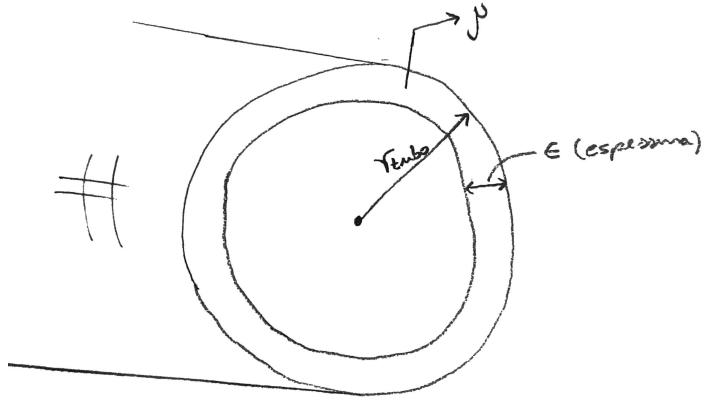


Figure 41: Parâmetros de um tubo genérico

Para um tubo genérico, de raio  $r_{tubo}$ , espessura  $\epsilon$ , comprimento  $l$  e densidade  $\mu$ , sua massa será dada por:

$$M = \mu\pi(r_{tubo}^2 - (r_{tubo} - \epsilon)^2)l \quad (9.3)$$

O cálculo da massa de todas as barras estruturais da bicicleta será dada, por:

$$M_{total} = \sum_1^n \mu_i\pi(r_i^2 - (r_i - \epsilon_i)^2)l_i \quad (9.4)$$

onde  $n$  é o número de barras, tendo cada barra suas propriedades dadas por  $r_i$ ,  $\epsilon_i$ ,  $l_i$  e  $\mu_i$ .

### 9.3.3 MPW - Maximum Permissible Weight

Uma bicicleta *Long John*, com 2 rodas, tem, com uma margem de segurança, um MPW (*Maximum Permissible Weight*) de 210kg, de acordo com a Figura 3, retirado de um estudo da EUMA2021<sup>13</sup>. Ou seja, a soma de todos os componentes da bicicleta como a estrutura, condutor e carga, não deve ultrapassar esse valor. Para efeitos de cálculo, algumas medidas já podem ser estimadas como o peso do motor e bateria, do condutor e dos componentes auxiliares da bicicleta.

De acordo com o estudo de mercado realizado no tópico de Estado da Arte, estimamos que o motor e a bateria escolhidos tem pesos de 4.5kg e 3.5kg respectivamente.

Assumimos que o condutor tem peso de 75kg (peso médio da população mundial) e estimamos que a soma dos componentes auxiliares, tais como freios, pedaleiras, selim, corrente, rodas e cabos é de 15kg. Dessa forma, subtraindo o MPW dos pesos já considerados, e teremos qual é o máximo peso que a carga + estrutura pode carregar, que são duas variáveis no projeto. Assim:

$$\text{Peso sobressalente (P)} = 210 - 75 - 4.5 - 3.5 - 15 = 112\text{kg}$$

No tópico 9.3.1 havíamos deduzido a equação que relaciona o parâmetro *Cargo Space* ( $d_c$ ) com a massa a ser transportada. Nesse sentido, para um peso sobressalente (P) de 112kg, para um uso exclusivamente de entrega de comidas, seriam necessárias 2.57 m de *cargo space*, muito além do que pretendemos simular para este parâmetro.

Portanto, utilizaremos o MPW apenas como limitante em casos de uso extremos, envolvendo cargas com densidade superiores a de alimentos em mochilas térmicas.

## **PART III**

### **RESULTADOS**

## 10 CONSIDERAÇÕES INICIAS

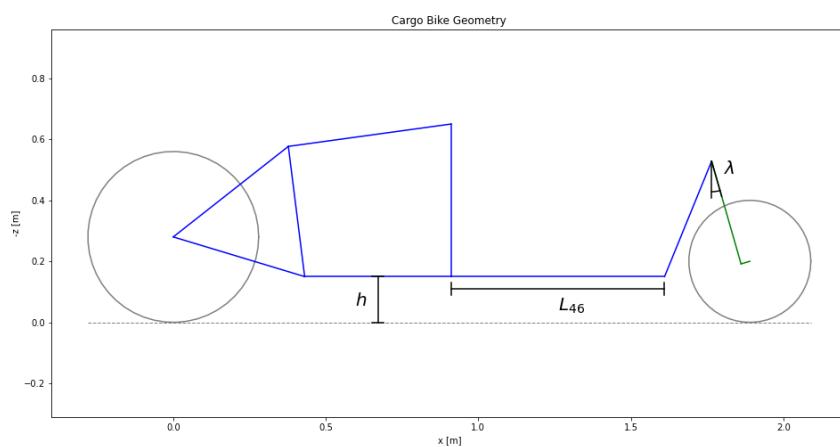


Figure 42: Variáveis do modelo,  $L_{46}, h$  e  $\lambda$

### 10.1 Premissas

Durante o estudo desta presente tese, determinou-se algumas premissas de projeto, baseadas nas observações realizadas no Estado da Arte e nas definições dos Requisitos de Projeto:

1. Diâmetro da roda traseira = 28 cm (aro amplamente utilizado pela indústria, ideal para alturas medianas<sup>15</sup>)
2. Diâmetro da roda dianteira = 20 cm (de acordo com a fonte das Figuras 5 e 6, é o aro mais utilizado para bicicletas *Long John*)
3. Massa da roda traseira = 2.6kg + 3kg (estimativa peso roda + motor traseiro de acordo com as Figuras 5 e 6)
4. Massa da roda dianteira = 1.8kg (de acordo com as Figuras 5 e 6)
5. Espessura das barras dos quadro = 3mm (Espessura padrão amplamente utilizada pela indústria<sup>17</sup>)

6. Densidade das barras:  $2700 \text{ kg/m}^3$  (Densidade da liga Al6061)
7. Comprimento do *trail* (c): 6cm (conector que liga o garfo à roda)

Comprimento e diâmetro das barras: obtidas através da medição de uma *bike* convencional.

Barra	Comprimento	Diâmetro	Barra	Comprimento	Diâmetro
1-2	45cm	30mm	2-4	48cm	36mm
1-3	48cm	28mm	4-5	50cm	40mm
2-3	43cm	38mm	7-8	35cm	24mm
3-5	66cm	36mm	6-7	$L_{67}$	36mm
8-9	3cm	24mm	4-6	$L_{46}$	36mm

As barras 6-7 e 4-6 são geometricamente dependentes das variáveis do modelo e podem possuir dimensões distintas a depender da configuração desejada. A barra 4-6 tem comprimento  $L_{46}$  e havia sido denominada como " $d_c$ " no capítulo anterior *Cargo Space*. No entanto, nas análises a seguir, convencionou-se a denominação  $L_{46}$  para a medida desta variável.

## 10.2 *Setups* de simulação

Durante os objetivos do projeto explicou-se a necessidade da bicicleta ser adaptável a diversas condições de uso diferentes. Para isso, considerou-se 3 *Setups* diferentes, simulando 3 casos de uso distintos da bicicleta.

Modelo	Valor da carga
<i>Setup 1</i>	$M = 0 \text{ kg}$
<i>Setup 2</i>	$M = 41.3 * L_{46}$
<i>Setup 3</i>	$M = 40 \text{ kg}$

1. *Setup* no.1, considerando a bicicleta "vazia". Carga = 0.
2. *Setup* no.2, com carga variável, densidade constante e dependente do volume de carga (quanto maior o volume, maior a carga)
3. *Setup* no.3, com carga constante, densidade variando.

Os 3 *Setups* representam, respectivamente, os caso de usos: **no.1**, no qual não há o transporte de carga alguma; **no.2**, no qual preenche-se o volume de carga em sua totalidade de forma que quanto maior o espaço cargueiro, maior o valor da carga transportada, obedecendo-se a equação determinada em (9.4); e **no.3**, no qual a carga tem valor constante de 40kg, independentemente do volume disponível, simulando o transporte de um objeto específico ou até uma pessoa (uma criança no caso dos 40kg).

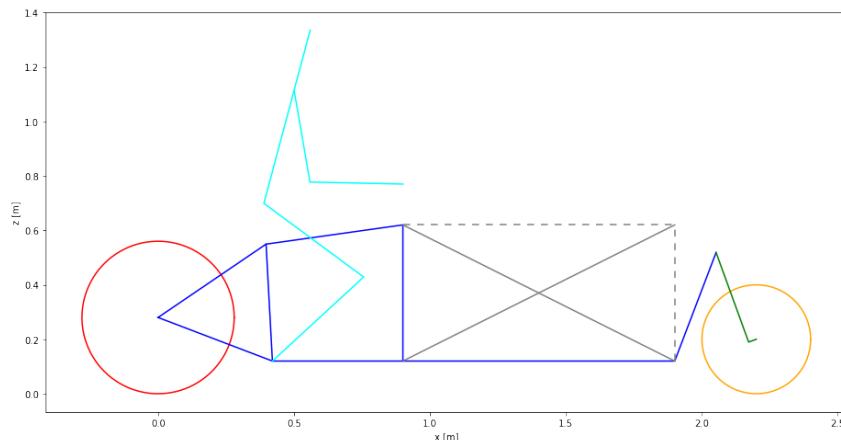


Figure 43: Dimensionamento da carga dentro do bagageiro para os *Setups* 2 e 3

A carga nos *Setups* 2 e 3 é modelada, dentro do algoritmo em *Python*, como 2 barras cruzadas, conforme indica a figura abaixo, de forma que a massa está distribuída uniformemente entre as barras.

A localização do Centro de Massa (CM) da carga está localizado no cruzamento das barras, e sob o referencial da bicicleta, sua posição ( $x$ ;  $y$ ) é  $(L_{46}/2; L_{45}/2)$ , no qual  $L_{46}$  indica a barra do *Cargo Space* (entre os nós 4 e 6) e  $L_{45}$  indica a Barra da esquerda (entre os nós 4 e 5).

### 10.3 Limites de simulação das variáveis

Os limites superior e inferior e o passo das iterações foram definidos da seguinte forma:

Parâmetros	Limite Inferior	Limite Superior	Passo
<i>Bike Floor Height (h)</i>	12cm	28cm	1cm
<i>Cargo Space (L<sub>46</sub>)</i>	40cm	150cm	5cm
<i>Steering Angle (λ)</i>	15°	29°	1°

Os limites escolhidos basearam-se principalmente nos requisitos de projeto, na facilidade construtiva e nas geometrias possíveis da bicicleta. Os passos escolhidos foram

pensados em tornar a execução do algoritmo de simulação rápido, adotando-se como *benchmark* execuções que durassem menos de 30 minutos. Com os limites e número de passos escolhidos, o *script* roda 5865 iterações para cada *Setup*, totalizando portanto 17595 layouts diferentes de bicicletas a serem simuladas e analisadas. Em média, cada *Setup* leva 2 minutos para ser executado, totalizando 6 minutos ao todo. A praticidade de um código executável em menos de 10 minutos traz ganhos valiosos para o andamento de projeto, uma vez que foram geradas mais de 40 versões diferentes do código até alcançarmos uma solução final.

O passo final da simulação é a geração de um arquivo .xlsx que alimenta um *script* em *Python* (<https://github.com/FranciscoTLS/ecargobike>) e geram as análises a seguir.

## 11 MANUSEIO DOS DADOS

O *output* do algoritmo, após realizar cerca de 6.000 iterações, é uma planilha no formato da tabela abaixo, a qual é importada por um algoritmo de tratamento e visualização dos dados.

<i>Bike height</i>	<i>Cargo Space</i>	<i>Steering Angle</i>	<i>Lowest Speed</i>	<i>Speed Range</i>
0.13	0.55	19	6.06	8.08
0.13	0.55	20	6.46	8.48
0.13	0.55	21	6.46	9.29
0.13	0.55	22	6.87	9.70
0.13	0.55	23	6.87	10.51
0.13	0.55	24	7.27	10.91

Tabela: pequeno fragmento do *output* inicial

Escreveu-se um algoritmo, em Python, no formato ETL (*Extract Tranform Load*) para receber o a planilha com as iterações, realizar uma série de transformações e carregar diversos gráficos contendo as análises desejadas. O algoritmo nomeado como `data_analysis.py` pode ser acessado no **Github** do projeto.

### 11.1 Visualização dos dados

Como o passo utilizado é relativamente grande, a visualização dos gráficos pode ficar, em alguns casos, difícil pois os pontos estão distantes entre si. Para gerar plotagens 3D, utilizou a função `matplotlib.plot_surface()` que permite a plotagem de superfícies tri-dimensionais e com uma série de personalizações. No entanto, percebeu-se durante a construção dos gráficos, que a superfície possuia uma série de imperfeições como mostra a Figura abaixo e para contornar este problema, utilizou-se a biblioteca `scipy` para realizar interpolações entre os pontos e assim obter superfícies suaves. Abaixo é possível ver o

resultado da interpolação utilizada num gráfico 3D gerado através do *matplotlib* com um *smooth factor* = 0.2.

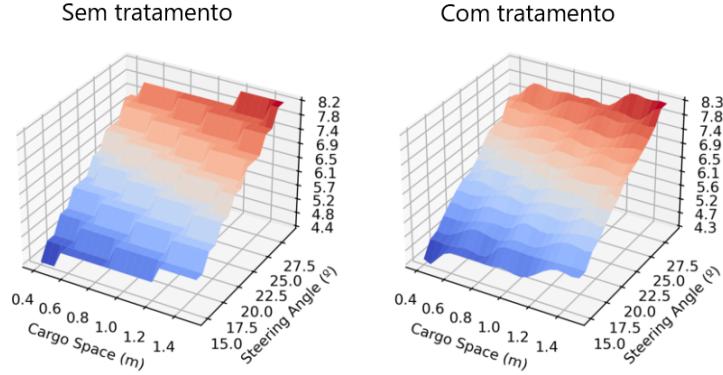


Figure 44: Diferença na plotagem de gráficos, utilizando a função *scipy.interpolate*

A função do *scipy* utilizada para realizar a interpolação foi a `scipy.interpolate.bisplrep`, que procura uma representação B-spline de uma superfície. Ela está descrita em mais detalhes na função `get_plot_3d_all(src1, src2, src3, cte, var, h, z)`, disponível em `data_analysis.py`, um dos arquivos no Github do projeto.

A função acima, recebe 3 *pandas DataFrames* contendo 3 colunas com as variáveis de simulação, e 2 colunas com os *outputs* do algoritmo ( $V_{min}$  e  $V_{range}$ ). Dados esses valores, cujas variáveis representam pares (x,y) de uma superfície, são determinados em forma de uma função do tipo

$$z = f(x, y) \quad (11.1)$$

Assim, uma superfície que represente a função é gerada e em seguida é utilizada a função `scipy.interpolate.bisplev` para armazenar os novos valores de z, numa discretização superior a inicial.

## 12 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

### 12.1 Análise de Velocidade Mínima

A velocidade mínima estável ( $V_{min}$ ) da bicicleta tem forte influência na usabilidade da bicicleta. A seguir realizamos as análises desse parâmetro baseada na variação de 3 parâmetros: altura da *bike*:  $h$ , *Steering Angle*:  $\lambda$ , e *Cargo Space*:  $L_{46}$ ) e para 3 casos de uso diferentes (*Setups* 1, 2 e 3).

Para facilitar o entendimento da análise, realizou-se a separação entre o estudo do impacto de cada variável, de forma que num primeiro momento não iremos variar a altura  $h$ , a base da bicicleta, adotando-se o valor mínimo imposto nos requisitos de projeto, 0.15m.

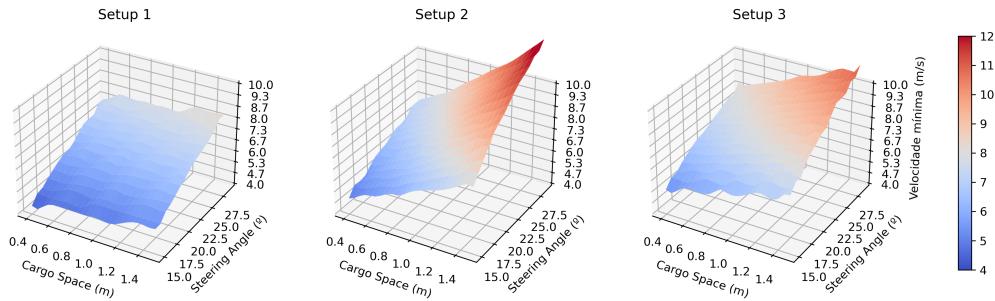


Figure 45: Velocidades mínimas estáveis para cada *Setup*.  $h = 15\text{cm}$ .

Na Figura abaixo observamos o comportamento das  $V_{min}$  em cada *Setup*, sendo o primeiro o mais estável nesse sentido, uma vez que para várias configurações de *Cargo Space* x *Steering Angle* a bicicleta permanece minimamente estável (velocidades abaixo de 5 m/s). Por outro lado, os *Setups* 2 e 3, como já era esperado, apresentam velocidades mínimas muito elevadas em certas configurações. No caso do *Setup* 2, o aumento do *Cargo Space* leva, pelo aumento linear da carga, ao aumento acelerado da  $V_{min}$ , de tal forma que certas configurações são extremamente instáveis (velocidades acima de 10 m/s), especialmente para  $\lambda$  elevado. O *Setup* 3 por sua vez, para configurações mais tímidas (baixo *Steering Angle* e *Cargo Space*), é mais instável do que os *Setups* anteriores pois

possui velocidades mínimas iniciais mais altas, na ordem de 5 m/s, enquanto os outros modelos possuem velocidades mínimas na ordem de 3.5 a 4.0 m/s.

Nos requisitos de projeto havíamos definido a velocidade mínima estável em 5.8 m/s, em qualquer condição de uso (com ou sem carga). Dessa forma, os resultados nos *Setups* 2 e 3 balizarão com maior peso a escolha do modelo final, uma vez que apresentam os resultados mais instáveis, principalmente o *Setup 2*.

Nos gráficos observamos a importância da barra que define o compartimento de carga,  $L_{46}$ , na estabilidade do modelo. Do ponto de vista de projeto, o ideal seria ter uma bicicleta com grande espaço de carga e de fácil usabilidade, mas na prática observamos que garantir um espaço de carga grande implica necessariamente em diminuir a estabilidade e manobrabilidade dela. O mesmo efeito observamos no *Steering Angle*, de forma que grandes ângulos são "agradáveis" para o usuário já que permitem fácil manobrabilidade da *bike*. Por outro lado, ângulos elevados a tornam rapidamente instável.

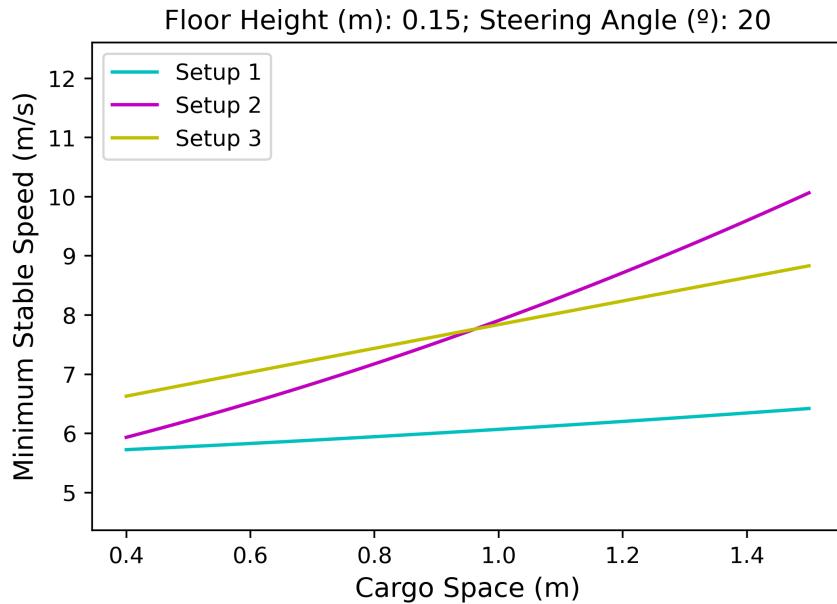


Figure 46: Velocidades mínimas estáveis para cada *Setup*.  $h = 15$  cm e  $\lambda = 20^\circ$ .

Para um  $\lambda$  estável em todas as configurações possíveis, como  $20^\circ$ , podemos observar mais claramente o impacto do parâmetro *Cargo Space* na velocidade mínima estável. Através da Figura acima, considerou-se como solução final do projeto apenas a possibilidade de modelos com  $L_{46}$  no máximo na ordem de 80 cm, excluindo-se uma ideia inicial de projeto de termos uma verdadeira "Long" John, que nos estudos do Estado da Arte alcançam comprimentos de bagageiro de até 1.5m.

Outra conclusão inicial das análises realizadas é a de que existe um valor "limite" na

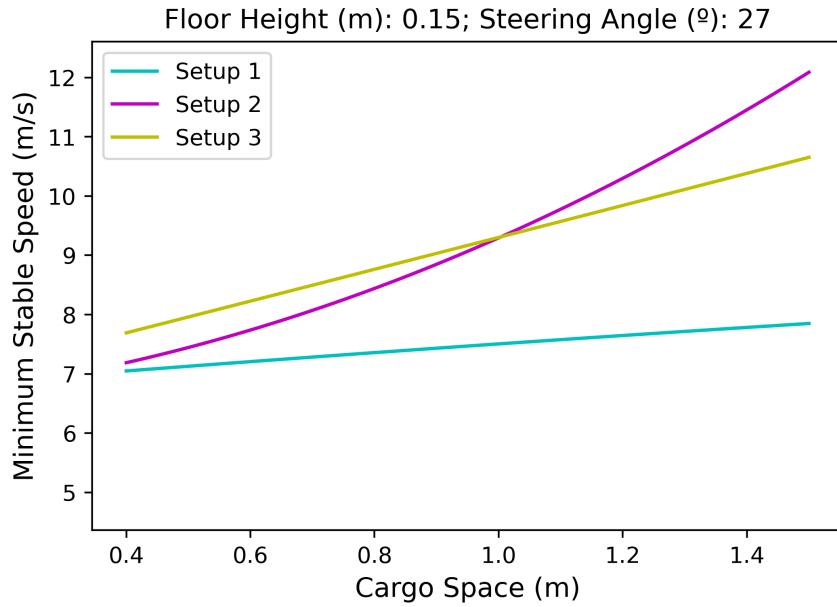


Figure 47: Velocidades mínimas estáveis para cada *Setup*.  $h = 15$  cm e  $\lambda = 27^\circ$ .

escolha de  $\lambda$ . Na Figura acima, com as mesmas condições da anterior mas com ângulo  $7^\circ$  mais inclinado com relação a vertical, a bicicleta se torna instável (acima de 7 m/s) em qualquer cenário escolhido.

### 12.1.1 Impacto da altura $h$ na velocidade mínima estável

A variação da altura da base  $h$  geram impactos menores na estabilidade do que a variação dos outros dois parâmetros ( $\lambda$  e  $L_{46}$ ). Percebemos que o *Setup* 1, no nosso modelo, não recebe influência da altura da *bike*, sendo plenamente estável em qualquer configuração. Por outro lado, os *Setups* 2 e 3 se tornam levemente instáveis com o aumento de  $h$ .

Para outras configurações de *Cargo Space* ( $L_{46}$ ) e *Steering Angle* ( $\lambda$ ), temos gráficos muito semelhantes ao da Figura acima, o que também indica que, pelo menos para os valores iterados (entre 12 e 28 cm), a altura da base da bicicleta tem pouca influência na velocidade mínima estável.

## 12.2 Faixa de Velocidade Estável

No item anterior analisamos o comportamento da velocidade mínima estável. Neste tópico trataremos da velocidade máxima estável, definindo assim o "range" de velocidades

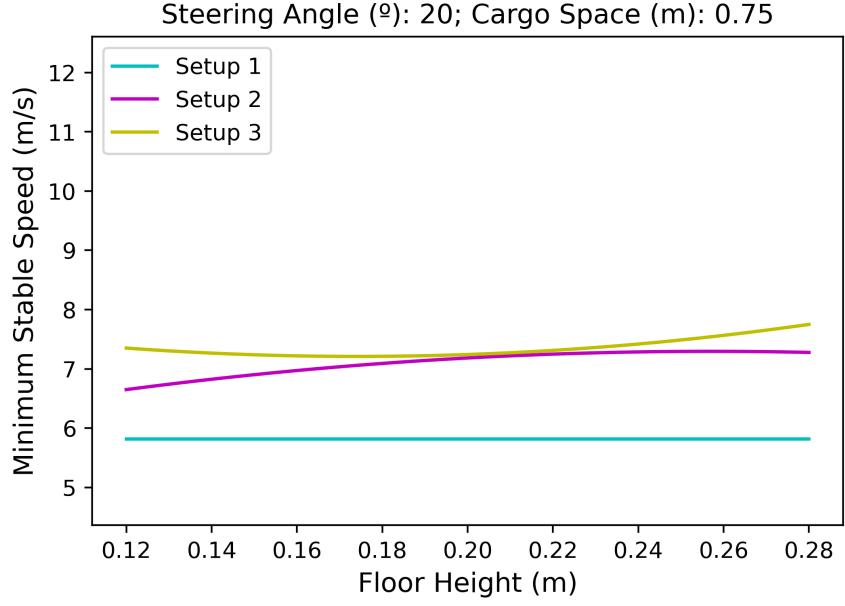


Figure 48: Velocidades mínimas estáveis para cada *Setup*, com a variação de  $h$ .  $L_{46} = 75$  cm e  $\lambda = 27^\circ$ .

nas quais a bicicleta alcança estabilidade definida em [MEIJAAD<sup>12</sup>].

Para facilitar o entendimento das análises do Range de velocidade máxima ( $V_{range}$ ), realizou-se novamente a separação entre o estudo de cada variável, de forma que num primeiro momento não iremos variar a altura  $h$  da base da bicicleta, adotando-se o valor mínimo imposto nos requisitos de projeto, 0.15m.

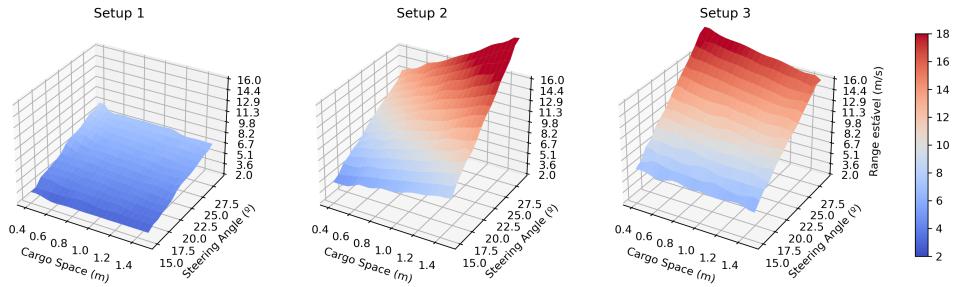


Figure 49: Range de velocidades estáveis para cada *Setup*.  $h = 15$ cm.

O *Setup 1* registra, de acordo com a Figura acima, baixos ranges de velocidades estáveis, sendo em alguns casos, ranges menores do que 4 m/s. Essas mesmas configurações, tipicamente com baixos valores de *Cargo Value* e *Steering Angle*, haviam, na análise anterior, registrado baixos valores de velocidade estável mínima, o que na prática indica que a bicicleta é estável num primeiro momento, mas rapidamente se torna instável pelo fenômeno da velocidade de *Capsize*.

Os *Setups* 2 e 3 indicam comportamentos opostos com o aumento do *Cargo Space* ( $L_{46}$ ). No *Setup* 2, que possui carga variável de acordo com o aumento do espaço disponível, vemos o aumento do range de velocidades, uma vez que o momento de inércia da bicicleta aumenta com o aumento da massa de carga. No *Setup* 3, observamos o efeito oposto, mas com a mesma causa. A carga, que é constante, fica inicialmente concentrada num pequeno espaço de carga, tornando a bicicleta muito estável. No entanto, com o aumento de  $L_{46}$ , a carga se ”dissipa”, e seu range de velocidade diminui. Percebemos que esse efeito é ampliado para valores de *Steering Angle* altos, superiores a 22º.

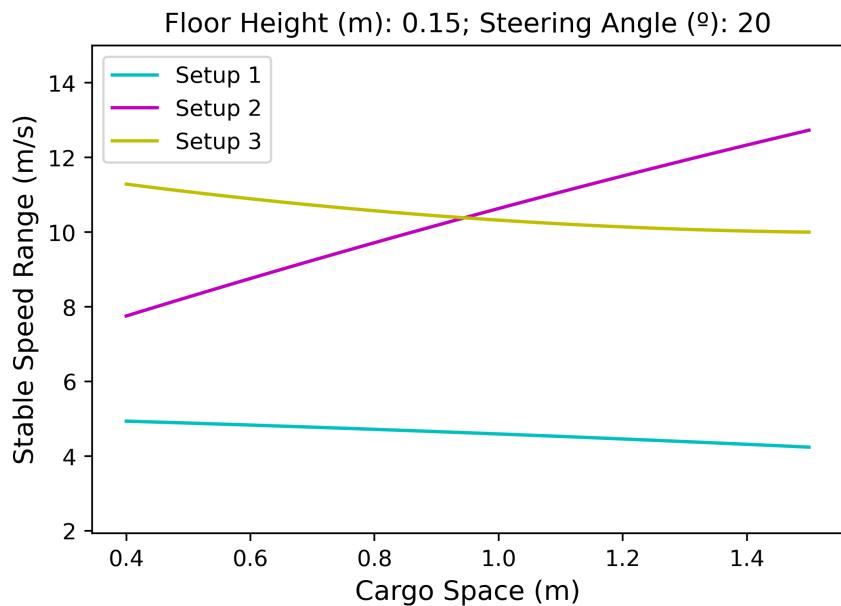


Figure 50: Range de velocidades estáveis para cada *Setup*.  $h = 15$  cm e  $\lambda = 20^\circ$ .

Observa-se, para a plotagem considerando-se um  $\lambda = 20^\circ$ , que a maior parte dos ranges nos *Setups* 2 e 3 são superiores a 8 m/s, cerca de 28.8 km/h, mesmo para outras variações de  $\lambda$ . Na prática, isso significa que as velocidades máximas estáveis são ainda maiores, já que  $V_{max} = V_{min} + V_{range}$ . Portanto, os *Setups* 2 e 3 terão velocidades máximas estáveis satisfatórias em quaisquer configurações de  $\lambda$  e  $L_{46}$ , pois  $V_{range}$  será superior a 8 m/s nestes casos.

O *Setup* 1, por outro lado, é um caso de uso mais sensível nesse quesito. Já havíamos verificado baixas velocidades mínimas estáveis anteriormente (o que é ótimo para o projeto) mas aqui vemos também baixos ranges de velocidades, o que consequentemente nos leva a baixas velocidades máximas estáveis (ruim para o projeto). Na Figura abaixo, foram plotadas 5 configurações de  $\lambda$  para o *Setup* 1.

Observa-se que o *Steering Angle* de 16º, menor valor simulado nas iterações, produz

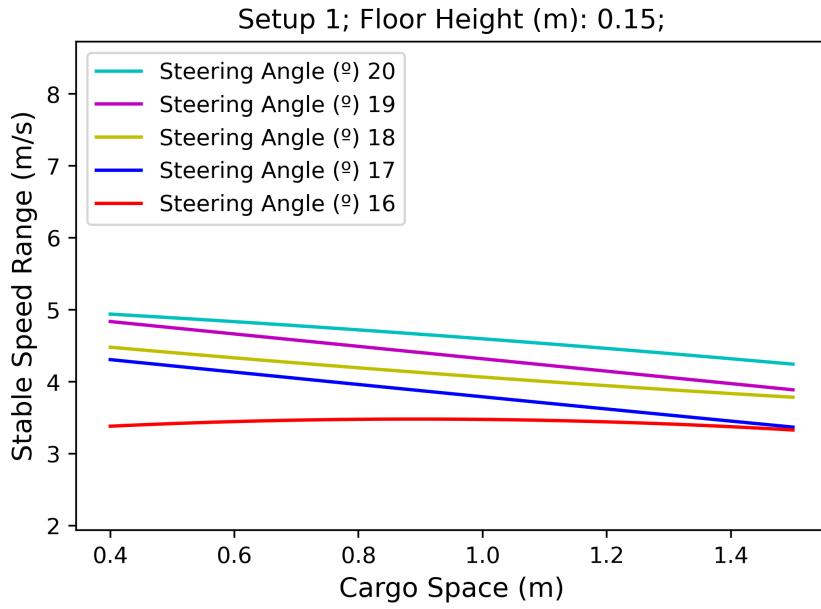


Figure 51: Range de velocidades estáveis para cada *Setup*.  $h = 15$  cm e  $\lambda = [16^\circ : 20^\circ]$

ranges de velocidades estáveis na ordem de 3.5 m/s, o que é satisfatório do ponto de vista de requisito de projeto. Já angulações maiores garantem ranges superiores a 4 m/s, mas que com o aumento do *Cargo Space* levam à leves diminuições desse valor.

### 12.2.1 Impacto da altura $h$ no Range de velocidades estáveis

A variação da altura da bicicleta impactou levemente no aumento/diminuição dos ranges de estabilidade. Na Figura abaixo, é possível ver que principalmente para os *Setups* 2 e 3, o aumento de  $h$  leva à diminuição do range estável. No entanto, já havíamos observado anteriormente, que os *Setups* 2 e 3 são plenamente estáveis em quaisquer configurações, de forma que a variação da altura não deverá impactar significativamente no valor das velocidades máximas estáveis.

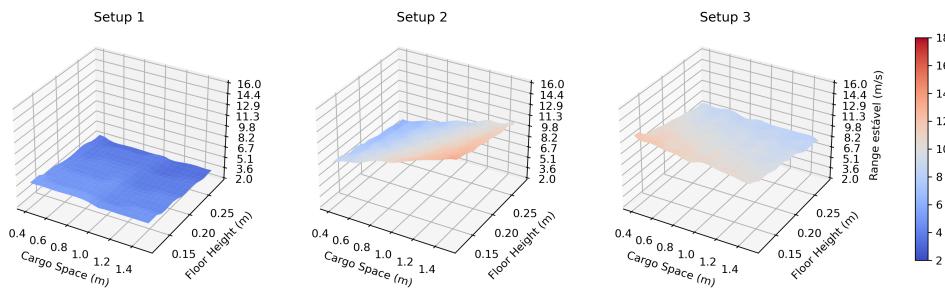


Figure 52: Range de velocidades estáveis para cada *Setup*.  $\lambda = 20^\circ$ .

O *Setup* 1 por sua vez recebe pouca influência com a variação da altura  $h$ .

## 13 MODELO FINAL

Baseadas nas análises anteriores e principalmente nos requisitos de projeto, foi possível definir os valores de  $\lambda$ ,  $h$  e  $L_{46}$ , as variáveis do problema. Os requisitos de projeto, enumerados em [6.2] seguem na tabela abaixo para fácil visualização:

Parâmetro	Valor
Altura mínima ( $h$ )	15 cm
Velocidade mínima estável ( $V_{min}$ )	21 km/h (5.8 m/s)
Velocidade máxima estável ( $V_{max}$ )	40 km/h (11.1 m/s)
Velocidade máxima sob motor	25 km/h (6.9 m/s)
Capacidade de carga mínima	25 kg
Capacidade de carga máxima (MPW)	112 kg

### 13.0.1 Dimensões e CAD

A solução final adotada considerou  $h = 15$  cm, o valor mínimo possível, já que observamos nas análises que quanto menor a altura, melhor a estabilidade da bicicleta, tanto nas velocidades estáveis mínimas como máximas.

Adotamos para  $\lambda$ , o ângulo que a caixa de direção faz com a vertical, o valor de  $16^{\circ}$ . Na escolha deste parâmetro, ponderamos principalmente o impacto dele na velocidade mínima estável ( $V_{min}$ ) nos *Setups* 2 e 3, e na velocidade máxima estável ( $V_{max}$ ) do *Setup* 1. A  $V_{min}$  determinada nos requisitos de projeto era de, no máximo, 5.8 m/s, valor este alcançado nos 3 *Setups* para  $\lambda = 16^{\circ}$ , mas dificilmente alcançável para ângulos maiores.

Na Figura 51, plotada com a escolha das duas variáveis  $h = 15$  cm e  $\lambda = 16^{\circ}$ , vemos que para uma certa seleção de *Cargo Spaces* ( $L_{46}$ ), o modelo cumpre os requisitos de  $V_{min}$  para ambos os 3 *Setups*.

Na escolha de  $\lambda$ , outro fator relevante analisado foi a velocidade máxima estável do

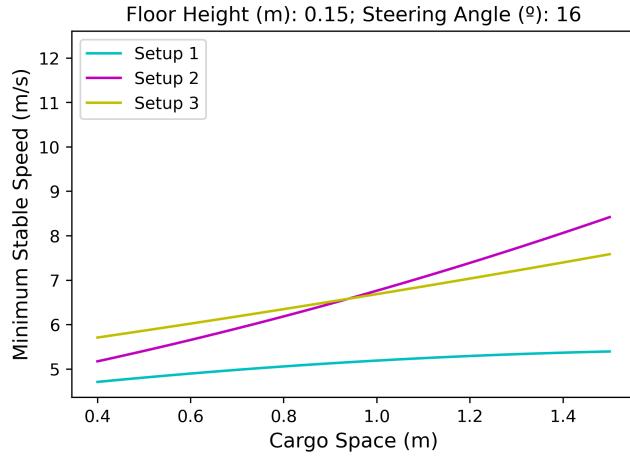


Figure 53: Velocidades mínimas estáveis para cada *Setup*.  $h = 15$  cm e  $\lambda = 16^\circ$ .

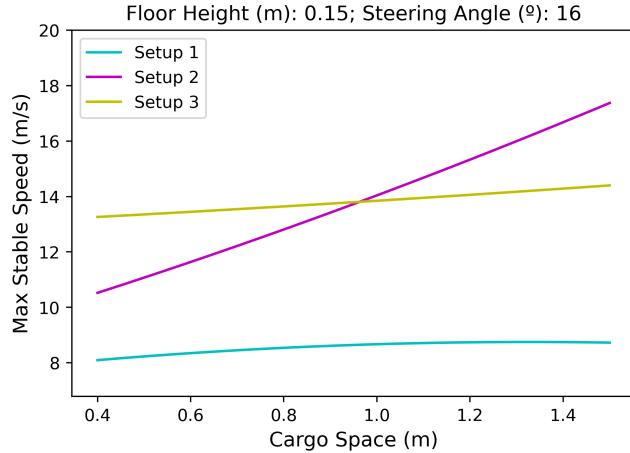


Figure 54: Velocidades máximas estáveis para cada *Setup*.  $h = 15$  cm e  $\lambda = 16^\circ$ .

*Setup 1*. Na Figura 52, podemos observar que com as escolhas feitas, garantimos  $V_{max}$  superior a 8 m/s (cerca de 28.9 km/h), velocidade esta superior a velocidade máxima de trabalho do motor (25 km/h).

Por fim, realizou-se a escolha de  $L_{46}$ , a barra que determina o *Cargo Space*. Nos dois gráficos anteriores, para manter o modelo dentro dos limites mínimos e máximos estáveis, pode-se escolher valores de  $L_{46}$  entre 0.4m e 0.7m, que garantem  $V_{min}$  inferiores a 6.0 m/s.

Sabemos que a capacidade de carga, considerando o uso do bagageiro para entrega de comidas, varia linearmente com o parâmetro  $L_{46}$ , regido pela equação (9.2)  $M = 41.8 * L_{46}$  [kg]. Para fácil visualização, temos abaixo a tabela com os valores de Capacidade de Carga em função de  $L_{46}$ :

$L_{46}$ (m)	Weight Capacity (kg)
0.4 m	16.7 kg
0.5 m	21.0 kg
0.6 m	25.1 kg
0.7 m	29.3 kg
0.8 m	33.0 kg
0.9 m	37.6 kg
1.0 m	41.8 kg
1.1 m	46.0 kg

Para todos os valores de  $L_{46}$ , a capacidade de carga respeita o Peso Sobressalente definido nos requisitos de projeto através do MPW. O valor do Peso Sobressalente máximo calculado é 112 kg. Da Figura 51 sabemos que é possível alcançar a  $V_{min}$  com valores de até 70 cm de comprimento no bagageiro. Dessa forma, escolhemos adotar este valor para o *Cargo Space*, o que equivale, de acordo com a tabela acima, a uma capacidade de carga de cerca de 29.3 kg, acima do limite mínimo imposto de 25 kg nos requisitos de projeto.

<i>Cargo Space</i> ( $L_{46}$ )	Altura (h)	Steering Angle ( $\lambda$ )
0.7 m	15 cm	16º

Com a configuração selecionada, têm-se o CAD da estrutura:

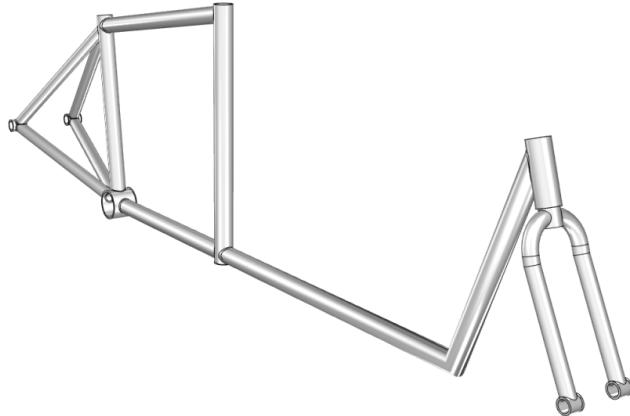


Figure 55: CAD do quadro + garfo

### 13.0.2 Análise de Capacidade de Carga

No capítulo 9.3.2, foi deduzida a equação (9.4) que nos permite calcular a massa total de todas as barras do modelo. Com a configuração definida, é possível realizarmos esse cálculo através do *script* escrito em Python.

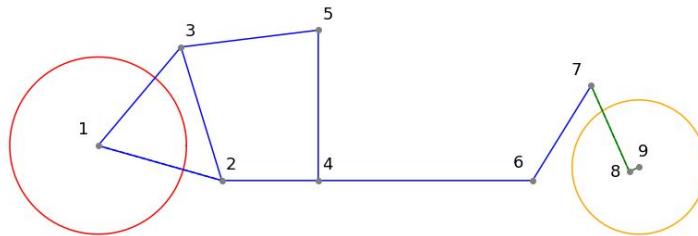


Figure 56: Nós do quadro da bicicleta (1 - 9)

Barra	Massa	Barra	Massa
$L_{12}$	0.62 kg	$L_{45}$	0.47 kg
$L_{13}$	0.61 kg	$L_{46}$	0.59 kg
$L_{23}$	0.38 kg	$L_{67}$	0.34 kg
$L_{24}$	0.40 kg	$L_{78}$	0.37 kg
$L_{35}$	0.45 kg	$L_{89}$	0.03 kg

A massa total das barras é de 4.26 kg, valor superior ao de uma bicicleta convencional mas condizente ao de outros modelos *Long John* observados no Estado da Arte.

Além das barras, têm-se as rodas dianteira e traseira, cujas massas estimadas são respectivamente 1.8 kg e 2.6 kg, totalizando 4.4 kg. As massas do motor, bateria e acessórios foram estimadas anteriormente em 4.5kg, 3.5kg e 10.6 kg respectivamente, totalizando uma massa total de 22.8 kg.

Da equação (9.4), calcula-se que, com a configuração escolhida, a bicicleta terá um Volume de carga de aproximadamente  $0.18 \text{ m}^3$ , equivalente a 180L ou 3 vezes o volume de uma bolsa térmica convencional utilizada pelos entregadores de comida.

No CAD abaixo, com a inclusão do bagageiro, rodas e guidão, é possível visualizar a dimensão desse espaço de carga.

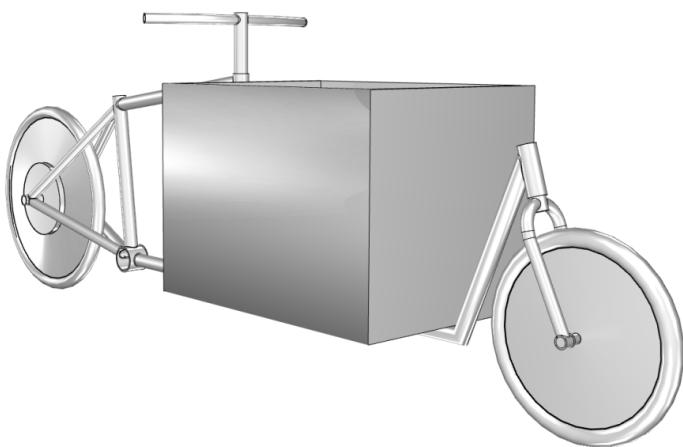


Figure 57: Visão lateral do CAD da bicicleta completa.

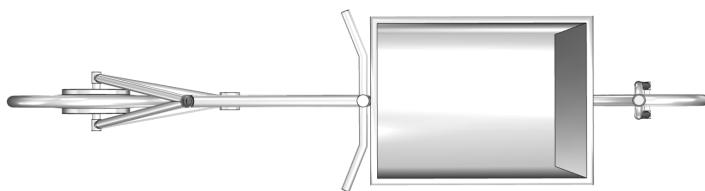


Figure 58: Visão superior do CAD da bicicleta completa.

### 13.0.3 Estabilidade Dinâmica

A estabilidade final do modelo, para cada *Setup* de uso, ficou definida de acordo com os gráficos abaixo. Conforme discutido pro MOORE<sup>11</sup>, a bicicleta alcançara plena estabilidade quando a parte real dos autovalores forem negativas. Para o *Setup* 1, isso ocorrerá de 4.8 m/s quando a parte real das velocidades de *Caster* e *Capsize* (verde mais escuro) cruza a abscissa do gráfico, e segue negativa até aproximadamente 8.2 m/s, quando a velocidade de *Weave* cruza a abscissa, tornando-se positiva. Para os *Setups* 2 e 3, os ranges de velocidades estáveis serão respectivamente entre 6 e 13 m/s, 6 e 13 m/s.

Nos *Setups* 2 e 3, o par de velocidades que cruza a abscissa, definindo a  $V_{min}$  são as velocidades de *Weave* (azul) e *Capsize* (vermelho), permanecendo estas negativas até que a velocidade de *Weave* a cruza de volta. Os ranges de velocidades estáveis para os *Setups* 2 e 3, serão respectivamente entre 5.8 e 12.0 m/s, e 6.0 e 12.5 m/s.

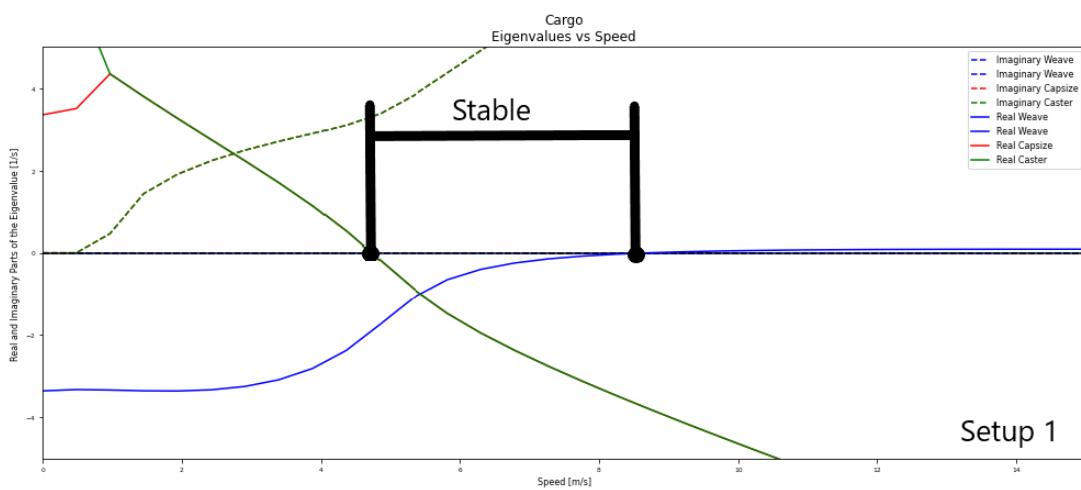


Figure 59: Curva de estabilidade do modelo - *Setup 1*

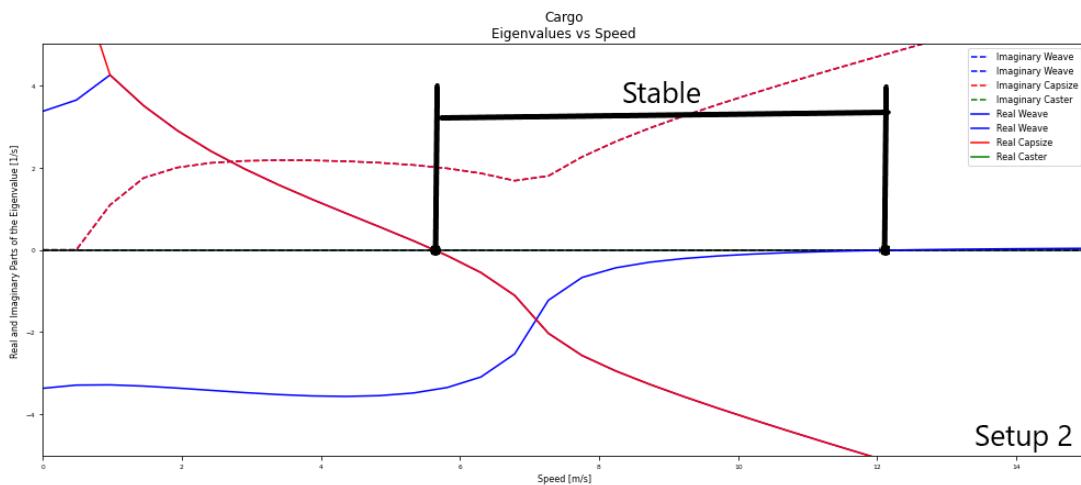


Figure 60: Curva de estabilidade do modelo - *Setup 2*

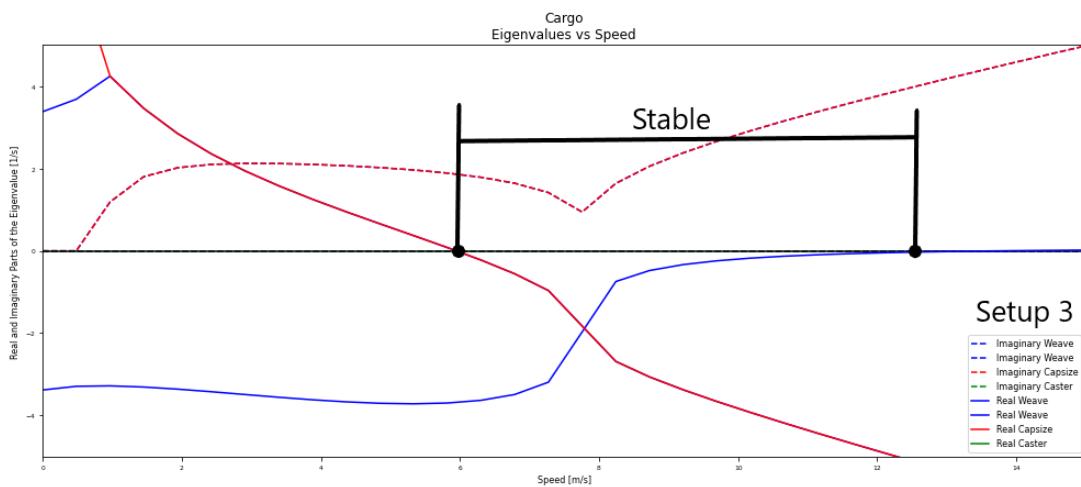


Figure 61: Curva de estabilidade do modelo - *Setup 3*

## 14 BIBLIOGRAFIA

- [1] - KIRKELS, M. Short history of the cargo bike. **International Cargo Bike Festival**, 2016. Acesso em 10/05/2021, disponível em <https://cargobikefestival.com/news/short-history-of-the-cargo-bike/>
- [2] - Bicicletas elétricas. **Aliança Bike**, 2020. Acesso em 10/05/2021, disponível em <https://aliancabike.org.br/dados-do-setor/bicicletas-eletricas/>
- [3] - ANDERLUH, A.; HEMMELMAYR, V. C.; NOLZ, P. Chapter 8 - Sustainable Logistics With Cargo Bikes—Methods and Applications. Sustainable Transportation and Smart Logistics. **Elsevier**, pp. 207-232, 2019
- [4] - GRUBER, J.; KIHM, A.; LENZ, B. A new vehicle for urban freight? An ex-ante evaluation of electric cargo bikes in courier services. **Research in Transportation Business & Management**, v. 11, pp. 53-62, 2014.
- [5] - GRUBER, J.; KIHM, A. Reject or Embrace? Messengers and Electric Cargo Bikes. **Transportation Research Procedia**, v. 12, pp. 900-910, 2016.
- [6] - COVILL, D.; ALLARD, P.; DROUET, J. M.; EMERSON, N. An Assessment of Bicycle Frame Behaviour under Various Load Conditions Using Numerical Simulations. **Procedia Engineering**, v. 147, pp. 665-670, 2016.
- [7] - MOORE, J. K. BicycleParameters. **PyPI**, 2017. Acesso em 18/06/2021, disponível em <https://pypi.org/project/BicycleParameters/>
- [8] - WASKO, C. Hub-Drive VS. Mid-Drive: What to know before buying. **BOSCH eBike Systems**. Acesso em 15/06/2021, disponível em <https://www.bosch-ebike.com/ca/everything-about-the-ebike/stories/hub-drive-vs-mid-drive-ebikes>
- [9] - eBike / pedelec. **Texas Instruments**. Acesso em 15/06/2021, disponível em <https://www.ti.com/solution/electric-bike?variantid=18246subsystemid=19531>
- [10] - WHIPPLE, F. J. W. The stability of the motion of a bicycle. **The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 30, n. 1, 1899.

- [11] - MOORE, J. K. Human Control of a Bicycle. **GitHub**. Acesso em 18/06/2021, disponível em <https://moorepants.github.io/dissertation/index.html>
- [12] - BRUNI, S.; MEIJAARD, J. P.; RILL, G.; SCHWAB, A. State-of-the-art and challenges of railway and road vehicle dynamics with multibody dynamics approaches. **Multibody System Dynamics**, 2020.
- [13] - BECKER, S.; BEHRENSEN, A. Cargo Bikes: Sustainable and Resilient Transport. **Heinrich Böll Stiftung**, 2021. Acesso em 15/06/2021, disponível em <https://eu.boell.org/en/cargo-bikes-sustainable-and-resilient-transport>
- [14] - RONTESCU, C.; CICIC, D.; AMZA, C. G.; CHIVU, O. R.; DOBROTA, D. Choosing the optimum material for making a bicycle frame. **Metalurgija Sisak then Zagreb**, 2015
- [15] - Road Bike Guide Size. **Rutland Cycling**, 2021. Acesso em 23/11/2021, disponível em <https://www.rutlandcycling.com/content/road-bike-size-guide.aspx>
- [16] - Bike Size Chart – How To Choose? 5 Easy Methods. **Bicycle Guider**, 2021. Acesso em 23/11/2021, disponível em <https://www.bicycle-guider.com/bike-articles/bike-size-chart/>
- [17] Bicycle frame materials – explained. 5.1. Processing aluminium and its alloys. **BikeGremlin**, 2021. Acesso em 23/11/2021, disponível em <https://bike.bikegremlin.com/11144/bicycle-frame-materials-explained/5.1>
- [18] - BYERLEY, J. py-MADCAD. **GitHub**, 2018-2021. Acesso em 12/10/2021, disponível em <https://github.com/jimy-byerley/pymadcad>
- [19] - DEMBIA, C. Yeadon. **PyPI**. Acesso em 18/06/2021, disponível em <https://pypi.org/project/pydembia/>
- [20] - Numpy and Scipy Documentation. **SciPy**, 2021. Acesso em 05/12/2021, disponível em <https://docs.scipy.org/doc/>
- [21] - Matplotlib 3.5.0 documentation. **Matplotlib**, 2021. Acesso em 05/12/2021, disponível em <https://matplotlib.org/stable/>
- [22] - Pandas documentation. **PyData**, 2021. Acesso em 05/12/2021, disponível em <https://pandas.pydata.org/docs/>

## APPENDIX A

## APPENDIX B – BETA

## **ANNEX A – ALPHA**

## ANNEX B