

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**GABRIEL CAMPBELL DE OLIVEIRA**

**ESTRUTURA DE CONTROLE DIRECIONAL EM TRICICLO DE  
PROPULSÃO HUMANA EM TRÂNSITO ORGÂNICO URBANO**

**Taubaté**

**2022**

**Gabriel Campbell de Oliveira**

**ESTRUTURA DE CONTROLE DIRECIONAL EM TRICICLO DE  
PROPULSÃO HUMANA EM TRÂNSITO ORGÂNICO URBANO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia & Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa

**Taubaté - SP**

**2022**

**GABRIEL CAMPBELL DE OLIVEIRA**

**ESTRUTURA DE CONTROLE DIRECIONAL EM TRICICLO DE PROPULSÃO  
HUMANA EM TRÂNSITO ORGÂNICO URBANO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia & Materiais.

Data: 30 de maio de 2022.

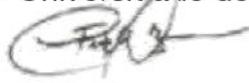
Resultado: APROVADO.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof .Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa

Orientador - Universidade de Taubaté

Assinatura:



Prof. Dr. Jose Rubens de Camargo

Membro Interno - Universidade de Taubaté

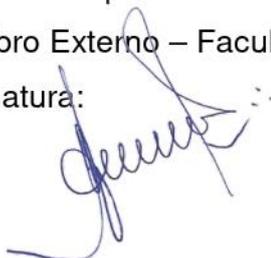
Assinatura:



Prof. Dr. Roque Antônio de Moura

Membro Externo – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

Assinatura:



**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi  
Universidade de Taubaté - Unitau**

O48e Oliveira, Gabriel Campbell de  
Estrutura de controle direcional em triciclo de propulsão humana em  
trânsito orgânico urbano / Gabriel Campbell de Oliveira. -- 2022.  
106 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Pró-reitoria de  
Pesquisa e Pós-graduação, Taubaté, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa,  
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Triciclo. 2. Transporte à propulsão humana. 3. Trânsito orgânico.  
4. Análise mecânica. I. Universidade de Taubaté. Departamento de  
Engenharia Mecânica. Mestrado em Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 629.2273

## RESUMO

O aumento da demanda de transporte de pessoas nas cidades é um problema mundial. O uso de veículos de propulsão humana surge como uma das alternativas promissoras que proporcionam uma forma de transporte urbano mais sustentável (econômica, ambiental e eficiente). Esta pesquisa abrange o desenvolvimento, construção, análise estrutural, e testes de um protótipo funcional físico da estrutura e do sistema direcional de um veículo movido a propulsão ou energia humana para utilização em cidades na forma de trânsito local, ou como é comum dizer, em Trânsito Orgânico Urbano. O projeto é baseado na fusão de um veículo tradicionalmente simples como um triciclo, com um veículo aerodinâmico e robusto conhecido com *Velomobile (Tadpole Recumbent Tricycle)*. Esta diferença sutil, mas muito importante, é que faz deste projeto um veículo único, tanto construtivamente, quanto sob a visão de negócios para a indústria de transportes. A fusão entre um veículo tradicional do tipo triciclo tradicional com um *Velomobile Tadpole* de corrida parece uma grande oportunidade de inserção para o mercado jovem, e com pequenas modificações pode atender outras faixas etárias. Esta pesquisa teve como objetivo projetar a parte inicial deste veículo, que foi a estrutura mecânica e direcional capaz de abrigar um único ocupante de forma confortável, com ampla visibilidade e boa dirigibilidade no trânsito das cidades brasileiras. Nesta pesquisa foi desenvolvido um modelo mecânico da estrutura do veículo e o sistema direcional (volante e dispositivo de direcionamento das rodas), assim como, foi construído e testado um protótipo em escala reduzida para análise dos esforços mecânicos, dirigibilidade e análise de materiais construtivos.

Palavras-chave: Velomobile Tadpole, Triciclo, Transporte à propulsão humana, Trânsito orgânico, Análise mecânica.

## ABSTRACT

The increasing demand of people mobility in cities is a worldwide problem. The use of human-powered vehicles emerges as one of promising alternatives that could provide a more sustainable way of urban transport (economic, environmental and efficient). This research covers development, construction, structural analysis, and testing of a physical functional prototype of structure and directional system of a human powered or propelled vehicle for use in cities in form of local transit, commonly referred as Urban Organic Traffic. The project is based on fusion of a traditionally simple vehicle such as a tricycle with a streamlined and robust vehicle known as Velomobile (Tadpole Recumbent Tricycle). This subtle but very important difference is that it makes this project a unique vehicle, both constructively and from a business perspective for industry transport market. The fusion between a traditional tricycle-type vehicle and a racing Velomobile Tadpole looks like a great insertion opportunity for young market, and with minor modifications, it may suit other age groups. This research aims to design the initial part of this vehicle, the mechanical and directional structure capable of fit a single occupant comfortably, with wide visibility and good drivability in Brazilian cities. In this research a mechanical model of vehicle structure was developed and directional system (steering wheel and wheel steering device), as well as a small scale prototype was built and tested for mechanical stress analysis, drivability and construction materials analysis.

**Keywords:** Velomobile Tadpole, Tricycle, Human Powered Transport, Organic Transit, Mechanical analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos artigos por temas abordados. ....	17
Figura 2 - Distribuição das publicações ao longo do tempo. ....	17
Figura 3 - Distribuição das publicações por tipo de documento. ....	18
Figura 4 – Primeira configuração da bicicleta, em 1817.....	21
Figura 5 – Bicicleta com roda dianteira de grande diâmetro. ....	23
Figura 6 – Uma das primeiras bicicletas fabricadas na configuração moderna, com pedais e transmissão por corrente. ....	24
Figura 7 – Bicicleta com carenagem aerodinâmica.....	26
Figura 8 – Variações na posição do pedal em bicicleta reclinada. ....	27
Figura 9 – Diferentes configurações de bicicletas reclinadas.....	30
Figura 11 – Comparativo da posição do centro de gravidade (ponto em vermelho) em diferentes modelos de bicicletas.....	31
Figura 12 – Distribuição da população mundial entre zona rural e urbana. ....	33
Figura 13 – Espaço ocupado para transporte do mesmo número de pessoas entre ônibus, automóvel e bicicleta. ....	34
Figura 14 - Média anual de publicações sobre bicicletas divididos em períodos de cinco anos. Baseados nas revistas especializadas TRID, Web of Science e TRB Comitee for Bicycle. ....	38
Figura 15 - Porcentagem de percursos realizados utilizando bicicleta.....	38
Figura 16 – Ciclista em um triciclo tadpole. ....	43
Figura 17 – Para quais destinos utiliza a bicicleta como meio de transporte. ..	44
Figura 18 – Principal razão para continuar utilizando a bicicleta como meio de transporte. ....	45
Figura 19 – Faixa etária de ciclistas brasileiro.....	46
Figura 20 – Pinhão e cremalheira ....	49
Figura 21 – Caixa de direção com pinhão e cremalheira. ....	50
Figura 22 – Haste de transmissão de giro entre os eixos. ....	51
Figura 23 - Simulação do giro do volante e do pinhão ....	52
Figura 24 – Detalhe do engranzamento do pinhão e cremalheira.....	53
Figura 25- Simulação do giro do pinhão, avanço da cremalheira e giro da roda. ....	54
Figura 26 – Posição do condutor e campo de visão.....	55
Figura 27– Conjunto cremalheira e pinhão ....	56
Figura 28– Vista do condutor, com detalhe para caixa de proteção.....	57
Figura 29– Vista explodida.....	58
Figura 30 – Largura de ciclofaixa unidirecional. ....	59

Figura 31 - Largura de ciclofaixa bidirecional.....	59
Figura 32 – Distância entre rodas. ....	60
Figura 33 – Distância entre rodas durante uma curva fechada. ....	61
Figura 34 - Curva realizada com as rodas em paralelo.....	62
Figura 35 -Curva realizada com circunferências concêntricas, formadas pela trajetória das rodas.....	62
Figura 36 - Simulação do giro do controle direcional .....	63
Figura 37 - Simulação das principais forças aplicadas na estrutura.....	64
Figura 38 - Tensões resultantes da influência do peso de 180 kg do conjunto, considerando liga de alumínio 6061.....	67
Figura 39 - Deformações da estrutura principal resultante da influência do peso de 180 kg, considerando liga de alumínio 6061. ....	68
Figura 40 - Tensões resultantes da influência do peso de 180 kg do conjunto, considerando fibra de carbono. ....	69
Figura 41 - Tensões resultantes da influência do peso de 180 kg do conjunto, considerando fibra de vidro. ....	69
Figura 42 - Simulação do ângulo de giro do volante e rodas .....	71
Figura 43 - Protótipo em escala reduzida pronto para impressão em 3D .....	73
Figura 44 - Protótipo em escala reduzida montado.....	73

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
HPRA	Human Powered Racing America
IHPVA	International Human Powered Vehicle Association
NBDA	National Bicycle Dealers Association
ONU	Organização das Nações Unidas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivo Geral da Pesquisa	12
1.2	Motivação e Justificativa	13
1.3	Delimitações da Pesquisa	13
1.4	Estrutura e Organização da Dissertação	14
1.5	Metodologia Aplicada	15
1.6	Levantamento e Estudo Bibliográfico	16
1.7	Artigo Publicado	18
<b>2</b>	<b>VEÍCULOS A PROPULSÃO HUMANA</b>	<b>20</b>
2.1	Histórico de Mobilidade Urbana	20
2.1.1	<i>Desenvolvimento da Bicicleta Moderna</i>	21
2.1.2	<i>Desenvolvimento do Triciclo</i>	25
2.1.3	<i>Desenvolvimento da Bicicleta Reclinada</i>	25
2.1.4	<i>Triciclo Reclinado</i>	28
2.2	Desafio do Transporte Urbano	32
2.3	Triciclo Tadpole como Alternativa de Transporte Urbano	42
2.3.1	<i>Conforto do Motorista</i>	43
2.3.2	<i>Velocidade no Percorso</i>	44
2.3.3	<i>Praticidade Operacional da Bicicleta</i>	44
2.3.4	<i>Alternativa Sustentável de Transporte</i>	45
2.3.5	<i>Tendência de Utilização como Veículo Urbano</i>	46
2.3.6	<i>Segurança no Trânsito e Oportunidade no Mercado Nacional</i>	47
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento da Estrutura do Sistema de Controle Direcional de um Veículo Triciclo Tipo Velomobile TadPole</b>	<b>48</b>
3.1	Controle da direção com Sistema Cremalheira e Pinhão	48
3.2	Projeto do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Tadpole	55
3.2.1	<i>Requisitos do Projeto do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Velomobile Tadpole</i>	58
3.3	Simulação dos Esforços Físicos do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Tadpole	63

3.3.1 Características e Parâmetros Utilizados na Simulação do Triciclo do Tipo Tadpole.....	65
3.3.2 Descrição do Programa Computacional e Equipamentos Utilizados para a Simulação do Triciclo do Tipo Tadpole.....	66
<b>4 Resultados das Simulações do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Tadpole.....</b>	<b>67</b>
<b>5 Resultados do Protótipo Físico do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Tadpole.....</b>	<b>72</b>
<b>6 Conclusão .....</b>	<b>75</b>
<b>7 Propostas para a Continuação da Pesquisa .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>96</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivo Geral da Pesquisa

Esta pesquisa analisa os desafios do transporte urbano e o contexto histórico, atual e futuro sobre os meios de transporte movidos à propulsão humana, suas características e suas relações com a sociedade. Em especial, o triciclo na configuração *Tadpole* com duas rodas dianteiras, uma traseira e a posição do condutor reclinada.

É apresentada nessa pesquisa o projeto mecânico deste triciclo com as suas análises estruturais, modelo construtivo e protótipo em escala, como proposta para uso no tráfego das grandes cidades, compartilhando as vias com outros meios de transporte, como automóveis e bicicletas.

A modelagem deste triciclo foi realizada com objetivo de ter um veículo com estrutura e controle direcional que atendam os esforços previstos e a ergonomia necessário para uma boa condução. A especificação dos materiais deste projeto foi realizada com o objetivo de se utilizar materiais comerciais, facilmente encontrados no mercado e o modelo construtivo considerado visa ter uma montagem simples para que o veículo tenha baixo custo de fabricação, sendo viável comercialmente.

Cabe ressaltar as vantagens da utilização deste meio de transporte como baixo custo de aquisição, versatilidade, formato compacto, não causa impactos ambientais, além de ser uma forma de realizar exercício físico. Pode-se considerar que a utilização do triciclo movido a propulsão humana é uma forma de locomoção ambientalmente, socialmente e economicamente sustentável.

Atualmente, a fabricação e utilização de triciclos para mobilidade urbana é realidade em alguns países, porém em uma escala reduzida e de forma tradicional. Entretanto, mesmo o triciclo tradicional ainda é raro no Brasil, pois o país carece de um mercado ativo com fornecedores e consumidores, mesmo que em pequena escala.

## **1.2 Motivação e Justificativa**

A mobilidade urbana é um tema de grande interesse na pesquisa científicas, investimentos e políticas de transporte por todo o mundo (CORWIN; PANKRATZ, 2017). Além disso, é um tema que sempre esteve presente na discussão de modelo de sociedade, desde as civilizações mais antigas até as atuais. Com o rápido crescimento populacional experimentado nos últimos anos, associado ao desenvolvimento de novas tecnologias, o presente e o futuro do transporte se tornaram bastante dinâmicos. Os fatores humanos e sociais, em conjunto com o desenvolvimento tecnológico, são fundamentais na determinação do caminho em que a locomoção de pessoas irá seguir no futuro próximo (SILVEIRA; MAIA, 2015).

Cada vez mais são observadas pesquisas científicas, empresas de tecnologia e políticas públicas associadas ao tema da mobilidade, pois é algo crucial no futuro. Hoje, a matriz energética mundial está centrada nos combustíveis fósseis, no qual o transporte representa uma parcela significativa deste consumo (IEA, 2018). Além disso, a questão da eficiência na locomoção das pessoas, considerando o gasto de energia, a poluição e o trânsito enfrentado nas cidades torna essa discussão ainda mais relevante e necessária.

Neste contexto, o desenvolvimento de um veículo a propulsão humana é importante, tanto para diversificar as formas de trafegar, bem como, possibilitando uma forma ecológica de deslocamento, que tem como resultado melhor qualidade de vida, quer pelo exercício proporcionado ao ocupante, quer pela ausência de combustíveis ou outras fontes de energia motoras que não humana.

Portanto, essa pesquisa visa desenvolver uma proposta de uso de triciclo a propulsão humana como forma de transporte. O desenvolvimento de um projeto mecânico eficiente, robusto e moderno deste veículo, pode tornar o triciclo a propulsão humana atrativo para o transporte de pessoas nas cidades.

## **1.3 Delimitações da Pesquisa**

Esta pesquisa visa o estudo histórico do desenvolvimento de veículos de propulsão humana, uma análise do contexto atual da mobilidade urbana, sob a ótica de diferentes visões como tendências, tecnologias, desafios, cidades e

economia. Assim como as perspectivas do futuro, através da identificação de linha de pesquisas e investimentos.

Acompanhando a tendência da utilização de veículos a propulsão humana, como alternativa ao modelo de transporte centrado no automóvel e apresenta uma intensa pesquisa nos tipos e modelos construtivos de triciclos e propõem o desenvolvimento de um projeto mecânico da estrutura mecânica e do sistema de controle direcional deste veículo.

#### **1.4 Estrutura e Organização da Dissertação**

Esta pesquisa está estruturada em capítulos que tem como objetivo introduzir o tema a ser estudado, analisar o contexto do passado, presente e futuro da mobilidade urbana, o desenvolvimento do projeto mecânico de um controle direcional de triciclo e por fim, a conclusão da pesquisa científica realizada.

O capítulo um desta dissertação apresenta a Introdução, que é composta pela apresentação do problema, da motivação, dos objetivos, da delimitação e da metodologia aplicada.

O capítulo dois trata do histórico da mobilidade urbana no mundo e da análise do passado, presente e futuro deste tema. O desenvolvimento da bicicleta e do triciclo são abordados de maneira detalhada neste capítulo, apresentando as suas principais características e princípios de funcionamento. Também é analisado o contexto da mobilidade urbana nos dias atuais e seus principais desafios no futuro. Ao final, é apresentado o triciclo *tadpole* movido a propulsão humana como uma alternativa de transporte urbano.

O capítulo três apresenta o desenvolvimento do projeto mecânico do controle direcional do veículo *tadpole*, com simulações e construção de um protótipo em escala.

O capítulo quatro apresenta os resultados da simulação computacional e do protótipo físico.

Em seguida, o capítulo cinco apresenta as conclusões e pesquisas futuras.

Por fim, são apresentados as referências bibliográficas e os apêndices, com os parâmetros e desenhos do projeto mecânico.

## **1.5 Metodologia Aplicada**

A metodologia utilizada é a pesquisa aplicada, cujo objetivo é propor uma alternativa para o problema de mobilidade urbana das cidades, baseado no desenvolvimento de um projeto mecânico do controle direcional de um triciclo tadpole. A pesquisa tem como objetivo a aplicação prática na sociedade de um desenvolvimento realizado a partir de uma extensa pesquisa de veículos movidos a propulsão humana.

Um dos objetivos desta dissertação é apresentar a pesquisa realizada de maneira descritiva, ou seja, os experimentos, simulações, projetos e resultados são detalhados ao longo do documento, com os parâmetros, premissas e histórico de desenvolvimento.

Para introduzir a elaboração do projeto mecânico do sistema direcional, foi realizado uma extensa pesquisa bibliográfica sobre os principais veículos movidos a propulsão humana utilizada no mundo, seus contextos históricos e econômicos.

Além disso, é apresentado diversos estudos e indicadores relativos ao problema do trânsito das grandes cidades, o crescente aumento da população mundial, assim como o aumento da porcentagem da população urbana. Estes dados indicam a necessidade do desenvolvimento de soluções para o problema de mobilidade urbana. Observa-se uma tendência no aumento dos estudos, investimentos e pesquisa em novos veículos para transporte de pessoas.

Esses estudos, indicadores, históricos e tendências da mobilidade urbana suportam a utilização do triciclo tadpole como alternativa viável de transporte urbano. Foi desenvolvido o projeto mecânico do controle direcional de um triciclo, buscando elementos e parâmetros de projeto que apresentem um veículo eficiente, confortável e economicamente viável.

O desenvolvimento do projeto e da simulação computacional é realizado no software SolidWorks, que permite uma ampla análise mecânica dos componentes do projeto, assim como suas relações de movimentos dinâmicos.

Para validar o funcionamento do sistema de controle direcional, foi construído um protótipo em escala, que foi desenvolvido e testado nas dependências dos laboratórios do departamento de engenharia mecânica da UNITAU.

Por fim, a pesquisa detalha os resultados obtidos das simulações e do protótipo e apresenta o triciclo *tadpole* como alternativa viável para o transporte urbano. Pesquisas futuras e complementares à essa dissertação são listados ao final deste documento, eles visam a concepção dos demais componentes do veículo.

## **1.6 Levantamento e Estudo Bibliográfico**

O estudo bibliográfico englobou diferentes linhas de pesquisas do tema mobilidade urbana, seja análises realizadas no Brasil, como em outros países do mundo, além de diferentes modelos e estudos de veículos a propulsão humana. A Figura 1 mostra as principais linhas de pesquisas realizadas em formato de gráfico.

Também foi analisado diferentes bibliografias relacionadas ao contexto das cidades, do crescimento populacional, de tendências de tecnologias, pois estes elementos suportam a tese da mudança do modelo de transporte de pessoas, em diferentes localidades.

O foco do levantamento bibliográfico foi a consulta de pesquisas recentes, principalmente artigos publicados em revistas, conforme observado nas Figuras 2 e 3.

Por fim, foi realizado um extenso levantamento de modelos de triciclos e seus respectivos desenvolvimento e características. Essa pesquisa serviu como base para o desenvolvimento do projeto mecânico proposto.

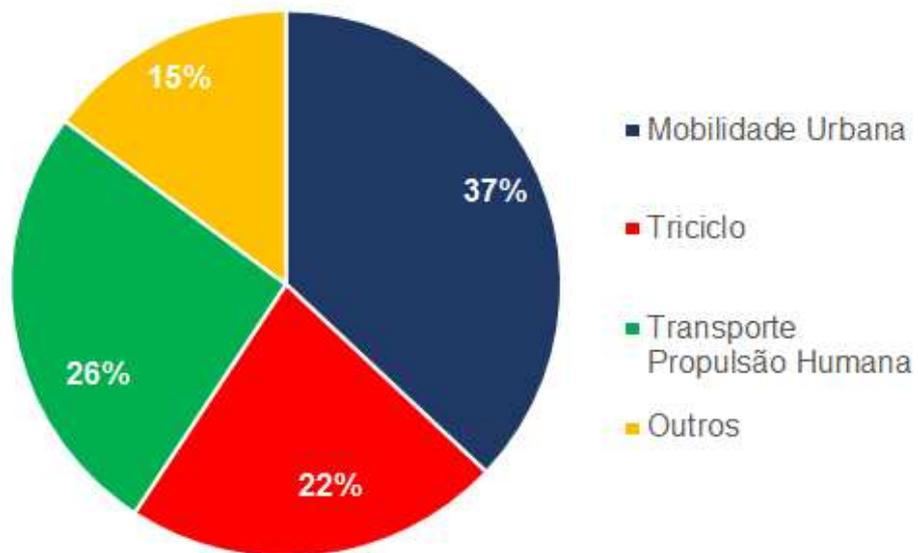


Figura 1 - Distribuição dos artigos por temas abordados.  
Fonte: Próprio Autor (2022).

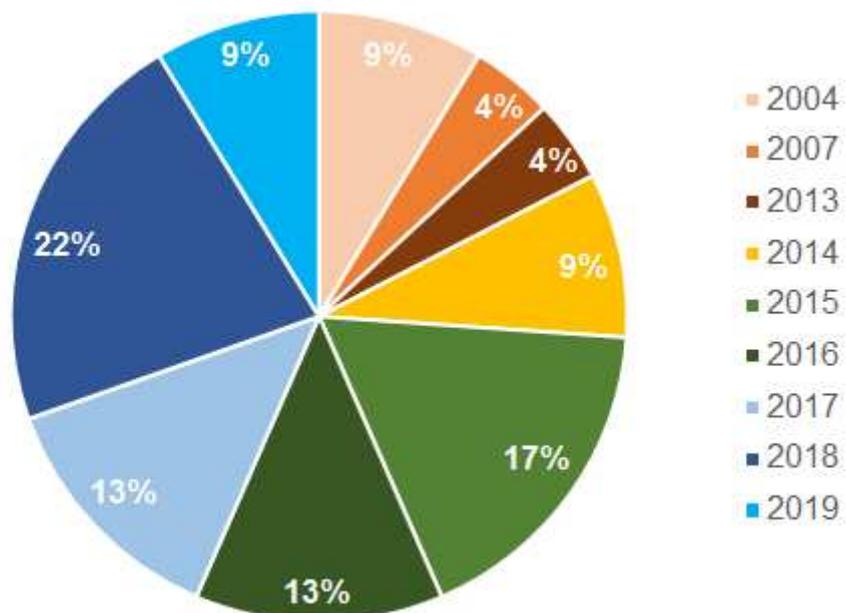


Figura 2 - Distribuição das publicações ao longo do tempo.  
Fonte: Próprio Autor (2022).

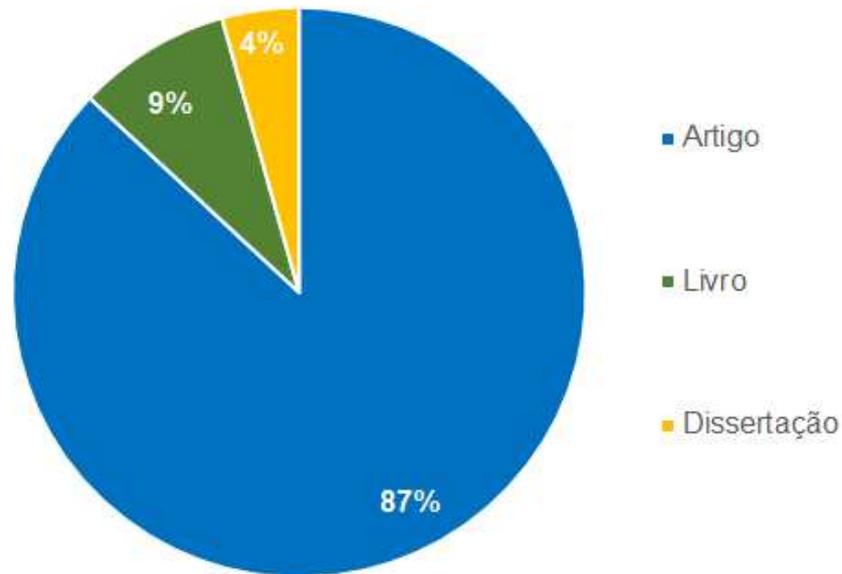


Figura 3 - Distribuição das publicações por tipo de documento.

Fonte: Próprio Autor (2022).

### 1.7 Artigo Publicado

Como parte da pesquisa foi submetido um artigo para publicação na Revista Tecnologia com o título “Uma visão da mobilidade urbana: passado, presente e futuro”, inserido no Anexo A.

Este artigo apresenta a visão temporal da mobilidade humana no mundo, assim como, seus efeitos na cultura e sociedade, no meio ambiente e na economia. O impacto que o passado teve na evolução técnico científica e cultural, sob o aspecto dos veículos utilizados para deslocamentos curtos e rápidos dentro de centros urbanos até hoje é importante para o desenvolvimento humano.

A análise crítica relativa ao panorama presente, deve ser capaz de identificar os principais desafios da mobilidade, quer seja, para o lazer ou tarefas diárias. Imaginando como os seres humanos deverão se locomover no futuro visando serem sustentáveis, eficazes e estruturados de tal forma que seus meios de transporte possam ser parte natural e integral de uma determinada localidade.

Por fim, o artigo mostra os modelos e ideias adotadas em cidades que tiveram sucesso em adaptar seus meios de transporte integrando seus anseios e princípios culturais a mobilidade urbana.

## **2 VEÍCULOS A PROPULSÃO HUMANA**

### **2.1 Histórico de Mobilidade Urbana**

A locomoção de pessoas é um fator importante de desenvolvimento da civilização, desde os tempos mais antigos. Se deslocar de uma comunidade para outra significava encontrar novas culturas, tecnologias e pessoas.

Viagens entre as diferentes civilizações foram fundamentais para a formação do mundo. Entretanto, foi com o desenvolvimento e o uso de ferramentas que fizeram com que o ser humano alcançasse a evolução gradativa, inicialmente utilizando materiais muito simples e com pouca necessidade de transformação. Ao longo dos anos, a complexidade destas tarefas/ferramentas foi aumentando, possibilitando a criação de máquinas inicialmente baseadas apenas na propulsão humana.

Uma das invenções mais populares foi o barco movido a energia humana no século XVII, cuja propulsão era realizada através dos esforços dos seres humanos.

Grandes navios romanos, eram movidos através de centenas de remos. Inicialmente, a força exercida pelas pessoas como uso das mãos, braços ou costas, na época as pernas, eram utilizadas apenas para promover o equilíbrio ou exercer força de reação. Atividades na agricultura e na exploração de recursos naturais utilizavam, predominantemente, os braços e costas, com pouco uso das pernas (WILSON, 2004).

Ao longo do tempo, as civilizações perceberam que utilizar as pernas em novas invenções promovia melhor eficiência nas tarefas. Portanto, outras máquinas foram desenvolvidas com o mesmo princípio de propulsão.

A roda foi a invenção que melhorou muito a eficiência nas tarefas cotidianas humanas, seu uso promoveu uma grande mudança na forma de locomoção terrestre, permitindo a expansão de exploração e transportar suas mercadorias. O uso da roda popularizou a fabricação de charretes e carroças, veículos que geralmente eram movidos a tração humana ou animal. O primeiro veículo a propulsão humana inventado foi a carroça, que era movida por pessoas se deslocando a pé. Esta invenção remonta ao ano de 1690, na França (ANTHONY, 2007).

Em 1817, na Alemanha, surgiu a primeira bicicleta, que no futuro viria a se tornar o veículo de propulsão humana mais popular do mundo (WILSON, 2004).

Por causa dessa popularidade é comum ter a história do ciclismo resumida apenas a bicicleta tradicional, negligenciando outras formas de ciclismo. Porém, a importância da bicicleta como veículo a propulsão humana é indiscutível, sua popularidade foi reconhecida ao longo da história. A bicicleta contribuiu com o desenvolvimento de tecnologias de transporte e continua tendo papel importante até os dias atuais (PUCHER; BUEHLER, 2017).

### 2.1.1 Desenvolvimento da Bicicleta Moderna

Segundo Wilson (2004), a invenção da bicicleta ocorreu no contexto de uma catástrofe natural. Em 1815, o vulcão *Tambora*, na Indonésia, entrou em erupção e expeliu grande quantidade de gases e poeira, fazendo com que o ano de 1816 ficasse praticamente sem incidência de sol. A fome se espalhou na Europa, acarretando na morte de pessoas e de animais. A falta de cavalos impactou de maneira significativa a forma de locomoção na época, o que incentivou a criação de um veículo de duas rodas, movido a propulsão humana, sendo esta a invenção precursora da bicicleta moderna. A Figura 4 ilustra esta invenção, o impulso para o movimento era realizado através do contato dos pés com o solo.

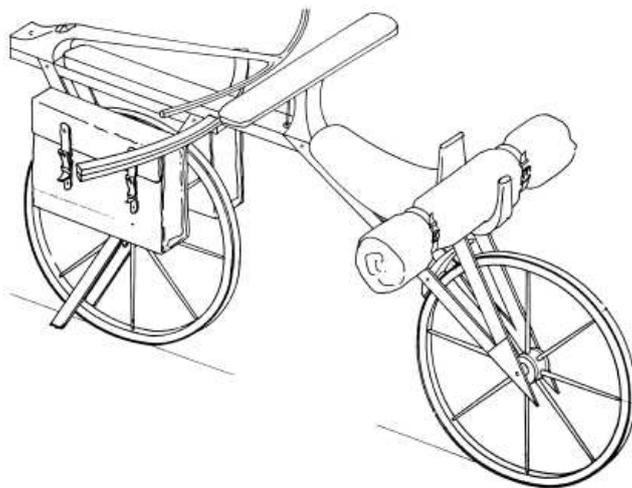


Figura 4 – Primeira configuração da bicicleta, em 1817.

Fonte: WILSON (2004).

Na Alemanha em 1817 o Barão *Karl von Drais*, desenvolveu um veículo com uma barra de direção conectada à roda dianteira e a propulsão era realizada através do impulso proveniente do contato dos pés do condutor com o solo (VAN DE WALLE, 2004).

Apesar do ceticismo inicial quanto ao uso desta máquina, aos poucos a população foi reconhecendo algumas vantagens em seu uso. A velocidade era superior à de um ser humano correndo ou até de uma carroça movida por cavalos. O equilíbrio do condutor sob as duas rodas era realizado através do controle da direção, o que posteriormente viria se tornar o guidão utilizado até hoje (WILSON, 2004).

Nos anos seguintes, o uso deste veículo aumentou principalmente nas camadas mais ricas da população, devido ao seu alto custo de aquisição. Pouco tempo depois a popularidade diminuiu, devido ao aumento do uso de trens na Europa, cuja a locomoção era realizada de maneira rápida e eficiente, cobrindo grandes distâncias. Durante alguns anos os inventores perderam o interesse no estudo de tecnologias de veículos a propulsão humana, dado as descobertas em máquinas a vapor e de combustão (WILSON, 2004).

Este cenário de baixo interesse no uso da bicicleta começa a mudar a partir da invenção do pedal em 1870, que mudou de maneira significativa a praticidade da condução. O uso deste mecanismo proporcionou o equilíbrio e a segurança, era notório que manter os pés acima do piso gerava uma direção mais segura e equilibrada. Os inventores se questionavam em como manter os pés acima do piso de maneira permanente, e ao mesmo tempo possibilitar o impulso, a solução veio através dos pedais (VAN DE WALLE, 2004).

Outra mudança importante ocorrida na bicicleta foi o aumento do tamanho das rodas, como pode ser visto na Figura 5.

Usuários perceberam que o aumento da roda possibilitava um incremento da distância percorrida, tornando a bicicleta mais rápida e eficiente. Logo, a roda tornou-se tão grande quanto fosse possível pedalar, ou seja, o tamanho da bicicleta era associado da perna do condutor (WILSON, 2004).

Segundo Van de Walle (2004), esta configuração era conhecida em inglês como *High-Wheeler*. Rapidamente este modelo se tornou um sucesso comercial.

Devido a sua rapidez, seu uso se popularizou em competições de velocidade, inclusive competindo com carroças movidas a propulsão animal.

Os principais usuários deste modelo eram os jovens, em sua maioria homens, que buscavam conduzir o veículo em velocidades elevadas, assumindo o risco de um eventual acidente. Cabe ressaltar que neste modelo as quedas poderiam acarretar em graves ferimentos, devido à altura em que o condutor se colocava (NURSE, 2016).

Além dos riscos envolvidos, a condução era difícil de ser realizada, requeria bom preparo físico e um bom equilíbrio, e desta maneira o uso desta bicicleta gerava uma sensação de bravura e orgulho. Era comum os ciclistas andarem em parques demonstrando suas bicicletas como se fossem troféus.



Figura 5 – Bicicleta com roda dianteira de grande diâmetro.

Fonte: VAN DE WALLE (2004).

A década de 1870 foi marcada pelo uso extensivo desses veículos com grandes rodas. Ao final desse período, muitas melhorias eram observadas nas bicicletas, como o uso de rolamentos de esferas nas rodas, uso de tubos ocos na estrutura e nos aros e o uso de pneus de borracha.

Entretanto, o uso deste veículo ainda era restrito a uma pequena parcela da sociedade, devido ao alto custo de aquisição e da necessidade de ter um bom preparo físico. Além disso, parte da sociedade fazia críticas a essa forma de transporte por ser difícil das mulheres utilizarem, por conta das suas vestimentas que geravam dificuldade na locomoção.

Em 1880 foi criada a bicicleta de segurança, como pode ser visto na Figura 6 (NURSE, 2016). Neste modelo o condutor sentava entre as duas rodas, o pedal ficava logo abaixo, próximo à roda traseira, muito similar ao dos dias atuais.



Figura 6 – Uma das primeiras bicicletas fabricadas na configuração moderna, com pedais e transmissão por corrente.

Fonte: WILSON (2004).

A configuração de bicicleta foi um grande sucesso, mais de 100 (cem) anos após sua invenção os modelos de hoje são muito parecidos e o condutor dirige sentado entre as duas rodas, com transmissão através de correntes e pneus com ar.

Após um longo período no qual os veículos a combustão dominavam todos os meios de transporte, foi somente no ano de 1970, o uso da bicicleta voltou a crescer por conta da popularidade em competições de velocidade, assim como, uma alternativa barata e simples ao trânsito das grandes cidades (WILSON, 2004).

Ao final do século XX, a bicicleta passou a ter grandes avanços tecnológicos, como suspensão traseira e dianteira, marchas com diversas

relações de transmissão, discos de freios com acionamento hidráulico, estruturas de alumínio, fibras de carbono, entre outros.

O desenvolvimento da fabricação de rolamento de esferas, produção de tubos de aço, uso de estampagem para fabricação de peças metálicas, transmissões por correntes, são apenas alguns dos avanços tecnológicos proporcionados pelo surgimento da bicicleta.

### **2.1.2 Desenvolvimento do Triciclo**

O triciclo (bicicleta de três rodas) é uma excelente alternativa para o problema de equilíbrio da bicicleta de duas rodas. Com o tempo foram criados veículos de três e até mesmo de quatro rodas. Este diferencial tornou mais fácil o equilíbrio e permitia uma posição mais confortável para o motorista.

Diversos modelos diferentes foram criados, porém devido aos materiais da época, o peso total destes triciclos ou quadriciclos era muito elevado, o que tornava muito difícil a sua propulsão, sendo necessário um grande esforço físico (WILSON, 2004).

Uma configuração alternativa na posição do condutor inclinado, posiciona com que os pés ficam a sua frente, apoiados nos pedais. Essa posição também faz com que o centro de gravidade fique mais próximo ao chão. A força de reação dos pedais nas bicicletas inclinadas é aplicada apenas pela força das próprias pernas do condutor sem a necessidade de se preocupar com o equilíbrio, o que proporciona um grande aumento na velocidade.

Em 1930 na Europa, foi criado o *Velocar*, um tipo de veículo de quatro rodas em que o condutor dirigia na posição inclinada e impulsionava através dos pedais. Diversos velocistas bateram recordes de tempo e de velocidade.

### **2.1.3 Desenvolvimento da Bicicleta Reclinada**

Após a estabilização e popularização do uso da bicicleta, houve um aumento do interesse e no número de pessoas que disputavam competições de velocidade. Como consequência, as pessoas buscavam alcançar formas de

serem cada vez mais rápidos, seja através da melhora da técnica do ciclista ou da melhora do equipamento.

Com isso, diversas novas configurações foram testadas. Os elementos da bicicleta foram aperfeiçoados, como a melhoria da eficiência dos elementos mecânicos (rolamentos, transmissões de corrente, redução do peso da estrutura, entre outros), redução da resistência do pneu junto ao solo (novos formatos e materiais para pneus) e diminuição da resistência do ar.

Ao longo desses desenvolvimentos, foi observado que um dos principais potenciais fatores para incremento da velocidade era a redução da resistência do ar, do ponto de vista da técnica de ciclismo foi observado uma tendência em que os ciclistas se colocavam em posição menos ereta e mais agachada, inclinando o corpo em direção ao guidão.

Nesse cenário, se popularizou os estudos de aerodinâmica, no qual os inventores começaram a testar novos modelos de veículos mais eficientes. Segundo Van de Walle (2004), por volta de 1913 foi criado o “*Velo Torpille*”, como pode ser visto na Figura 7. Esse veículo alcançou uma velocidade média de ~60km/h, graças a sua eficiência aerodinâmica.

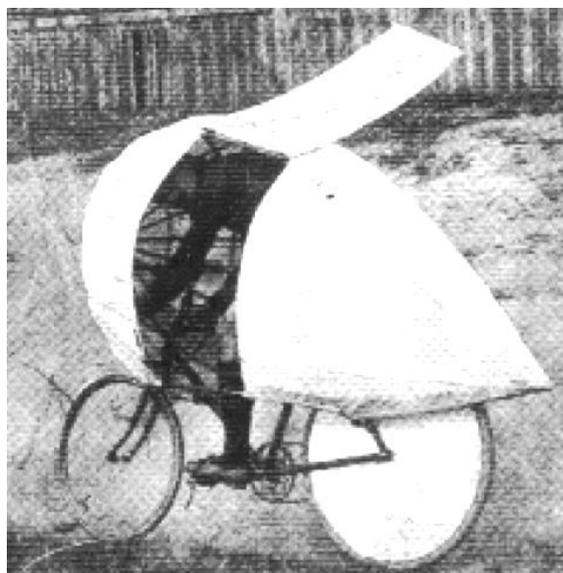


Figura 7 – Bicicleta com carenagem aerodinâmica.

Fonte: VAN DE WALLE (2004).

Além do “*Velo Torpille*”, diversos outros modelos de bicicletas com carenagem aerodinâmica surgiram, porém embora eles eram mais velozes que

as bicicletas convencionais, seu modelo construtivo o tornavam caros e inviáveis do ponto de vista comercial.

Por volta de 1932, um novo modelo foi criado, com o objetivo de obter resultados relevantes em competições de velocidade, esse modelo foi chamado de bicicleta reclinada. O condutor ficava posicionado próximo a roda traseira, com as pernas esticadas em direção a parte da frente da bicicleta, onde ficava os pedais. Desta forma, a resistência do ar era reduzida (VAN DE WALLE, 2004).

Diferentes configurações de bicicletas reclinadas foram criadas, sendo que a característica mais comum entre elas é a posição do pedal, que fica à frente do condutor, localizada na roda dianteira. Esta posição permite que o condutor fique em uma altura menor, mais próxima do solo, com os pés esticados para frente.

Apesar desta configuração ser a mais comum dentre as bicicletas reclinadas, há pequenas variações na posição do pedal, que influenciam no desempenho e na direção do veículo, como pode ser visto na Figura 8.

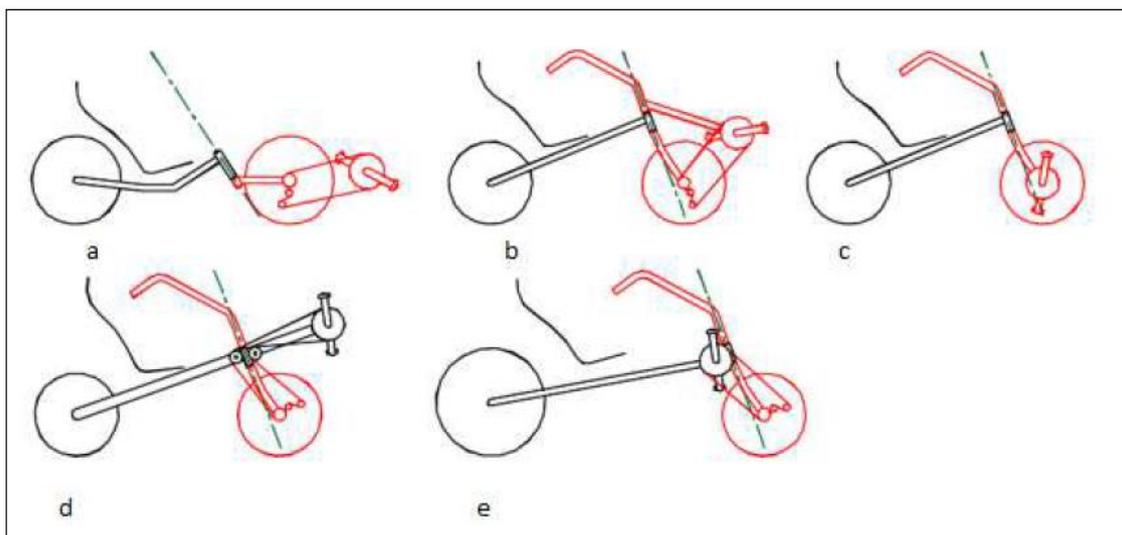


Figura 8 – Variações na posição do pedal em bicicleta reclinada.

Fonte: NURSE (2016).

A principal diferença entre os modelos vistos na Figura 8 está na fixação do pedal em relação à estrutura da bicicleta. Nos modelos 8a, 8b e 8c, o pedal está fixo na roda e no guidão, portanto ele possui um grau de giro em relação a estrutura da bicicleta. É possível notar que não há giro do pedal em relação ao guidão e a corrente, mas há em relação ao banco do condutor, o que permite

que o ciclista guie a bicicleta em curvas utilizando a inclinação dos pés. Nos modelos 8c e 8e, o pedal está fixado na estrutura da bicicleta, com giro independente do guidão. Portanto, nesta configuração a corrente que é responsável por acionar a tração da roda, que gira em relação a toda a estrutura da bicicleta.

Além da fixação do pedal, há outros pequenos detalhes que influenciam no desempenho de cada uma das configurações. A bicicleta que pode ser vista na Figura 8 modelo “a”, utiliza o peso do condutor para estabilizar a direção. O que faz com que seja necessário um pouco mais de prática para aprender a conduzir este veículo. A direção pode ser realizada apenas utilizando os pés, sem que seja necessário a presença de guidão.

No modelo “b” o peso do condutor não influencia na estabilidade de direção, tornando um veículo mais fácil de ser conduzido. A configuração do modelo “c” tem o pedal compartilhando o mesmo eixo da roda dianteira, separados por uma caixa de transmissão, que permite a variação da rotação entre eles. Neste modelo, não é utilizado corrente de transmissão.

Os modelos “d” e “e” a corrente gira em relação ao eixo da estrutura da bicicleta. No caso do modelo “d”, a corrente é isolada em duas partes através de uma coroa dentada, com isso a porção horizontal da corrente não apresenta giro em relação a estrutura e a parte vertical gira, acompanhando o movimento da roda e do guidão.

Por fim, no modelo “e”, os pedais ficam praticamente na vertical em relação ao eixo da roda, neste caso, é necessária uma placa de proteção na coroa dentada para que com o giro da corrente a mesma não desacople do pedal. Pode-se concluir, portanto, que há diversas configurações da bicicleta reclinável, sendo a definição da posição do pedal a ser definida de acordo com os benefícios esperados.

#### **2.1.4 Triciclo Reclinado**

A fabricação dos primeiros modelos de triciclos foi realizada no início de 1990. Diferentes configurações de triciclos foram desenvolvidas, sendo aqueles possuíam duas rodas dianteiras e uma traseira ficaram conhecidos como

*tadpole*. Nesta configuração o pedal está fixo em relação à estrutura do veículo. (NURSE, 2016).

Este modelo foi desenvolvido por *Paul Sims*, na Austrália, destinadas a pessoas que buscavam realizar longos passeios com o triciclo, pessoas com problemas físicos ou mesmo para competições de velocidade. Esta gama de opções se deve à facilidade de direção associado à uma estrutura que garante o equilíbrio do movimento (NURSE, 2016).

Pouco tempo depois, Paul desenvolveu a configuração de duas rodas traseiras e uma dianteira (*Delta trike*), no qual as inclinações das rodas traseiras eram paralelas entre si durante a realização de curvas (NURSE, 2018).

Esta configuração se popularizou em disputas de velocidade, associações como a Corrida de Veículos a Propulsão Humana dos Estados Unidos (*Human Powered Racing America - HPRA*) promovia competições em que a modelo de bicicletas e triciclos eram de livres escolhas dos competidores. Na Figura 9 é possível ver diferentes tipos de configurações de triciclos.

Segundo Beauchamp (2015), em 2009 o velocista *Tim Hicks* desenvolveu um triciclo, de duas rodas traseiras e uma dianteira, em que o banco acompanhava a inclinação das rodas, similar ao desenvolvido por *Paul Sims*, pois acreditava que esta configuração permitia uma maior velocidade e estabilidade em situação de interferência de vento.

Os resultados obtidos com esse triciclo foram surpreendentes, ganhando destaque nas competições de velocidade. Com isso, novos veículos foram surgindo nas competições promovidas pela HPRA, tornando esse modelo mais popular entre os competidores (NURSE, 2016).

A utilização e fabricação de bicicletas reclinadas não ficou restrita à competidores de velocidades, outros entusiastas desse modelo desenvolveram novos veículos com suas características próprias.

O americano *Vi Vuong* criou diversas versões de triciclos, utilizando materiais provenientes de bicicletas, reduzindo de maneira significativa os custos de produção.

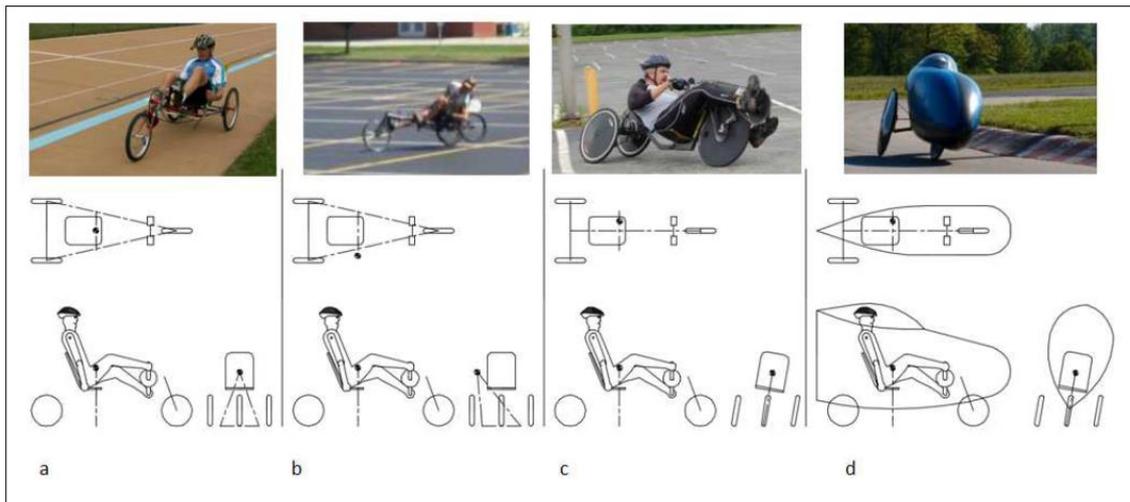


Figura 9 – Diferentes configurações de bicicletas reclinadas.

Fonte: NURSE (2016).

O ciclista *Steve Nurse* também criou novas configuração e modelos de triciclos. Através de testes observou que o aumento do diâmetro da roda promovia uma melhor suspensão para o veículo, os impactos ao passar sobre obstáculos que eram melhor absorvidos.

Apesar do destaque para este modelo tradicional, nos últimos anos foram realizados diversos desenvolvimentos em novas bicicletas. Em 1976 foi criado a Associação Internacional de Veículos a Propulsão Humana (*International Human Powered Vehicle Association- IHPVA*).

Neste período foi comprovado que a bicicleta reclinada se locomovia mais rápido em comparação à bicicleta tradicional, considerando o mesmo esforço, pois a menor área na parte da frente do conjunto veículo e condutor, acarretava em um menor coeficiente de arrasto. Conseqüentemente, em uma menor força contrária ao movimento (NURSE, 2016).

Com isso, ocorreu uma pequena revolução no desenvolvimento de bicicletas, principalmente aquelas que tinham como objetivo competições de velocidade.

Entretanto, um estudo da Associação Nacional de Comerciantes de Bicicletas dos Estados Unidos (*National Bicycle Dealers Association - NBDA*), as vendas de bicicletas reclinadas representam apenas 2% do mercado (NBDA, 2015).

No contexto atual, surgem diversas iniciativas de desenvolvimento de novos modelos de veículos permitindo que bicicletas ou triciclos reclinados passem a ser cada vez mais populares. Entretanto, em alguns lugares, o triciclo ainda é associado à utilização por pessoas mais velhas, devido alguma dificuldade física para condução de bicicleta. Porém, os entusiastas e fabricantes de triciclos defendem que este veículo permite que pessoas de diferentes idades utilizem, pois ele possui diversas outras vantagens, além da facilidade de condução.

Importante ressaltar que triciclos reclinados atingem maiores velocidades em comparação com a bicicleta tradicional, considerando o mesmo esforço, por possuir uma melhor aerodinâmica.

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para comprovar essa vantagem da velocidade em relação aos esforços, o principal fator que contribui para isso é a menor área frontal deste veículo e conseqüentemente um menor coeficiente de arrasto. A grande vantagem dos triciclos é a melhor estabilidade e equilíbrio. Ao conduzir uma bicicleta é necessário que o condutor mantenha o equilíbrio dinâmico, nos triciclos isto não é necessário. Além disso, o centro de gravidade do conjunto condutor e veículo fica mais próximo ao solo no caso do triciclo, o que gera maior estabilidade (Figura 11).



Figura 11 – Comparativo da posição do centro de gravidade (ponto em vermelho) em diferentes modelos de bicicletas.

Fonte: NURSE (2018).

Os triciclos permitem que a condução fique mais similar à de uma bicicleta, simplificando a realização de curvas fechadas, e permitindo que o veículo seja mais alto e estreito, movendo o centro de gravidade.

Estes novos modelos de triciclos ainda apresentam desafios para o desenvolvimento de seus diferentes componentes, como direção, freios, suspensão e mecanismo de inclinação. A dificuldade se intensifica em triciclos tipo *tadpole*, duas rodas dianteiras e uma traseira, no qual o controle direcional é realizado pelas duas rodas dianteiras, que estão ligadas mecanicamente, este movimento deve ser feito de maneira sincronizada e paralela.

Outro desafio para os triciclos é o mecanismo de suspensão, no caso das bicicletas o condutor está acima dos pedais o que permite que ele ao passar por uma protuberância na via ele compensa o impacto movendo-se acima do banco, utilizando suas pernas como amortecedor. Isso não pode ser realizado em um triciclo, pois o condutor não está acima dos pedais, portanto este impacto é transmitido de maneira direta ao condutor.

Para evitar este impacto, é necessário que esses veículos tenham um mecanismo de suspensão eficiente. Uma maneira de minimizar esse efeito é com a utilização, de rodas maiores evitando a transmissão do impacto ao corpo do condutor.

Pode-se concluir que os triciclos apresentam uma alternativa interessante de veículo a propulsão humana. Portanto, faz-se necessário um desenvolvimento constante deste modelo para que os benefícios sejam reconhecidos pelos usuários e que gradativamente os custos sejam reduzidos.

## **2.2 Desafio do Transporte Urbano**

As invenções dos diversos veículos, quer sejam a propulsão humana, quer sejam movidos à combustíveis fósseis ou elétricos, sofreram algumas modificações significativas, nas últimas décadas. Isso porque houveram mudanças na vida cotidiana das civilizações, cuja a principal foi o aumento na quantidade de pessoas que passaram a viver em grandes centros urbanos. Isso ocorreu devido ao grande fluxo migratório, conhecido como êxodo rural, no qual grande número de pessoas migrou das zonas rurais para as grandes cidades em busca de melhores oportunidades.

Este fenômeno ocorre principalmente nos países em desenvolvimento. Segundo relatório das Nações Unidas (UN, 2018), países em desenvolvimento possuem uma taxa de crescimento urbano superior ao dos países desenvolvidos

tiveram no passado, como pode ser visto na Figura 12, que mostra a taxa de crescimento urbano quando comparado ao crescimento rural. É fácil perceber a tendência crescente da inversão do movimento populacional rural para urbano que vem ocorrendo desde a década de 50. Observa-se que em ~30 anos a inversão deverá ter sido alcançada.

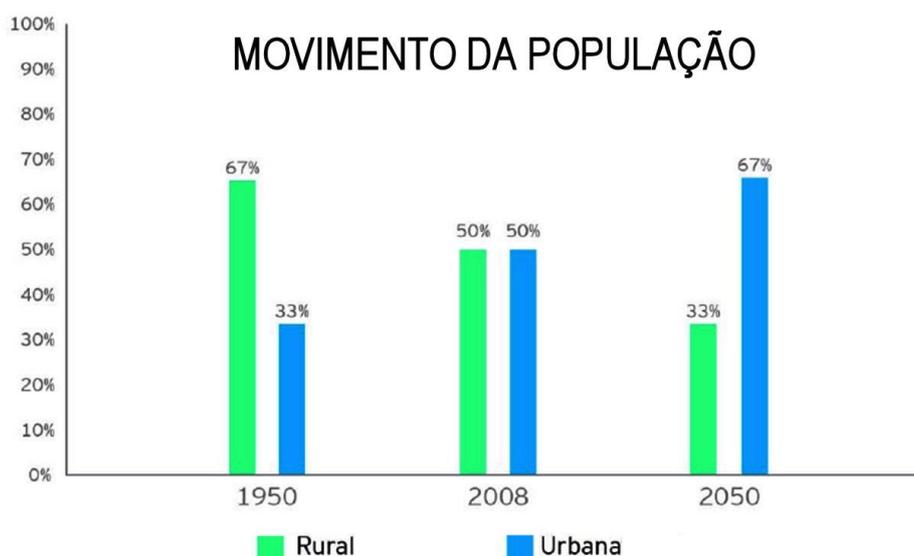


Figura 12 – Distribuição da população mundial entre zona rural e urbana.  
Fonte: EY (2017).

Esse intenso crescimento faz com que as cidades com maior número de habitantes necessitem de maior diversificação e quantidade maior de meios de transporte.

Um dos efeitos desse rápido crescimento populacional foi o aumento da área das cidades, pois a ocupação dos espaços geralmente é feita de maneira desorganizada. Associado a isso o aumento do número de veículos automotivos e das distâncias percorridas diariamente, devido a desorganização da ocupação territorial, pioram a mobilidade urbana e prejudicam a eficiência dos meios de transporte.

Durante muito tempo, a utilização de veículos automotivos no sistema de transporte público foi o mais comum em grandes centros urbanos, no qual os modais não motorizados ou a propulsão alternativa, incluindo a humana, não tiveram o mesmo incentivo.

Neste contexto de crescimento do uso de veículos automotivos e o tamanho das cidades fizeram com que o trânsito se tornasse um problema. Hoje grandes centros urbanos possuem congestionamentos crônicos.

Portanto, uma das principais ações para diminuir a quantidade de veículos automotivos é substituição gradual dos meios de transporte e da melhoria organizacional das cidades, permitindo que a população possa optar por outros modais menos problemáticos.

O trânsito gerado pelo uso intensivo de automóveis torna o deslocamento em grandes cidades um desafio nos dias de hoje. Os automóveis ocupam um grande espaço físico nas avenidas e ruas, e em muitas viagens o potencial de transporte de pessoas é subutilizado, pois é comum a utilização deste tipo de transporte para locomover uma ou duas pessoas. A Figura 13 exemplifica esse problema, e mostra a mesma quantidade de pessoas sendo transportadas por ônibus, bicicleta e automóveis particulares. Pode-se observar que o transporte de automóveis possuía maior ocupação nas vias de transporte.



Figura 13 – Espaço ocupado para transporte do mesmo número de pessoas entre ônibus, automóvel e bicicleta.

Fonte: DIXON *et al.* (2019).

Uma das consequências do espaço ocupado pelos veículos é a expansão dos efeitos do congestionamento por diferentes ruas, tornando os centros urbanos que possuem uma alta densidade populacional, uma região de difícil locomoção.

Além disso, o congestionamento gerado pelo o uso extensivo de automóveis é intensificado em horários de pico, início da manhã e final de tarde, tornando o deslocamento das pessoas um desafio ainda maior nessas condições e horários.

Desta forma, se faz necessário repensar o modelo de crescimento e infraestrutura das cidades possivelmente desocupando progressivamente os centros comerciais urbanos. Porém uma das consequências da desocupação dos centros comerciais das cidades é o progressivo aumento das distâncias percorridas pelas pessoas de suas atuações profissionais até as suas residências, dificultando a utilização de transportes menos rápidos e não motorizados.

Esse fenômeno da expansão do uso de automóveis em detrimento de outros modais, ocorreu em quase todos os países. No Brasil (MACHI; ALONSO, 2015 e CET SP, 2018) na cidade de São Paulo, o aumento da frota de automóveis foi incentivado pelas esferas governamentais, não só devido ao crescimento do tamanho das cidades, mas também devido aos subsídios concedidos pelo governo.

O efeito disso pode ser observado no Quadro 1, no qual é possível observar a composição da frota da cidade de São Paulo no ano de 2017.

Quadro 1 - Composição da frota da cidade de São Paulo em 2017.

Tipo de transporte	Composição da frota (%)
Automóvel	79,2%
Motocicleta	15,3%
Ônibus Urbano	2,7%
Caminhão	1,5%
Ônibus Fretado	0,4%
Bicicletas	0,9%

Fonte: CET SP (2018).

Segundo uma pesquisa de mobilidade da região metropolitana de São Paulo realizada pelo METROSP (2013), a quantidade de veículos automóveis particulares, entre 2007 e 2012 na cidade de São Paulo, cresceu 18%, enquanto que o incremento de transporte não motorizados foi de apenas 8%.

A taxa de veículos motorizados nesse período foi de 212 (duzentos e doze) veículos para cada 1.000 (mil) habitantes. Foi também identificado um

aumento expressivo do uso de automóveis. Estas mudanças fizeram com que o volume de tráfego variasse significativamente, em contrapartida o sistema viário tornou-se incapaz de atender essa demanda crescente.

Em muitas cidades, a solução proposta para contornar esse problema foi a expansão das vias existentes e construções de novas rotas, através de altos investimentos públicos. Entretanto, os efeitos desses investimentos não trazem a redução dos congestionamentos. A expansão da infraestrutura viária, na maioria das cidades, é insuficiente em comparação com a demanda solicitada.

Um estudo realizado pela Escola de Planejamento Urbano de Montreal (MACHI; ALONSO, 2015) mostra que a estratégia de investimentos, ao invés de resolver o problema, na verdade agravou, pois incentivou o aumento da frota veículos automotivos. Este efeito negativo é observado principalmente a médio e longo prazo. Portanto, pode-se concluir que uma das soluções para os problemas crônicos de trânsito passa pelos incentivos a substituição dos modais de transporte e não só pelos investimentos na expansão e melhoria da malha viária.

Um exemplo de cidade na região do Vale do Paraíba que está estruturando essa substituição de modais de transporte é São José dos Campos. Segundo o plano diretor de mobilidade urbana da cidade (2015), atualmente apenas 3% das viagens são realizadas por bicicleta. Porém, através de algumas iniciativas de médio a longo prazo a cidade tem a expectativa de incrementar o número de veículos movidos a propulsão humana.

Como diretriz do plano, há a priorização dos modos de transportes não motorizados sobre os motorizados e uma das ações tem como objetivo permitir o uso seguro das vias públicas, principalmente no centro da cidade, pelos veículos movidos a propulsão humana em coexistência com os veículos motorizados. Essa implantação na cidade de São José dos Campos se dará a partir da identificação de perímetros na cidade em que terá esse compartilhamento das vias de transporte. Para garantir a segurança e a eficiência dessa estratégia, serão identificados o início e fim do perímetro, através de sinalização, assim como elementos físicos para controle de velocidade e campanhas educativas para coexistência de diferentes modais.

A expansão desenfreada e crescente da utilização de automóveis leva à um futuro não sustentável da mobilidade urbana, tanto do ponto de vista sócio ambiental quanto econômico. O planejamento urbano das cidades deve considerar alternativas a esses novos e inteligentes modais.

Em países da Europa o uso de automóveis tem sido substituído principalmente por transporte públicos, como metrô e trens, e também, por veículos a propulsão humana como a bicicleta. A redução do uso de veículos automotivos é motivada principalmente pelos custos na compra, custos de manutenção, custo dos combustíveis e o tempo gasto em congestionamentos e trânsitos.

Desta forma, a bicicleta torna-se uma alternativa relevante para contornar esses problemas, investimento em políticas de incentivo a esse modal é uma tendência na nossa sociedade moderna. Algumas cidades, principalmente nos países desenvolvidos, possuem uma cultura de infraestrutura desenvolvida que estimula e cuidados ciclistas.

A bicicleta é provavelmente o modal de transporte urbano mais sustentável desenvolvido pela sociedade (PUCHER; BUEHLER, 2017), viável não só para pequenas viagens, como também, para percursos médios e longos.

Por conta das características deste modal, que é por natureza ecologicamente correto e importante para condicionamento físico humano, é também, importante na redução da necessidade de espaço físico necessário e economicamente viável, tanto relativo ao equipamento quanto na infraestrutura necessária.

Atualmente a bicicleta tem despertado muita atenção da comunidade científica principalmente em seus novos desenvolvimentos. Nos últimos anos observa-se forte tendência de pesquisas relacionadas a esse modal, conforme pode ser visto na Figura 14.

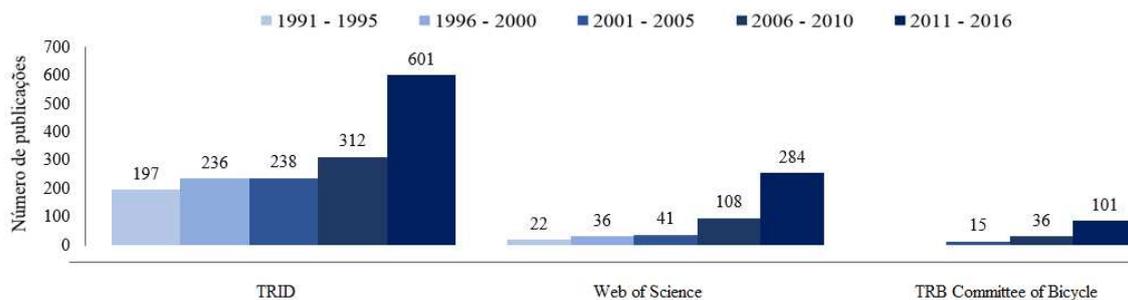


Figura 14 - Média anual de publicações sobre bicicletas divididos em períodos de cinco anos. Baseados nas revistas especializadas TRID, Web of Science e TRB Comitee for Bicycle.

Fonte: PUCHER; BUEHLER (2017).

O aumento das pesquisas em bicicletas é observado também, um crescimento de conferências acadêmicas a respeito das bicicletas e suas derivações em diferentes países. Cada vez mais é possível observar novas organizações internacionais de divulgação e melhorias nas bicicletas. Com isso, é promovida de maneira consistente este meio de transporte urbano.

Experiências bem-sucedidas de incentivo ao uso das bicicletas em países como, Holanda, Dinamarca e Alemanha reforçam a possibilidade deste modal ser utilizado de maneira mais ampla em diversos locais. Na Figura 15 é possível notar que os países pioneiros na ampla utilização deste meio de transporte urbano, assim como, as diversas cidades no mundo estão acompanhando essa tendência.

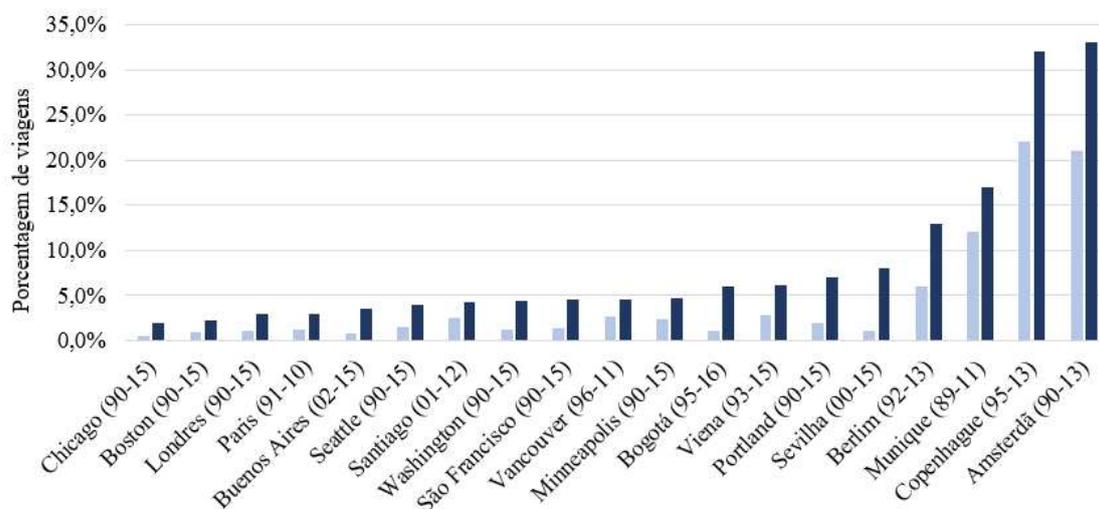


Figura 15 - Porcentagem de percursos realizados utilizando bicicleta.

Fonte: PUCHER; BUEHLER (2017).

O uso de bicicletas deve aumentar nos próximos anos devido as recentes inovações (PUCHER; BUEHLER, 2017) tais como: compartilhamento de bicicletas (*bikesharing*), e a ampla comercialização de bicicletas elétricas (*e-bikes*).

O primeiro sistema em larga escala de compartilhamento de bicicletas foi criado na cidade francesa de Lyon no ano de 2005 (FISHMAN, 2016), com cerca de apenas mil e quinhentas bicicletas. Hoje, o mundo possui cerca de mil e trezentos sistemas de compartilhamento de bicicletas com milhares de unidades, quase o mesmo número do total de bicicletas que teve início o primeiro sistema de compartilhamento. Hoje estes sistemas espalhados pelo mundo totalizam cerca de três milhões e meio de bicicletas operando no modo de compartilhamento.

Esta forma de utilização aumentou de maneira significativa a disponibilidade de bicicletas, flexibilizou as rotas de transporte, e possibilitou o uso em conjunto com outros meios de transporte, como os metrô. Estes sistemas ainda estão amadurecendo tecnologicamente e ainda deve alcançar um grande aumento nessa forma de utilizar as bicicletas.

Ao mesmo tempo, observa-se que o uso deste tipo de serviço diminui o número de viagens de veículos automotivos entre ~2% e 20%, dependendo da cidade analisada. Em Londres no Reino Unido foi o que conseguiu a menor redução (~2%), e em Brisbane na Austrália a maior redução (~20%) de uso de automóveis (FISHMAN *et al.*, 2014).

Outra inovação atual são as bicicletas com tração híbrida humano-elétrica, as chamadas *e-bikes*. Cerca de 90% das bicicletas, mais de quarenta milhões, estão localizadas na China (CAMPBELL *et al.*, 2016). O número de *e-bikes* no norte da Europa tem aumentado rapidamente. Na Holanda e Bélgica, as *e-bikes* respondem por cerca de 30% de todas as vendas de bicicletas em 2016.

A *e-bike* tem a vantagem de auxiliar o condutor em trechos de subida e em grandes distâncias. Sua utilização complementa o uso de bicicletas convencionais, pois as políticas e infraestrutura para uso desses modelos são similares.

Os grandes centros urbanos possuem problemas crônicos de transporte públicos, sendo a principal forma de locomoção o uso de veículos automotivos. Entretanto, a bicicleta apresenta uma alternativa viável e crescente em todo o mundo.

O aumento no número de pesquisas científicas, grupos e comunidades especializadas, compartilhamento e utilização de *e-bikes* permite que a bicicleta ocupe uma importante posição na solução da mobilidade urbana no futuro, provavelmente protagonizando sua utilização nas cidades do mundo. O desenvolvimento de novas tecnologias de dados, o crescimento do tamanho das cidades e da população urbana ao redor do mundo são importantes variáveis no contexto de novas formas de mobilidade.

Um estudo das Nações Unidas (2018) mostra que atualmente ~55% da população mundial vive em cidades, e em 2050 esse número irá aumentar para +60% (como pode ser observado na Figura 12). Além disso, segundo Hannon *et al.* (2016), a densidade populacional irá aumentar em ~30% nos próximos 15 anos. Esta mudança de concentração de pessoas irá apresentar um grande desafio para o transporte nos próximos anos, principalmente para o modelo de mobilidade centrado no automóvel.

Um dos principais motivos do aumento do congestionamento e trânsito nas grandes cidades é o uso de automóveis, pois a relação entre espaço ocupado nas ruas por quantidade de pessoas transportadas em um automóvel é muito alta em relação a outros meios de transporte como bicicleta, ônibus ou metrô. Para contornar esse problema, alguns países estão promovendo o uso racional de veículos, uma vez que o investimento em novas estradas ou rodovias muitas vezes não acarretam em melhorias expressivas no trânsito.

Estudos realizados em cidades americanas, mostram que há uma relação entre a quantidade de rodovias (fornecimento) e de quilômetros percorridos por veículos (demanda). Investimentos em estradas acabam incentivando maiores percursos por condutores, mantendo o equilíbrio de fornecimento e demanda, portanto acaba não melhorando o trânsito de maneira definitiva (DURANTON, 2011).

Para contornar o problema de congestionamento provocado por automóveis, algumas cidades estão adotando medidas a curto prazo para limitar

o uso de veículos, como aplicação do rodízio, no qual cada dia da semana é proibido o uso de veículos baseado na numeração de cada placa de identificação, criando de zonas que restringem o uso de automóveis além da cobrança de pedágios urbanos levando há uma diminuição do uso de automóveis no futuro.

Observa-se também que as novas gerações, de acordo com uma pesquisa realizada pela Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos (NASEM, 2013), a geração de pessoas chamada de *millennial*, aqueles que nasceram entre 1980 e 2000, possuem cada vez menos interesse na utilização de veículos próprios automotivos.

No Brasil pode-se observar esta tendência de menor interesse nas novas gerações humanas em possuir um veículo automotivo próprio, a partir dos números de novas habilitações concedidas no país.

Segundo dados do DENATRAN (2018), o número de novos motoristas habilitados, entre 18 e 21 anos de idade, no país caiu ~20% de 2014 a 2017. O menor interesse das novas gerações em possuir um automóvel, pode ser observada em um aumento na utilização do transporte de pessoas via aplicativos de celular e outros modais.

Segundo Rode e Floare (2014), os aplicativos de transporte via celulares é utilizado por cerca de ~70% dos habitantes de Londres. Em Sidney é registrado mais de ~40 milhões de solicitações de informação sobre viagens por mês.

A proliferação dos celulares também tem mudado a mobilidade urbana, hoje é cada vez mais comum a utilização de aplicativos para verificar as condições de trânsito, para solicitar um serviço de táxi, para compartilhar uma bicicleta ou um patinete elétrico.

Neste contexto de utilização de tecnologia da informação, há grande oportunidade nos serviços de compartilhamento de transporte.

Hoje existe este tipo de serviço para bicicletas e patinetes e a tendência é que se replique para outras formas de transporte. No caso do automóvel o potencial deste serviço é grande, pois a utilização ainda é baixa, segundo Rode e Floare (2014).

Isso pode ser observado dado que uma pessoa que vai trabalhar durante oito horas por dia, deixa o veículo estacionado, e isso equivale a cerca de ~96%

do tempo total. Além disso, cerca de ~0,8% do tempo o motorista fica procurando uma vaga, 0,5~% do tempo no trânsito cotidiano e apenas ~2,6% do tempo realmente se locomovendo da residência ao local de atuação profissional.

O investimento para explorar novas maneiras de se locomover tem aumentado ano após ano e se mostra como uma tendência mundial. Segundo um estudo realizado pela consultoria McKinsey (LETZ *et al.*, 2019), foram investidos mais de ~220 bilhões de dólares em startups de mobilidade, desde 2010. São mais de ~1.100 empresas de diferentes segmentos de transporte, como veículos elétricos, empresas de tecnologias de compartilhamento, de trânsito inteligente, entre outros. Esses dados são relevantes, pois reforçam a transformação da mobilidade urbana no mundo.

### **2.3 Triciclo Tadpole como Alternativa de Transporte Urbano**

O menor interesse das novas gerações humanas na utilização de um automóvel particular como forma de transporte principal, associado a diversos fatores, como o aumento da densidade da população urbana, uso transporte compartilhado, e investimentos em novas formas de mobilidade, mostra que o modelo de mobilidade urbana centrado no automóvel deverá diminuir no futuro e isso é observado no mundo todo.

Nos grandes centros urbanos é cada vez mais popular a utilização de transporte complementares. Pequenos trajetos urbanos até estações de metrô, barcos ou trens podem ser realizados por bicicletas ou pequenos veículos elétricos (triciclos ou patinetes), que muitas vezes podem ser utilizados de maneira compartilhada.

O uso de veículos com propulsão humana possui grande vantagem sobre outros meios de transporte, tanto no custo de deslocamento, quanto no custo de poluição urbana. Além é claro da constante ajuda na saúde humana devido a prática de exercícios físicos rotineiros, de grande importância para as novas gerações.

Esses indicadores mostram uma clara tendência de mudança na mobilidade urbana, reforçando a necessidade de que os governos, empresas, usuários e acadêmicos atentem para esse fenômeno, buscando sempre

oportunidades para criar equipamentos e dispositivos mais eficientes e ecológicos para o transporte humano.

Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo apresentar o triciclo, na configuração tadpole movido a propulsão humana, como alternativa de transporte eficiente nos grandes centros urbanos, compartilhando as infraestruturas de transporte junto com bicicletas e automóveis.

### 2.3.1 Conforto do Motorista

Uma das principais vantagens na utilização de triciclos reclináveis é o conforto do motorista, pois diferente do que ocorre na bicicleta tradicional, o condutor fica em uma posição sentada, em que a sua coluna fica apoiada no encosto do assento (Figura 16).

O triciclo é um veículo estável e que possui equilíbrio natural, ou seja, não é necessário que o condutor apoie a perna no solo para manter o equilíbrio, como ocorre na bicicleta. Portanto, isso permite que o ciclista mantenha a sua posição, sentado com a coluna integralmente apoiada no encosto, durante todo o percurso, independente se esteja em repouso ou em movimento.

A propulsão é realizada através dos pedais, que ficam na parte de frente, seu acionamento é realizado pelas pernas do condutor, em uma posição ergonomicamente confortável. O controle da direção, normalmente, é realizado através de dois guidões posicionados lateralmente, próximo as rodas dianteiras, fazendo com que os esforços nos braços e mãos sejam minimizados.



Figura 16 – Ciclista em um triciclo tadpole.  
Fonte: GRAHAM (2016).

### 2.3.2 Velocidade no Percurso

Em uma pesquisa realizada com ciclistas no Brasil, conforme pode ser visto na Figura 17, foi identificado que a maior parte dos usuários de bicicletas o fazem para percursos para as tarefas diárias. Portanto, é necessário que esses veículos sejam confiáveis e velozes para atender os compromissos dos usuários.

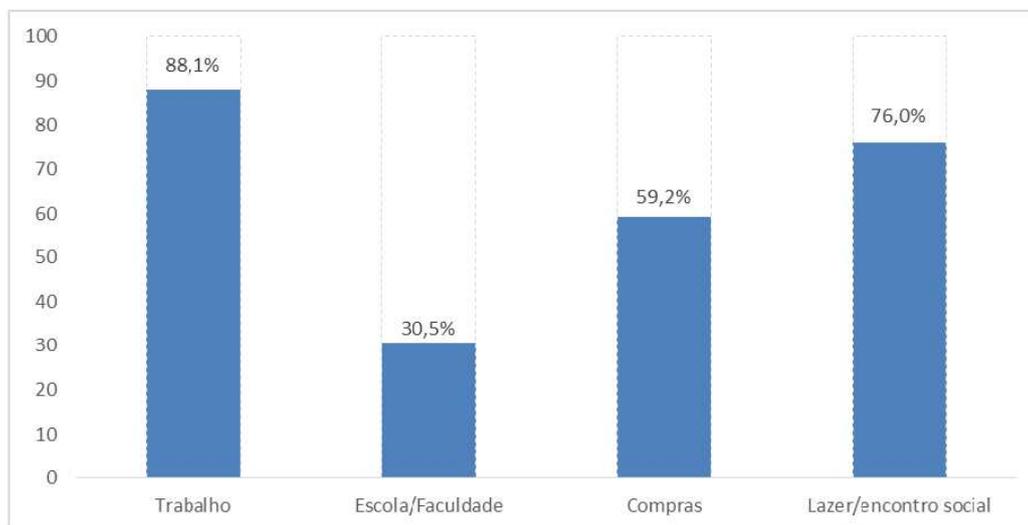


Figura 17 – Para quais destinos utiliza a bicicleta como meio de transporte.

Fonte: Pesquisa Perfil do Ciclista Brasileiro (2015).

Neste contexto, uma importante vantagem do triciclo *tadpole* são as velocidades obtidas em comparação com outros veículos de propulsão humana.

O triciclo na posição reclinada propicia uma redução significativa na resistência do ar durante o movimento, sendo que este fator representa uma importante redução de tempo. Além disso, o fato da posição do condutor ser confortável e os esforços de pernas e braços serem minimizados na condução permite velocidade maior durante mais tempo.

### 2.3.3 Praticidade Operacional da Bicicleta

No transporte urbano é fundamental que os modais utilizados sejam práticos e confiáveis. No caso dos triciclos, eles são menores e mais leves que veículos movidos a combustíveis fósseis, permitindo que a locomoção e o estacionamento sejam mais fáceis. Além disso, eles não necessitam serem abastecidos com combustíveis, sua manutenção é mais simples e de baixo custo, o que torna seu uso muito prático.

Os esforços físicos envolvidos na condução são pequenos e a posição do condutor é ergonomicamente favorável, o que torna possível seu uso para condutores com alguma restrição física.

A praticidade é uma importante vantagem, conforme pode ser visto na Figura 18. Para 44,6% dos usuários está é a principal razão para utilização da bicicleta como meio de transporte.

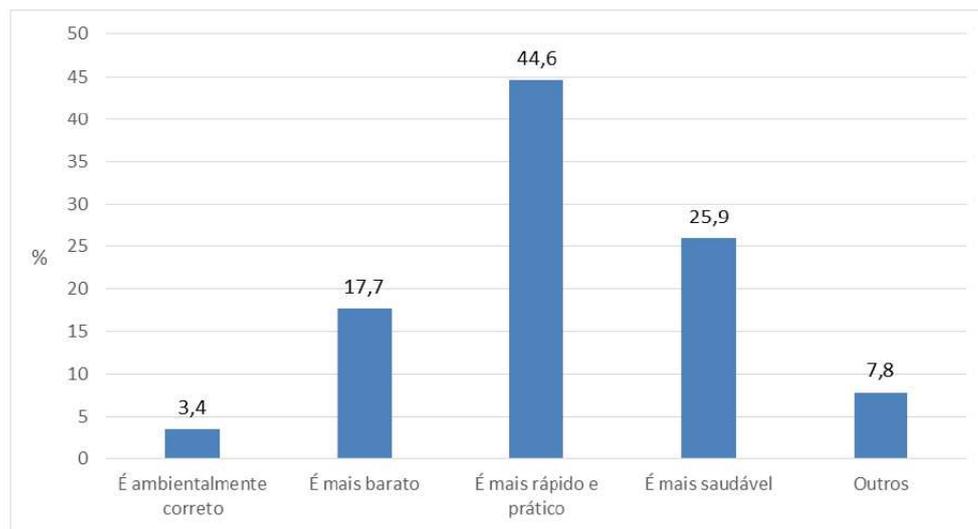


Figura 18 – Principal razão para continuar utilizando a bicicleta como meio de transporte.

Fonte: Pesquisa Perfil do Ciclista Brasileiro (2015).

#### 2.3.4 Alternativa Sustentável de Transporte

Veículos movidos a propulsão humana, como os triciclos e bicicletas, são ambientalmente e economicamente sustentáveis, o que permite que seu uso seja ainda mais popular ao longo do tempo. O custo de produção e aquisição desses veículos são baixos em comparação a outros meios de transporte motorizados, o que possibilita que pessoas com diferentes poderes aquisitivos utilizem esses veículos. Isso pode ser observado em países como Índia e China, no qual o uso de bicicletas é muito popular.

Do ponto de vista ambiental, tem-se observado cada vez mais incentivos dos governos e mesmo da iniciativa privada para aumentar a parcela dos meios de transportes que não emitem gases poluentes. Além disso, os combustíveis fósseis são recursos finitos e os veículos que utilizam este combustível deverão em breve ser substituídos por outros, e o triciclo é uma destas opções.

### 2.3.5 Tendência de Utilização como Veículo Urbano

Hoje há uma forte tendência no incremento do uso de bicicleta no mundo, impulsionado por suas recentes inovações tecnológicas, como compartilhamento de bicicletas tradicionais e bicicletas elétricas. Também é possível observar um aumento na quantidade de pesquisas científicas sendo realizadas nessa área e a comunidade de ciclistas interessada nas pesquisas.

O uso de bicicleta é mais popular entre os jovens, conforme pode ser visto na Figura 19. Novas gerações estão mais receptivas a este meio de transporte do que o modelo tradicional de transporte urbano, representado principalmente pelo automóvel. Esta faixa da população é mais sensível a inovação e novos produtos. Nesse contexto, o triciclo reclinável se apresenta como uma alternativa interesse.

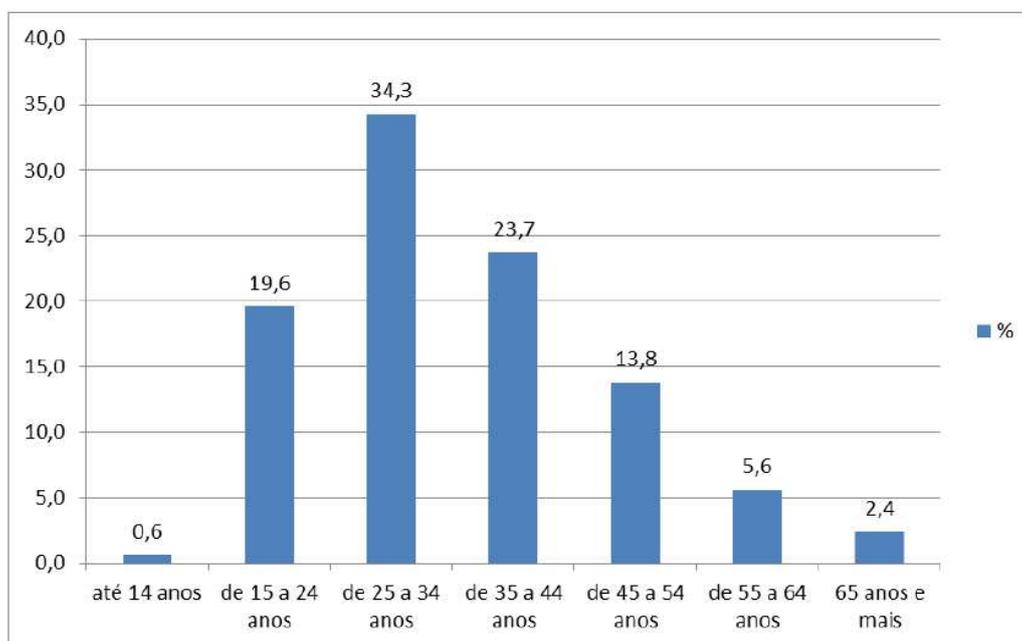


Figura 19 – Faixa etária de ciclistas brasileiro.  
Fonte: Pesquisa Perfil do Ciclista Brasileiro (2015).

### **2.3.6 Segurança no Trânsito e Oportunidade no Mercado Nacional**

Uma preocupação recorrente dos ciclistas é a melhoria na segurança em uso, quer seja no próprio veículo, quer seja na infraestrutura (ruas e ciclovias). Assim como a convivência dos ciclistas com os motoristas de automóveis.

O triciclo tem a vantagem de ser mais seguro do ponto de vista de condução quando comparado a uma bicicleta, por possuir um centro de gravidade próximo ao chão e equilíbrio estável inerente e sua forma física, dificultando quedas ou tombamentos. Quando comparado a um automóvel apenas a velocidade de trajeto, por ser muito menor que um automóvel permite dizer que é seguro, mas está muito longe de conter itens de segurança que existem em um automóvel.

Além disso, o triciclo por ser um veículo maior que a bicicleta, sua visualização por parte de outros condutores se torna melhor, propiciando uma condução mais segura na convivência com outros tipos de veículos.

Esta pesquisa científica foi desenvolvida um projeto que prevê a utilização de uma carenagem para proteção de intempéries (sol, vento e chuva).

Há espaço no mercado brasileiro para desenvolver e fabricar um modelo de triciclo que tenha uma forma construtiva simples. Possuir peças intercambiáveis com bicicletas utilizadas no mercado brasileiro reduz o custo de fabricação.

Nesse contexto, esta pesquisa de mestrado dá início a um ousado projeto de veículo do tipo triciclo com propulsão humana para uso em trânsito orgânico urbano no Brasil.

### **3 Desenvolvimento da Estrutura do Sistema de Controle Direcional de um Veículo Triciclo Tipo Velomobile TadPole**

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento do projeto mecânico do controle direcional de um triciclo tadpole.

O controle direcional possui grande importância na eficiência e dirigibilidade de um veículo. Sua principal função é direcionar as rodas dianteiras, em resposta às entradas de comando do motorista, permitindo o controle direcional.

Segundo Peetz (2018), um sistema direcional de um veículo é um conjunto de sistemas mecânicos responsáveis por mudar a trajetória e o sentido de direção durante sua locomoção.

O eixo dianteiro de um veículo tem suas extremidades articuladas e fixadas as rodas por sistemas intermediários, assim as rodas giram quando o sistema for acionado pelo condutor.

A direção de um triciclo tadpole é realizado através do giro das duas rodas dianteiras, similar ao de um automóvel. Portanto, as relações geométricas entre os ângulos de movimento do volante ou guidão e os ângulos das rodas dianteiras devem ser calculadas de modo que o triciclo não derrape ou perca o controle direcional ao fazer uma curva. Uma geometria mal calculada pode acarretar em desgastes excessivos de pneus e baixa eficiência na força exercida pelo condutor.

Segundo Horwitz (2010), um triciclo reclinado é tão eficiente quanto seu controle direcional. Seu comportamento é similar ao de um automóvel, sendo que o sistema de direção é complexo, possuindo mais de uma opção de geometria para defini-lo.

#### **3.1 Controle da direção com Sistema Cremalheira e Pinhão**

O princípio de controle direcional proposto nessa pesquisa científica é na forma de um sistema de cremalheira e pinhão, pois todo o seu funcionamento é mecânico. No caso de triciclos ou bicicletas são mais adequados que controles elétricos e hidráulicos, por conta favorecer a diminuição de massa do veículo a propulsão humana.

Além disso, o conjunto pinhão e cremalheira permite, através das relações geométricas, definir uma relação adequada entre o giro do volante e o giro das rodas.

O princípio básico de deste conjunto é a transformação do movimento de rotação do pinhão em movimento linear da cremalheira. A Figura 20 apresenta um desenho esquemático deste conjunto.

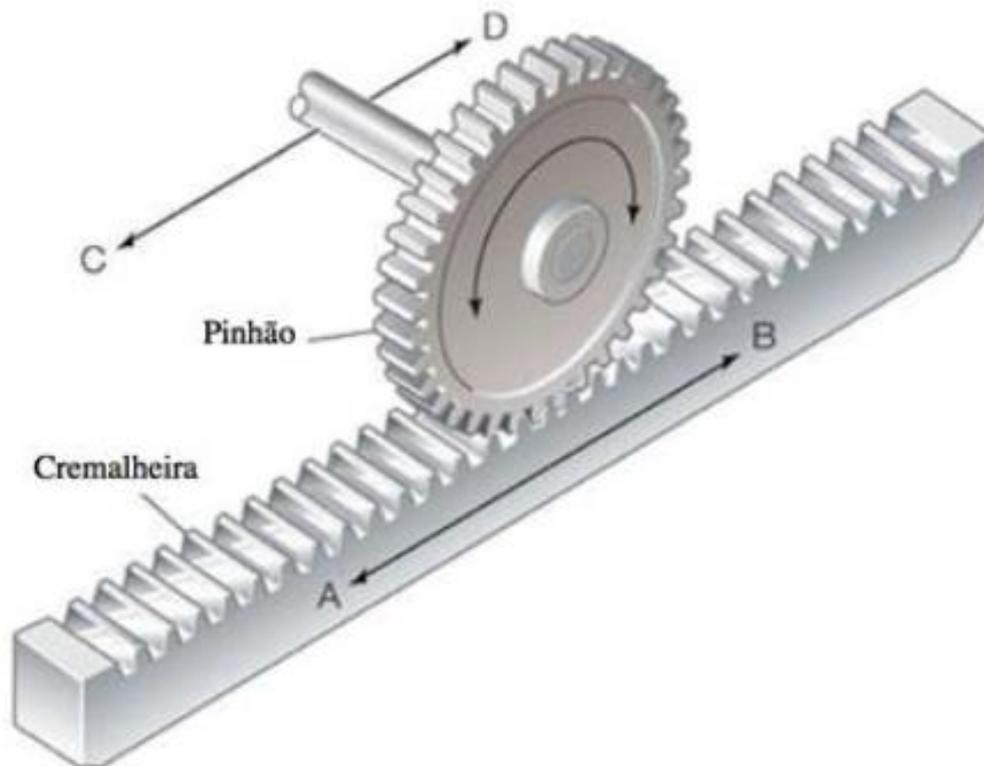


Figura 20 – Pinhão e cremalheira  
Fonte: Resende *et al.*(2016).

Aplicando essa montagem em um sistema de controle direcional, pode-se criar uma relação entre o giro do volante e o giro das rodas, conforme pode ser observado na Figura 21 que ilustra este tipo sistema de controle direcional.

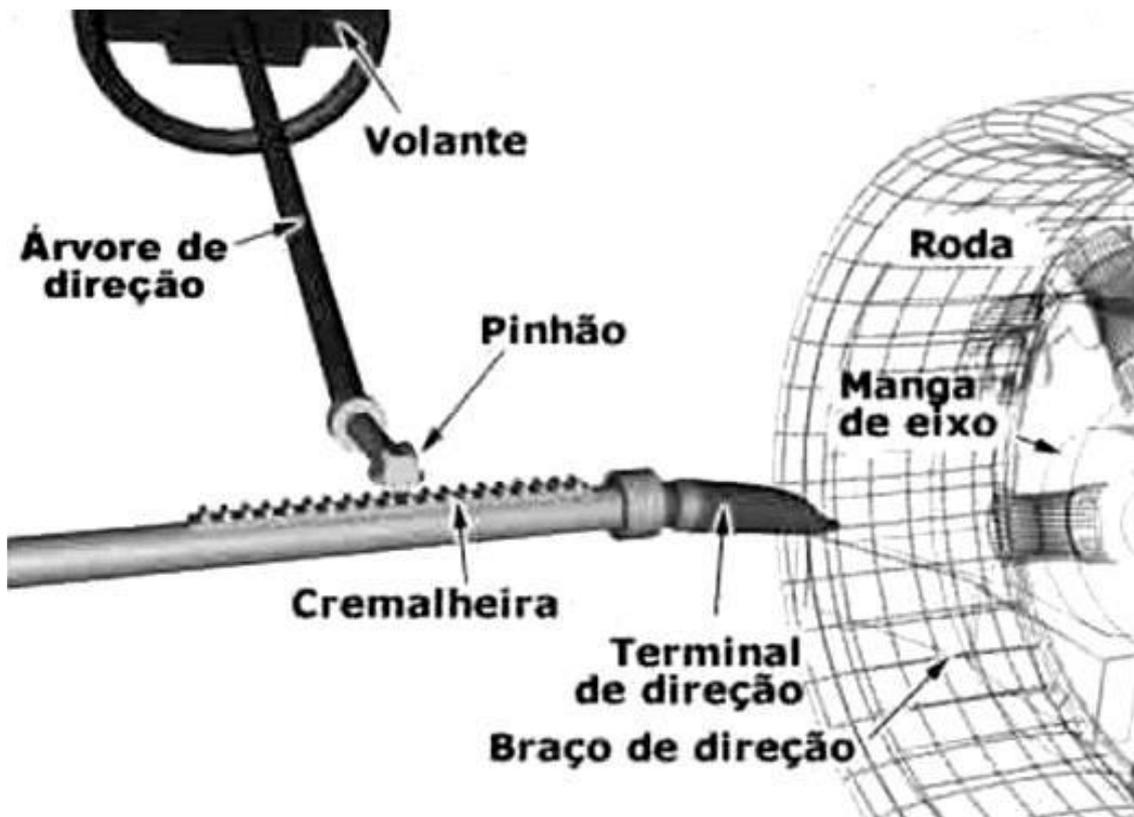


Figura 21 – Caixa de direção com pinhão e cremalheira.

Fonte: PEETZ (2018).

A cremalheira é a parte central da caixa de direção, tendo em cada uma das extremidades barras laterais biarticuladas (barras de direção) que promovem sua união às mangas de eixo.

O acionamento do volante gira o pinhão que obriga a cremalheira a deslocar-se, comandando as barras de direção, assim o movimento linear da cremalheira é transformado em movimentos angulares das rodas (ROSA, 2010).

Para o projeto proposto nessa pesquisa, o mecanismo de transmissão do giro do volante é similar ao utilizado em veículos, porém com uma mudança no ângulo da árvore de direção. No caso de veículos automotivos, a distância entre o volante e o eixo das rodas dianteiras permite que a árvore de direção (componente que transmite o giro do pinhão) seja inclinada em relação à cremalheira. O triciclo, o eixo das rodas dianteiras estão mais próximas do volante, pois sua posição é determinada pela posição dos pedais. Com isso, o projeto proposto tem o eixo de giro do volante praticamente paralelo ao eixo do pinhão. Para conectar os dois eixos e transmitir o giro (função similar ao da

árvore de direção de um veículo) foi desenvolvido uma haste tubular paralela ao suporte vertical da direção, conforme demonstrada na Figura 22.

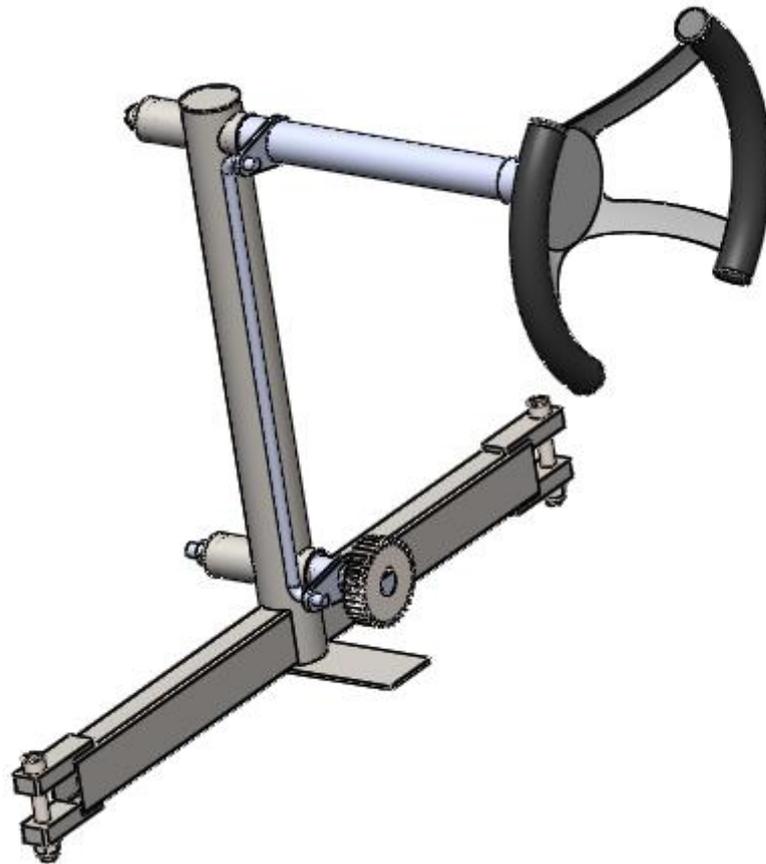


Figura 22 – Haste de transmissão de giro entre os eixos.

Fonte: Próprio Autor (2022).

Esses três componentes (eixo do pinhão, eixo do volante e a haste que conecta os dois eixos) são os principais elementos dinâmicos desse controle direcional. Os eixos citados estão fixados no chassi do triciclo através de rolamentos, que permitem o giro em apenas uma direção.

Pode-se observar que quando o volante é rotacionado, a haste de transmissão se movimenta no sentido vertical, fazendo com que o pinhão gire no mesmo sentido do volante, conforme demonstrado na Figura 23.

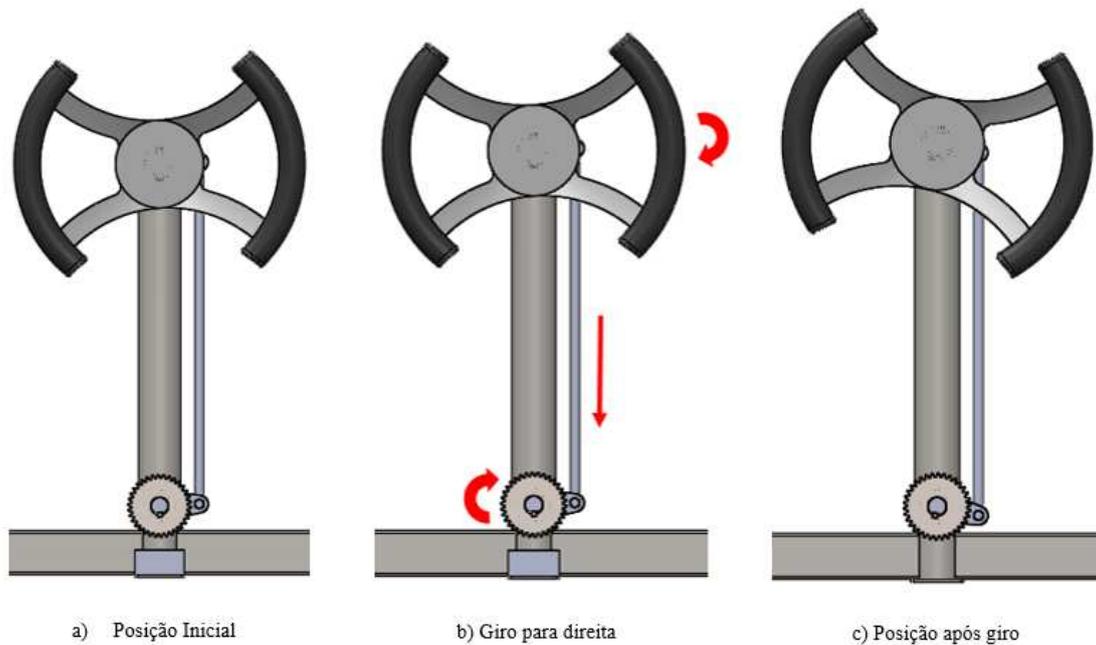


Figura 23 - Simulação do giro do volante e do pinhão

Fonte: Próprio Autor (2022).

Importante ressaltar que os ângulos de giro dos dois eixos são iguais, devido à haste. Porém, o giro das rodas apresenta um ângulo de giro diferente aos dos dois eixos, pois o engranzamento do pinhão e da cremalheira permite que o giro do pinhão transmita um movimento linear à cremalheira, que por sua vez aciona o giro da roda, através de duas hastes chatas. A Figura 24 mostra o conjunto pinhão/cremalheira e a fixação das hastes na cremalheira.

Pode-se observar na Figura 24 um rasgo horizontal na base da cremalheira, sua função é fixar a cremalheira ao chassi do triciclo, dando apenas um grau de liberdade de movimento (translação horizontal).

Este chassi do triciclo é um elemento com capacidade de suportar as forças desses movimentos, pesos dos veículos e condutor, conforme demonstrado na simulação de forças no capítulo 4.1 desta pesquisa.

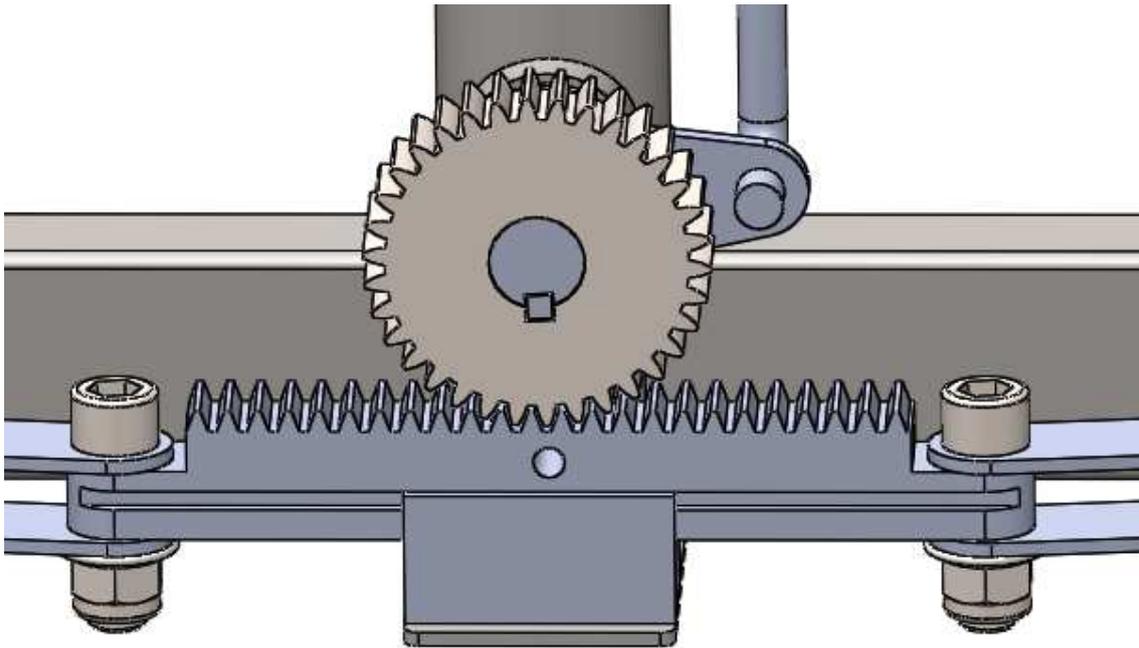


Figura 24 – Detalhe do engranzamento do pinhão e cremalheira.

Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 25 demonstra os componentes dinâmicos (eixo pinhão, pinhão, cremalheira, hastes chatas, eixo de giro das rodas) e os estáticos (chassi) da parte inferior do controle direcional, através de uma simulação de movimento de giro. Também é possível observar o giro das rodas, que seria o movimento final deste conjunto dinâmico. Portanto, pode-se concluir que os elementos mecânicos pinhão e cremalheira são fundamentais neste sistema proposto, pois o pinhão representa o giro do volante e o movimento linear da cremalheira representa o acionamento do giro das rodas.

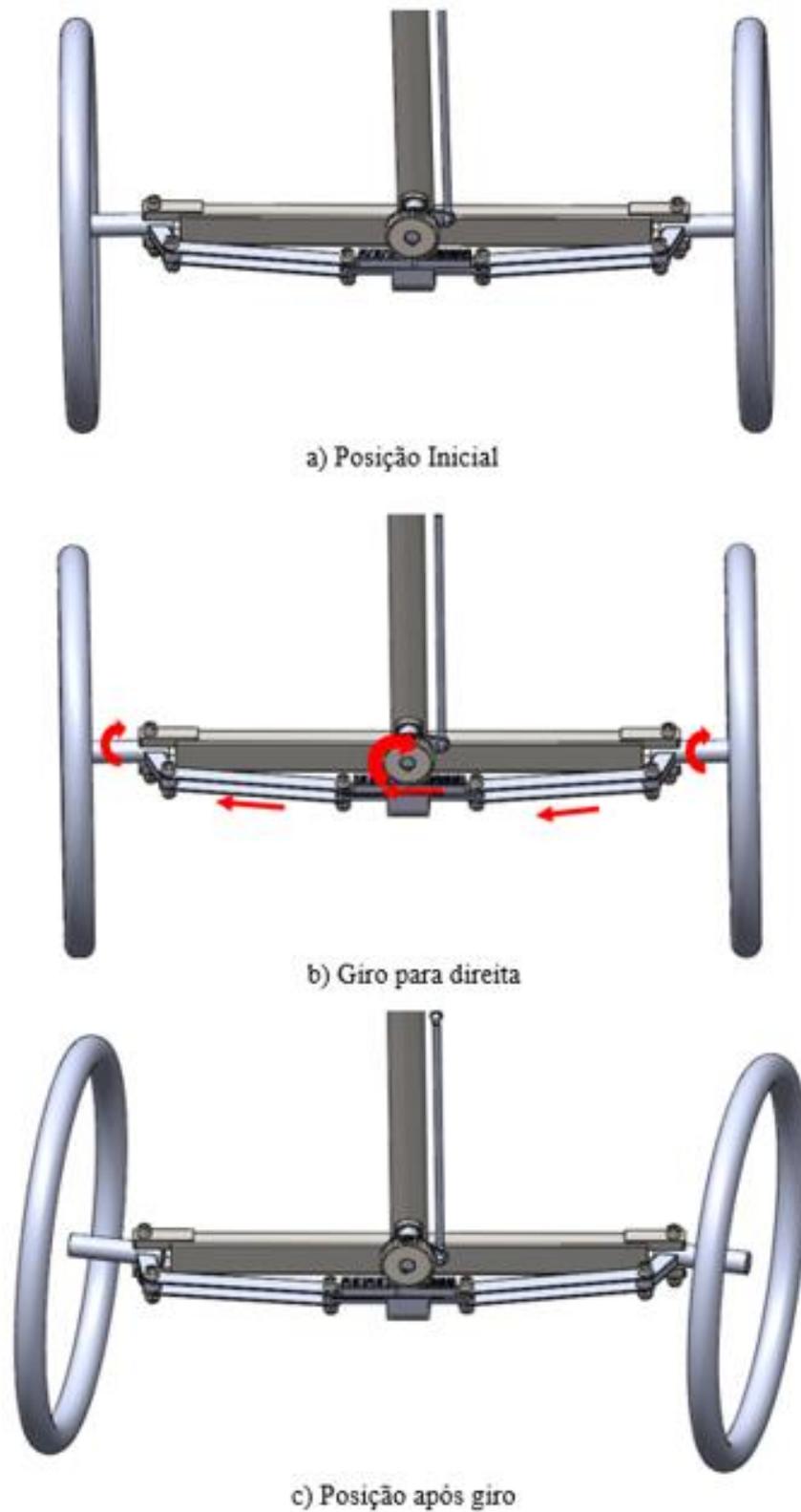


Figura 25- Simulação do giro do pinhão, avanço da cremalheira e giro da roda.  
Fonte: Próprio Autor (2022).

### 3.2 Projeto do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Tadpole

O triciclo do tipo tadpole proposto nessa pesquisa possui a característica de ser dirigido através de um volante, similar ao de um automóvel. O objetivo é que o condutor tenha uma posição ergonômica confortável, portanto o condutor ficará na posição reclinada, realizando a condução direcional com os braços levemente estendidos.

Nessa configuração, o condutor possui um espaço livre para movimentar a perna e os pedais, sendo que a distância até o volante ou até os pedais, podem ser ajustados através da posição do banco do condutor. A Figura 26 demonstra a posição dos pedais, a posição do condutor e a sua linha de visão. A inclinação do banco pode ser ajustada, garantindo que a visão do condutor esteja alinhada com a altura de cada pessoa.

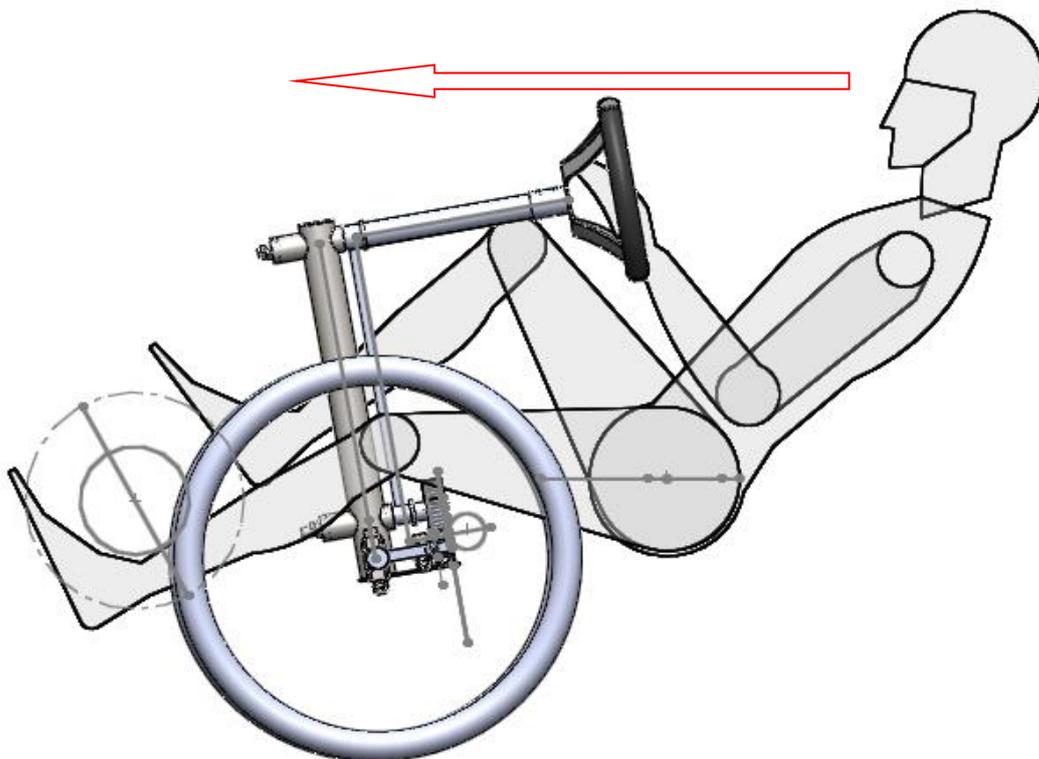


Figura 26 – Posição do condutor e campo de visão.  
Fonte: Próprio Autor (2022).

Importante ressaltar que o elemento vertical do chassi foi dimensionado para que a altura do volante não gere uma interferência no giro das pernas, no acionamento dos pedais. Também não interferência entre a perna do condutor e

o elemento vertical do chassi e a haste que conecta os eixos do volante e pinhão, pois esses itens ficam entre as pernas do condutor.

A Figura 27 mostra o conjunto montado do controle direcional em perspectiva isométrica, sem a presença do condutor. Pode-se observar todos os elementos dinâmicos citados no capítulo anterior (3.1), que são responsáveis pelo controle do giro das rodas a partir do volante. Também é possível identificar a posição dos elementos de fixação desses itens dinâmicos com o chassi (estático), que são os parafusos do eixo da roda, das hastes chatas, a base da cremalheira com o rasgo horizontal, os eixos do volante e pinhão fixados por rolamentos no chassi.

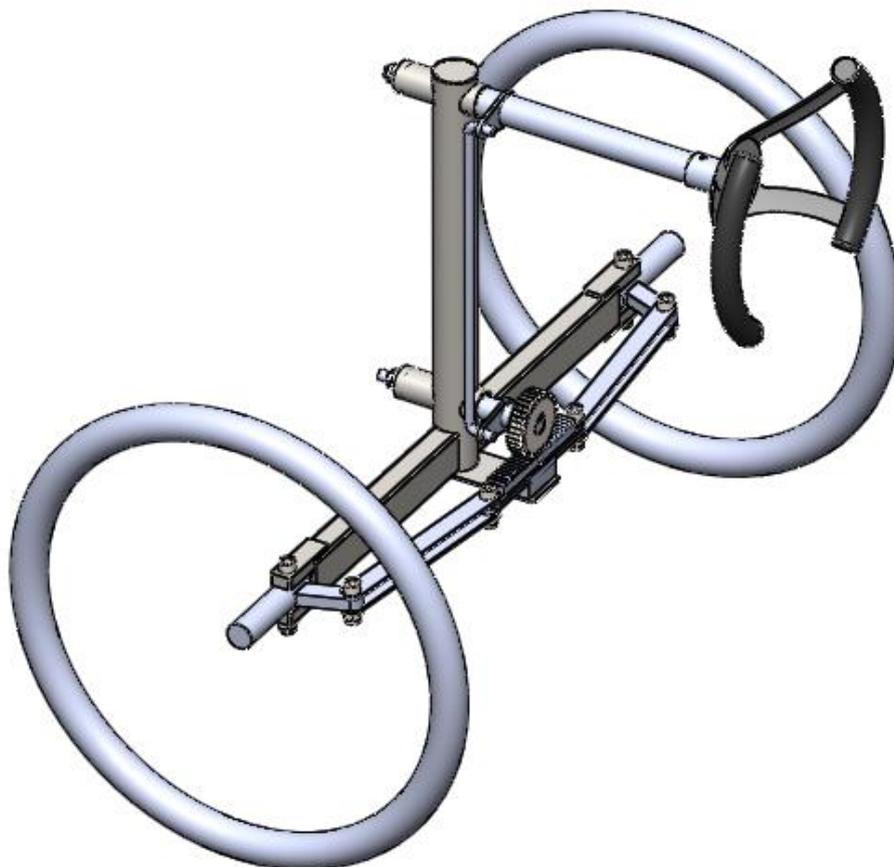


Figura 27– Conjunto cremalheira e pinhão  
Fonte: Próprio Autor (2022)

O engranzamento entre o pinhão e a cremalheira é uma ligação sensível, a folga entre os elementos é pequena para otimizar o movimento e evitar desgaste. Portanto, presença de sujeira, poeira e outras partículas pode

apresentar um desgaste prematuro destes componentes, além de tornar a direção menos eficiente, sendo necessário mais esforço para realizar uma curva, por exemplo. Para evitar essa interferência, foi proposta uma proteção no pinhão-cremalheira, conforme demonstrado na Figura 28. Além de proteger contra sujeiras, também elimina o risco do contato do condutor nessas partes móveis, evitando eventuais acidentes.

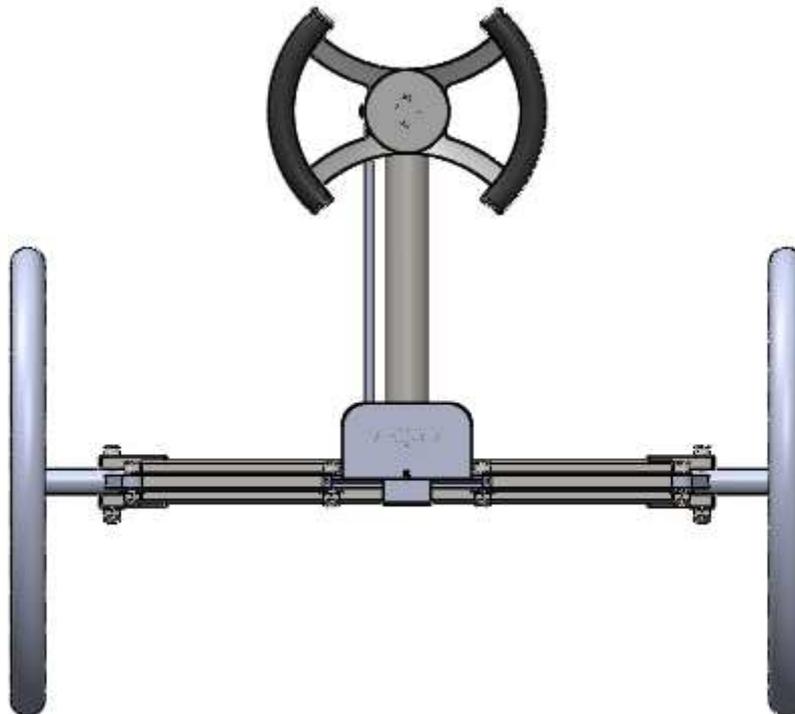


Figura 28– Vista do condutor, com detalhe para caixa de proteção.

Fonte: Próprio Autor (2022).

Outro requisito importante para o projeto do controle direcional é a facilidade na montagem e manutenção, portanto para conectar os diferentes elementos do conjunto são utilizados parafusos e porcas. Além disso, as quatro hastes horizontais que conectam a cremalheira ao eixo da roda são iguais e intercambiáveis, fazendo com que a quantidade de peças de reposição seja otimizada. Na figura 29 pode-se observar essas características da montagem, através da vista explodida.

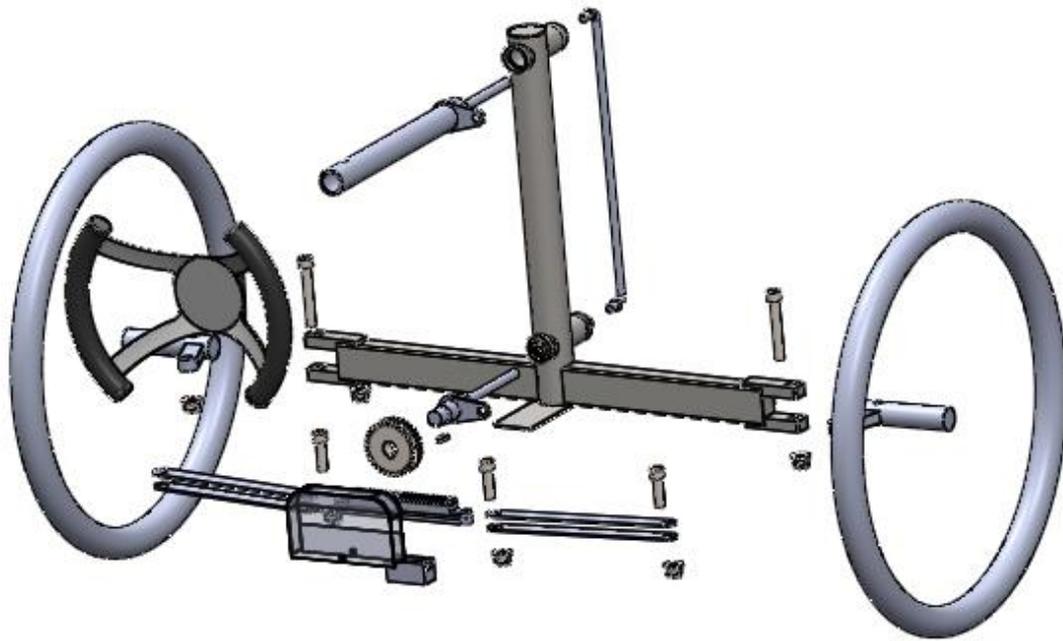


Figura 29– Vista explodida do sistema direcional do triciclo.  
Fonte: Próprio Autor (2022).

### 3.2.1 Requisitos do Projeto do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Velomobile Tadpole

Um dos principais requisitos do projeto do controle direcional é a sua adequação ao transporte urbano das cidades. Portanto, as dimensões e as dinâmicas de movimento foram projetadas de acordo com o meio em que será utilizado.

No caso da dimensão do controle direcional, é necessário considerar que a distância entre as rodas dianteiras não devem ser maiores que a largura das ciclofaixas.

Segundo o Ministério das Cidades (2016), as ciclovias e ciclofaixas unidirecionais devem ter largura mínima de 1,20 m (Figura 30). As ciclovias e ciclofaixas bidirecionais devem ter largura mínima de 2,50 m (Figura 31). Essas medidas consideram exclusivamente a largura para a movimentação de ciclistas, não considerando a segregação física (tachões e/ou pintura) nem a sarjeta da via. Esses dados consideram que uma bicicleta em movimento requer uma largura média de 1 metro. No entanto é importante que a infraestrutura dedicada leve em consideração uma folga de 10 cm de cada lado.

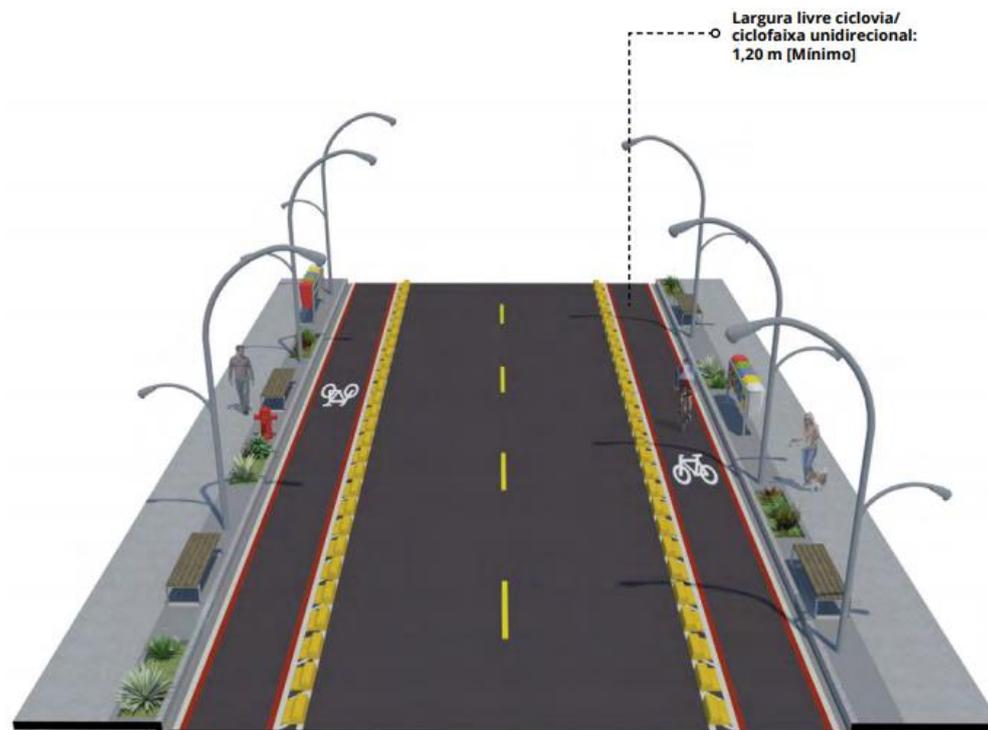


Figura 30 – Largura de ciclofaixa unidirecional.  
Fonte: Ministério das Cidades (2016).

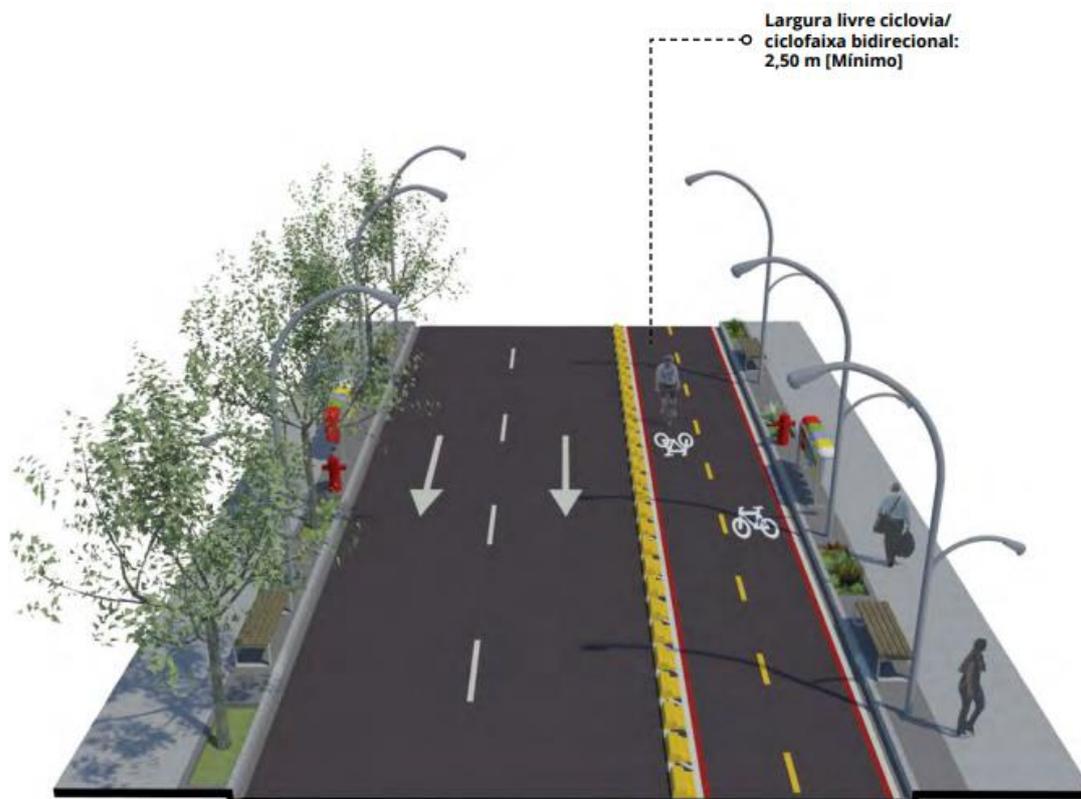


Figura 31 - Largura de ciclofaixa bidirecional.  
Fonte: Ministério das Cidades (2016).

Considerando essa premissa informada no parágrafo anterior, o triciclo foi projetado com distância entre rodas de 940 mm (Figura 32), ligeiramente inferior à largura média requerida para o movimento de uma bicicleta regular.

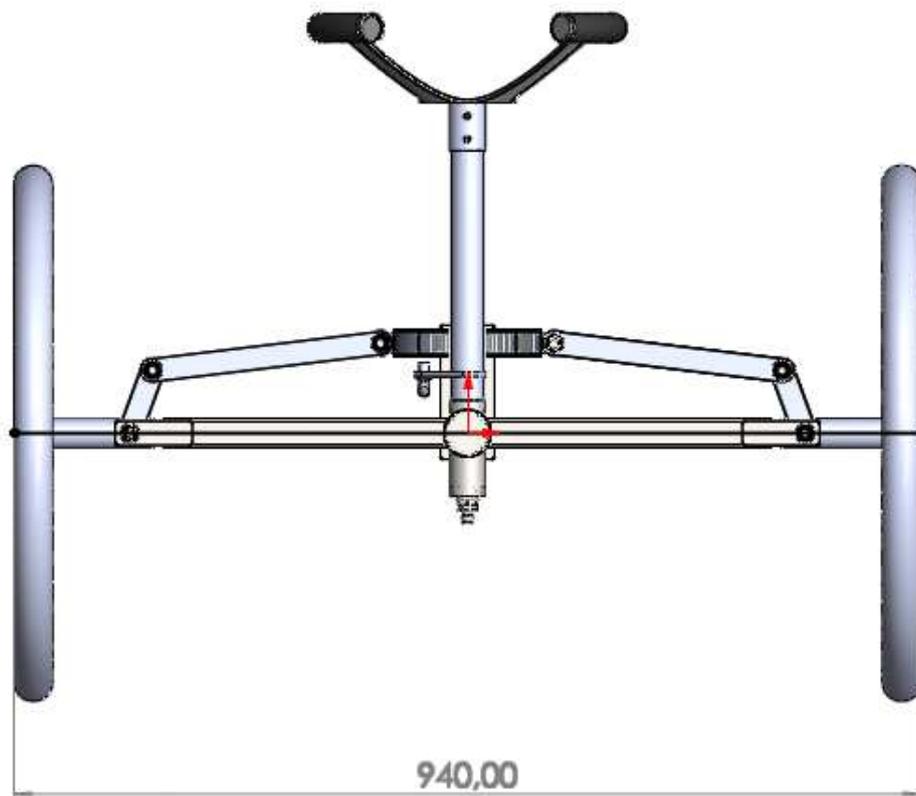


Figura 32 – Distância entre rodas.

Fonte: Próprio Autor (2022).

No caso de uma curva acentuada, a distância entre os pontos extremos da roda pode chegar a 1.080 mm (Figura 33), ligeiramente superior à largura média do movimento de uma bicicleta (1.000 mm), porém inferior à largura de uma ciclofaixa (1.200 mm).

Além das dimensões do controle direcional, outro importante requisito para o projeto é a facilidade e eficiência da execução de curvas e mudanças de direções executadas através do volante.

O controle direcional de um triciclo tadpole é realizado através do giro das duas rodas dianteiras, similar ao de um automóvel. Portanto, as relações geométricas entre os ângulos de movimento do volante e os ângulos das rodas dianteiras devem ser calculadas de modo que o triciclo não derrape ou perca o controle da direção ao fazer uma curva. Uma geometria mal calculada pode

acarretar em desgastes excessivos de pneus e baixa eficiência na força exercida pelo condutor.

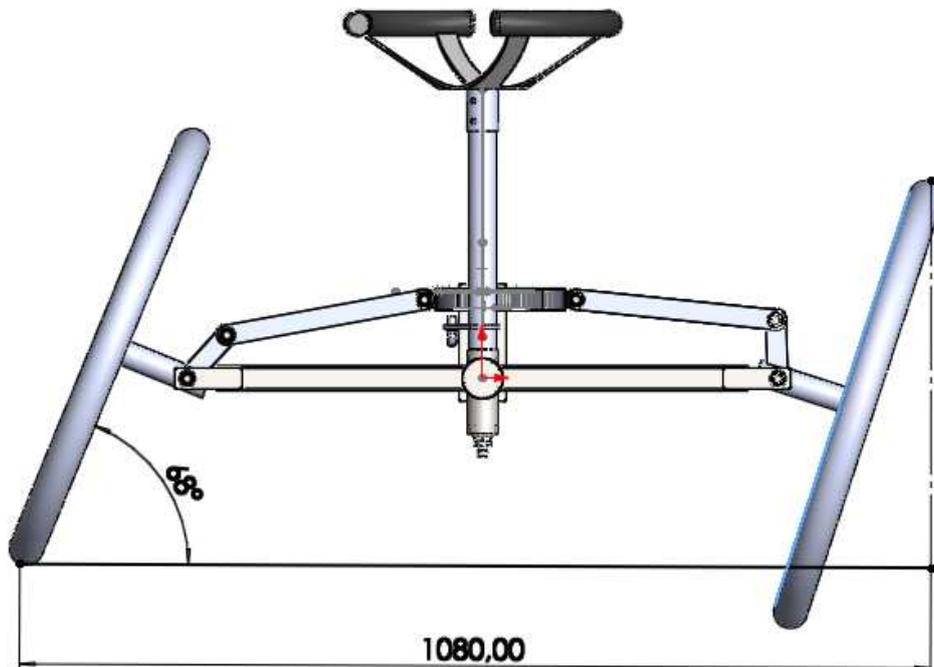


Figura 33 – Distância entre rodas durante uma curva fechada.

Fonte: Próprio Autor (2022).

Essa relação geométrica é necessária, pois ao realizar uma curva as rodas descrevem uma trajetória tangente à trajetória que realizam, conseqüentemente perpendicular ao raio da curva. Caso se mantivessem paralelas entre si, girando no mesmo ângulo, o veículo iria derrapar, pois cada roda estaria descrevendo uma trajetória de giro diferente da outra (GREBOT, 2010).

Na Figura 34 pode ser visto a condição em que os giros das rodas são iguais, pode-se observar que a trajetória descrita por cada uma das rodas se interceptam durante a curva, isto provavelmente iria acarretar em um desgaste excessivo do pneu ou em uma derrapagem do veículo.

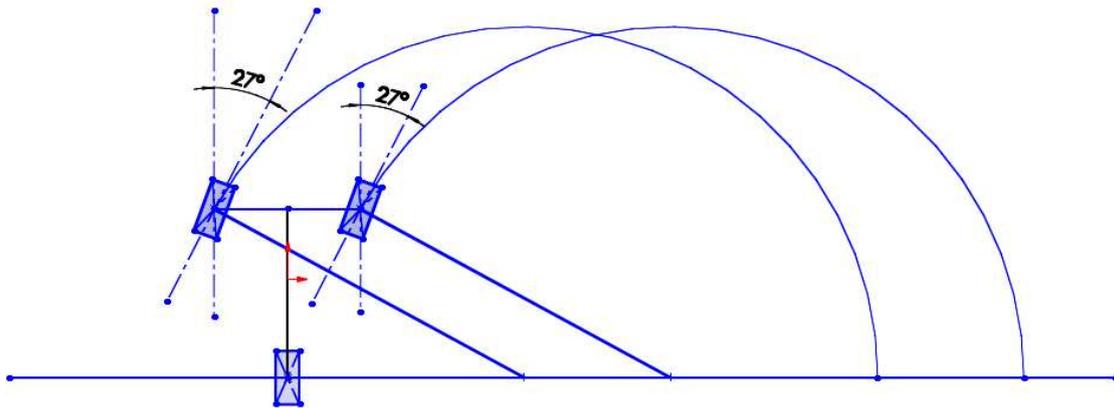


Figura 34 - Curva realizada com as rodas em paralelo.

Fonte: Próprio Autor (2022).

Na Figura 35 observa-se a condição em que as trajetórias dos dois pneus dianteiros se mantem em paralelo durante toda a curva. Para que isto ocorra a angulação dos pneus em relação ao controle direcional é diferente para cada um deles.

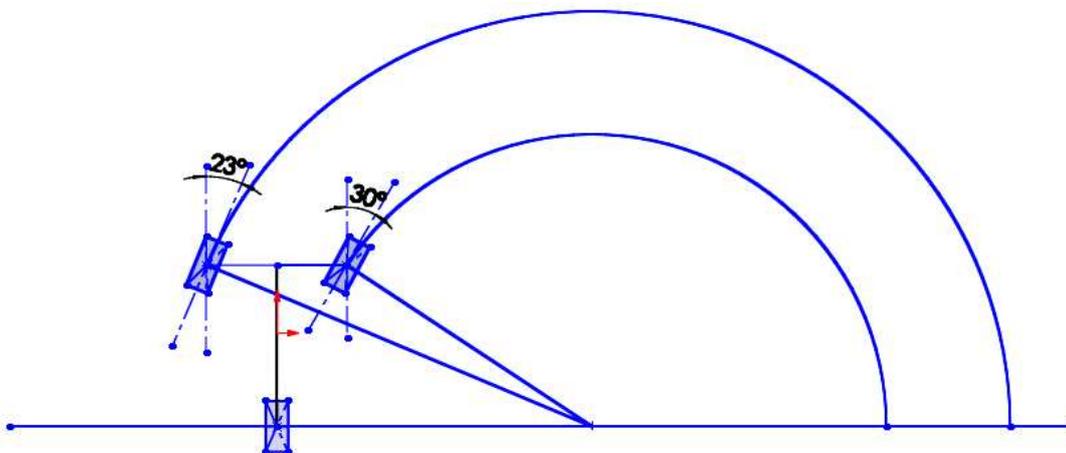


Figura 35 -Curva realizada com circunferências concêntricas, formadas pela trajetória das rodas.

Fonte: Próprio Autor (2022).

Para garantir que as duas rodas percorram uma circunferência com o mesmo raio de curvatura, elas devem girar em ângulos diferentes. Sendo que o ângulo da roda interna é maior que o ângulo da roda externa.

### 3.3 Simulação dos Esforços Físicos do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Velomobile Tadpole

Para simular a trajetória de uma curva realizado pelo controle direcional, e suas relações angulares, assim como as forças envolvidas na estrutura de direção foi utilizado o software SolidWorks.

Conforme citado no capítulo anterior, para que um veículo com duas rodas dianteiras realize uma curva mantendo a direção das rodas paralelas entre si, é necessário que haja uma relação angular entre elas. Além disso, há a relação do giro do volante e o giro da roda, que pode ser modificado a partir da mudança dos elementos da direção, como o passe da cremalheira e pinhão.

Portanto, considerando essas variáveis, foi realizado uma simulação do giro do volante e seu efeito no giro das duas rodas para validar a pesquisa realizada desse controle direcional. Para isso, foi aplicado um torque no volante no sentido anti-horário, simulando a ação do motorista para realizar uma curva para a esquerda. Pode-se observar na Figura 36 o torque aplicado no volante e as posições de giro do volante e rodas.

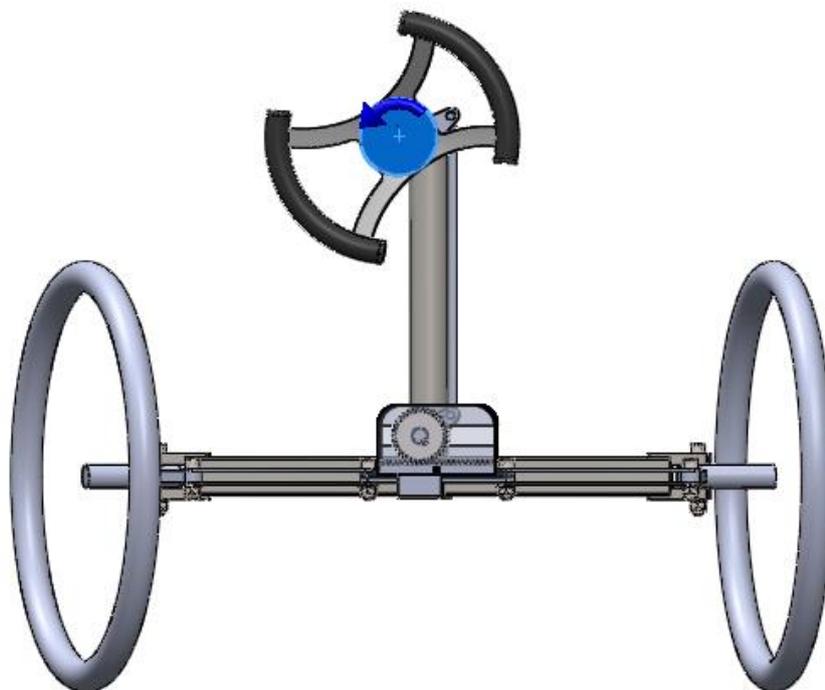


Figura 36 - Simulação do giro do controle direcional  
Fonte: Próprio Autor (2022).

Além da simulação dos deslocamentos angulares dos elementos do controle direcional, também foi realizado um estudo das forças envolvidas na estrutura principal da direção para avaliar os efeitos de tensão e deformação da estrutura.

As forças que possuem maiores magnitudes e conseqüentemente as que são mais sensíveis na análise das tensões na estrutura, são as forças no sentido vertical. Isto ocorre, pois, o efeito de todo o peso do motorista, além do resto da estrutura do triciclo é distribuído nas três rodas do veículo, que por sua vez realizam uma força de reação na direção vertical, sentido de baixo para cima, na estrutura, conforme demonstrado na Figura 37. Pode-se observar nesta Figura que as forças de reação do peso de todo conjunto em roxo, simulando a reação das duas rodas dianteiras, e em verde seria a simulação da região da aplicação da força peso da estrutura e motorista, que é a região onde o controle direcional se conecta ao restante da estrutura do veículo, incluindo o assento do veículo.

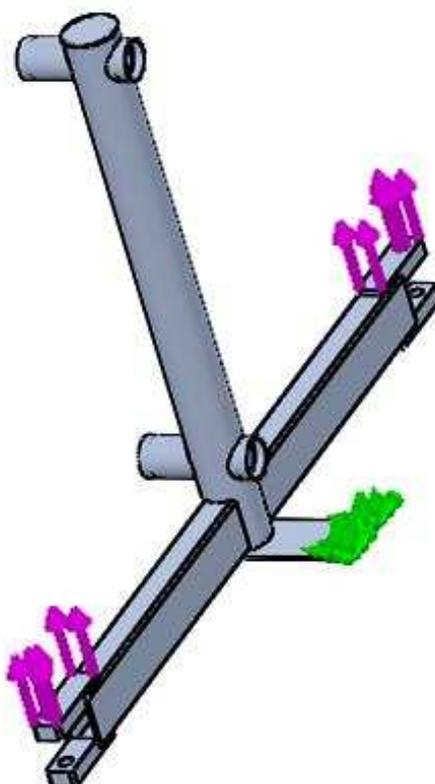


Figura 37 - Simulação das principais forças aplicadas na estrutura.

Fonte: Próprio Autor (2022).

### **3.3.1 Características e Parâmetros Utilizados na Simulação do Triciclo do Tipo Velomobile Tadpole**

A definição do material da estrutura é fundamental para o estudo da resistência às tensões e deformações envolvidas na direção, além da facilidade e custo da montagem e fabricação do veículo.

A liga de alumínio 6061 é o material mais utilizado na fabricação das estruturas de bicicletas. Isto ocorre devido à boa usinabilidade, baixa densidade e baixo custo desta liga de alumínio (RONTESCU, 2015),.

Além disso, a liga de alumínio 6061 apresenta boa soldabilidade, resistência à corrosão e boa resistência mecânica ao ser comparada ao alumínio puro (MARQUES, 2003).

Considerando as características dessa liga, esta pesquisa considerou no projeto mecânico e nas simulações a utilização da liga de alumínio 6061 como material da estrutura do controle direcional.

Para o estudo dos deslocamentos angulares do volante e das rodas, foi realizado uma análise dos torques aplicados em volantes de diferentes veículos. O torque máximo aplicado por um piloto de alta performance é de 25N.m (BENETTI, 2014), o que pode ser considerado como um limite máximo desse modelo. Forkenbrock (2005) realizou um estudo com diferentes tipos de veículos comerciais e constatou que o torque aplicado por um motorista varia de 9,5N.m a 19,0N.m.

Com base nesses valores, foi estimado um valor de 10N.m para analisar as relações de giro do controle direcional, pois esta magnitude representa um baixo esforço do motorista. Importante ressaltar que é possível que esse valor de torque varie durante a condução do veículo, gerando uma velocidade de giro diferente do simulado nessa pesquisa.

Outro importante parâmetro para este modelo é o peso total do triciclo, com o motorista. Nesta simulação foi considerado os efeitos de tensão e deformação considerando o peso total de 180kg. Este peso foi distribuído entre as 3 rodas, o que gerou uma força vertical, de baixo para cima, de reação na estrutura de 588N.

### **3.3.2 Descrição do Programa Computacional e Equipamentos Utilizados para a Simulação do Triciclo do Tipo Velomobile Tadpole**

O programa computacional utilizado para desenho dos componentes do controle direcional, assim como a simulação do movimento e das tensões foi o SolidWorks. Esse software utiliza uma abordagem de projeto 3D, o que facilita a verificação das relações e interferências dos diferentes componentes de montagem.

Para a simulação do giro do volante e das rodas foi utilizado o módulo de estudo de movimento do programa de computador, no qual é possível simular a aplicação de uma força ou torque em determinado componente do modelo e seus efeitos nas demais peças.

A simulação das tensões e deformações foi utilizado o módulo de análise de tensões, no qual são simuladas as ações de diferentes forças no conjunto e os seus efeitos. Para isso, o programa de computador utiliza o conceito de elementos finitos, ou seja, o modelo divide a estrutura em pequenas partes com dimensões finitas e conecta eles através de nós, formando a malha da estrutura. Após essa modelagem é possível verificar os efeitos de tensão e deformação no estudo.

Os detalhes dos parâmetros utilizados na simulação estão descritos no apêndice B deste documento.

#### 4 Resultados das Simulações do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Velomobile Tadpole

Em relação à resistência do controle direcional, pode-se concluir que a estrutura suporta o peso de 180kg, sem qualquer deformação plástica em seus componentes. Em algumas regiões da estrutura principal, a tensão atinge valores próximos de 30Mpa, o que representa um coeficiente de segurança de 1,8, considerando que o limite de escoamento da liga de alumínio 6061 é de 55Mpa, conforme demonstrado na Figura 38.

A deformação elástica, a simulação nos indicou que a maior deformação da estrutura é de 0,768mm, considerando o efeito do peso de 180kg. Esta pequena deformação não acarreta em problema na montagem de componentes, tampouco na movimentação dos elementos móveis. Pode-se observar na Figura 39, que a maior deformação ocorre próximo ao apoio das rodas, isto ocorre devido ao braço de alavanca entre a distância das rodas até o centro do triciclo. Portanto, quanto mais próximo ao centro, menor o valor da deformação.

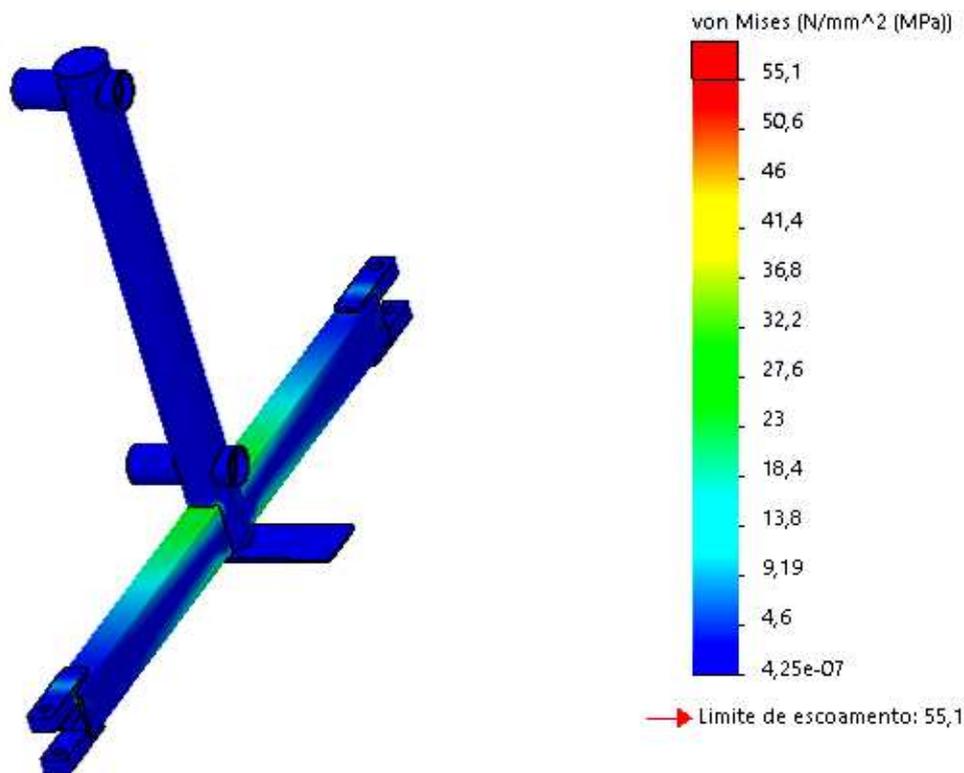


Figura 38 - Tensões resultantes da influência do peso de 180 kg do conjunto, considerando liga de alumínio 6061.

Fonte: Próprio Autor (2022).

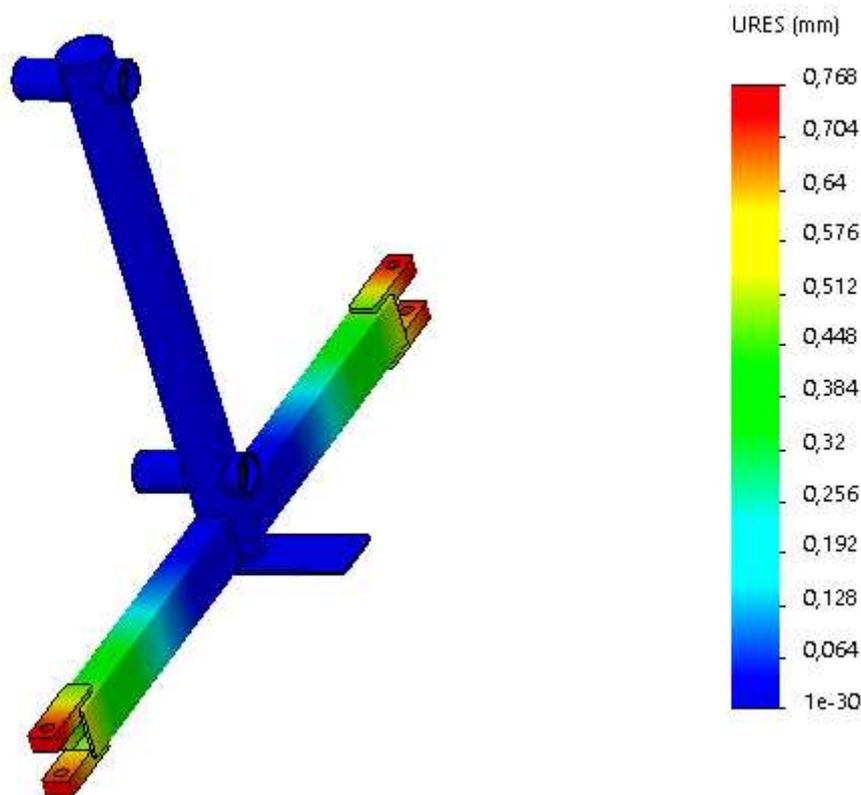


Figura 39 - Deformações da estrutura principal resultante da influência do peso de 180 kg, considerando liga de alumínio 6061.

Fonte: Próprio Autor (2022).

De maneira a complementar a simulação das tensões aplicadas no conjunto em liga de alumínio e exercer uma comparação entre performance de diferentes materiais, foi realizado uma simulação das mesmas forças aplicadas, porém considerando a estrutura em fibra de carbono e fibra de vidro. Os resultados são demonstrados nas Figuras 40 e 41, respectivamente. Pode-se observar que as tensões resultantes dos esforços são de magnitude muito inferior à tensão de escoamento dos materiais, comprovando que a fibra de carbono e de vidro são materiais mais resistentes que o alumínio 6061.

Porém, mesmo com este desempenho superior em relação à resistência, para a proposta do controle direcional utilizado nesse projeto será mantido a utilização o alumínio, pois seu custo é muito inferior ao da fibra de carbono e de vidro, além disso este material oferece maior facilidade na aquisição e na fabricação do conjunto proposto por essa pesquisa.

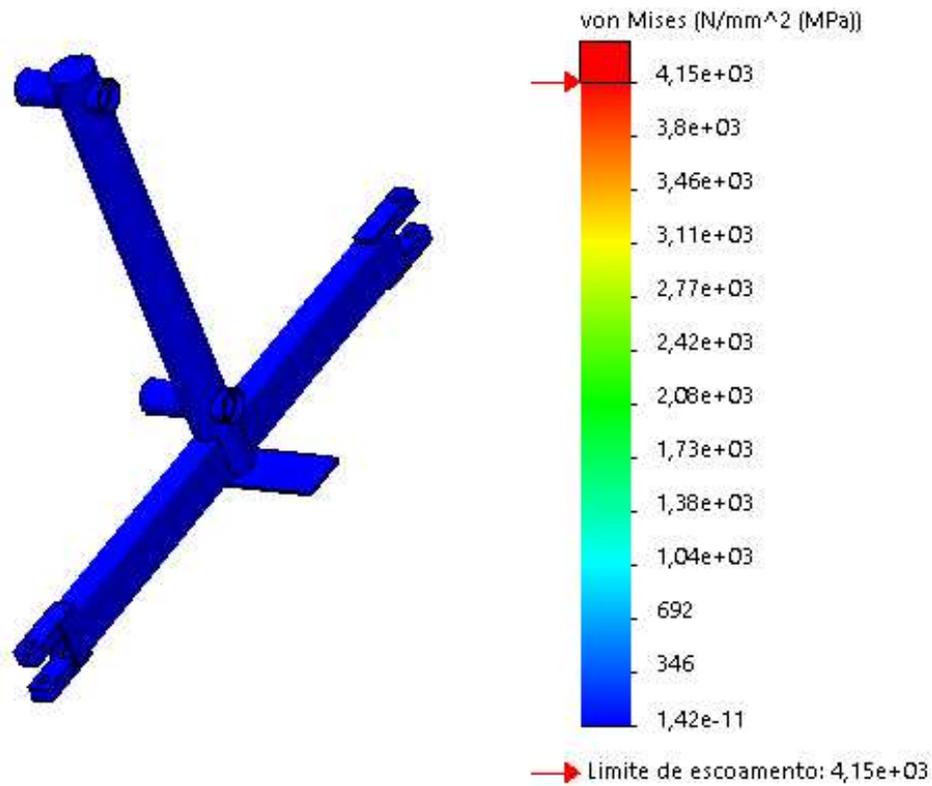


Figura 40 - Tensões resultantes da influência do peso de 180kg do conjunto, considerando fibra de carbono.

Fonte: Próprio Autor (2022).

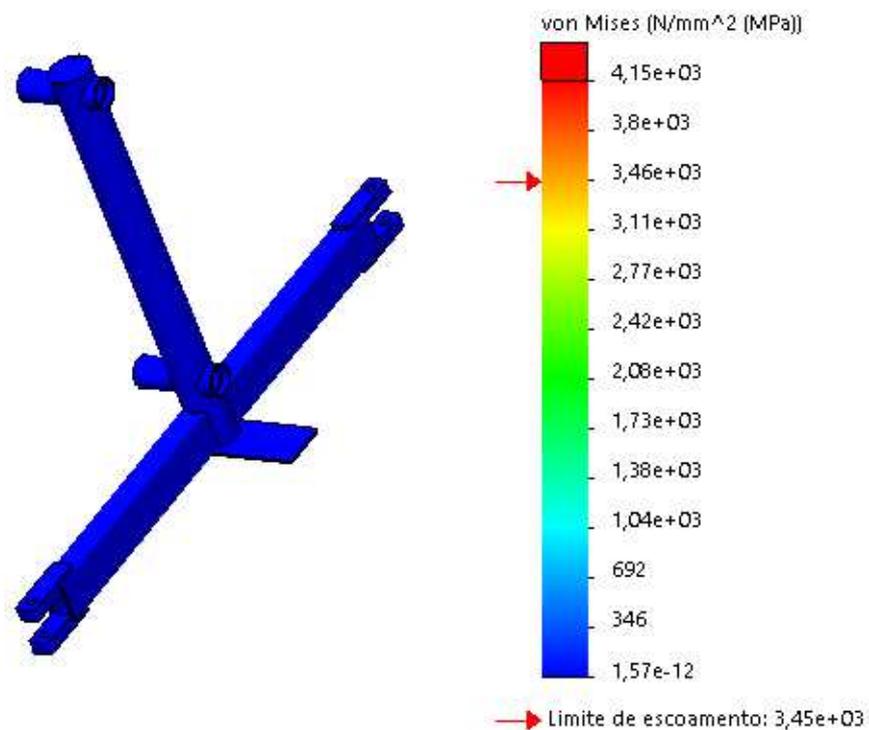


Figura 41 - Tensões resultantes da influência do peso de 180kg do conjunto, considerando fibra de vidro.

Fonte: Próprio Autor (2022).

Além da simulação dos esforços de tensões e deformações, uma importante análise foi realizada a respeito da dinâmica de movimentos dos componentes do controle direcional. A análise do esterçamento do triciclo é crítica para validação do modelo proposto, portanto foi realizado uma simulação entre o movimento de giro do volante e sua relação com as rodas.

Importante ressaltar que a simulação do movimento no programa SolidWorks foi uma ferramenta para ajustar as dimensões dos componentes da direção, ou seja, o projeto foi sendo realizado em conjunto com os resultados de simulação.

O principal objetivo dessas simulações de giro é garantir que o giro do volante não acarreta em um giro acentuado das rodas (podendo ocasionar uma derrapagem ou deslizamento), tampouco que o ângulo de giro fosse muito pequeno, impossibilitando uma eventual curva fechada.

Para isso, foram traçados gráficos que correlacionassem o giro do volante com os giros das rodas, para diferentes dimensões dos componentes. Foi identificado o efeito da variação do diâmetro do pinhão, o comprimento do eixo da roda, tamanho da haste chata, entre outros.

O gráfico apresentado na Figura 42 mostra a correlação entre os giros dos componentes para o modelo projetado nessa pesquisa. Pode-se observar que aplicando um torque baixo no volante (10N.m) é possível realizar uma curva fechada de 38°, em curto espaço de tempo (2,5 segundos). Para atingir essa curvatura, o giro do volante foi de 51°, o que apresenta uma boa relação de giro entre o volante e as rodas, validando os passos definidos entre cremalheira e pinhão.

A partir da análise dos resultados da simulação é possível identificar a relação de esterçamento do veículo. Como comentado anteriormente nessa pesquisa, um modelo que apresenta uma eficiente correlação de giro dos componentes evita desgaste excessivo dos pneus, permite execução de curvas acentuadas de maneira suave, além de evitar a perda de controle da direção.

O estudo do movimento de giro em conjunto com o modelo de forças e tensões são ferramentas importantes para auxiliar no dimensionamento dos elementos do controle direcional e validar o modelo final proposto. A partir das análises realizadas, pode-se concluir que o controle direcional proposto cumpre

as principais premissas de projeto: tamanho do veículo, peso suportado, capacidade de execução de curva, ergonomia (posição do condutor e força necessária para direção), resistência mecânica e facilidade na direção.

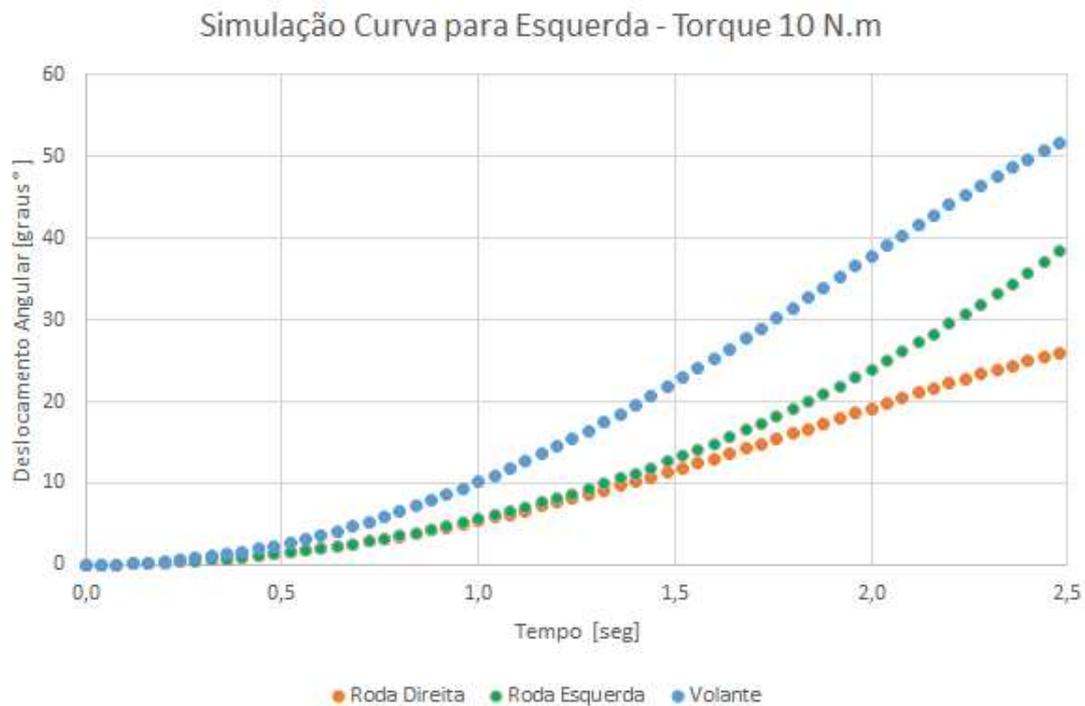


Figura 42 - Simulação do ângulo de giro do volante e rodas.  
Fonte: Próprio Autor (2022).

Esses resultados suportam a proposta da utilização de triciclo tadpole como alternativa aos transportes tradicionais existentes.

## **5 Resultados do Protótipo Físico do Sistema Direcional do Triciclo do Tipo Tadpole**

Após a validação do projeto através das simulações de esforços e movimentos, realizados no software SolidWorks, o modelo foi fabricado em escala reduzida. Esse processo foi realizado através da conversão do arquivo de 3D CAD para formato STL.

Essa conversão é realizada através da transformação da modelagem 3D CAD em pequenas faces triangulares em toda a peça, formando uma malha. Esse formato torna-se um padrão de entrada para prototipagem rápida e sistemas de manufatura (SZILVSI-NAGY, 2003).

O principal objetivo dessa prototipagem em escala do modelo é verificar a montagem dos elementos do projeto e suas relações. Através dessa análise, é possível obter informações que retroalimentam o projeto mecânico, refinando os desenhos e elementos mecânicos. Para facilitar a construção do protótipo alguns elementos mecânicos do projeto foram fabricados como uma peça única, como por exemplo parafusos, porcas e arruelas.

O material utilizado para fabricação foi o ácido polilático (PLA), que é o principal filamento utilizado nas impressoras 3D. Ele apresenta alta precisão de detalhes na impressão, assim como boa qualidade na superfície. Além disso, ele é considerado um material ambientalmente sustentável, por não ser tóxico e ser biodegradável oriundo de matéria prima de fontes renováveis, como milho e cana de açúcar (BESKO *et al*, 2017).

Nas figuras 43 e 44 estão ilustrados o protótipo em escala reduzida, de 1 para 5. Pode-se observar os principais componentes do sistema de direção, como o volante, pinhão e cremalheira.

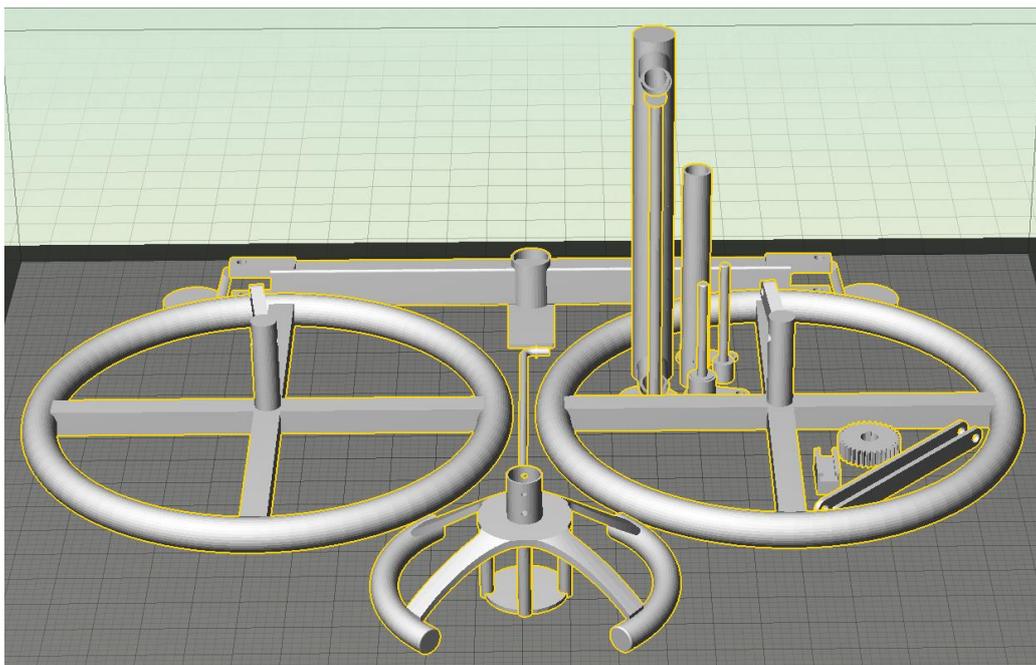


Figura 43 - Protótipo em escala reduzida pronto para impressão em 3D  
Fonte: Próprio Autor (2022).

Interessante observar como a transformação do projeto mecânico de CAD para STL se aproxima com um modelo real. A malha produzida pelo sistema, através dos triângulos gerados, representa uma aproximação significativa do modelo, permitindo a análise do sistema de uma maneira completa.

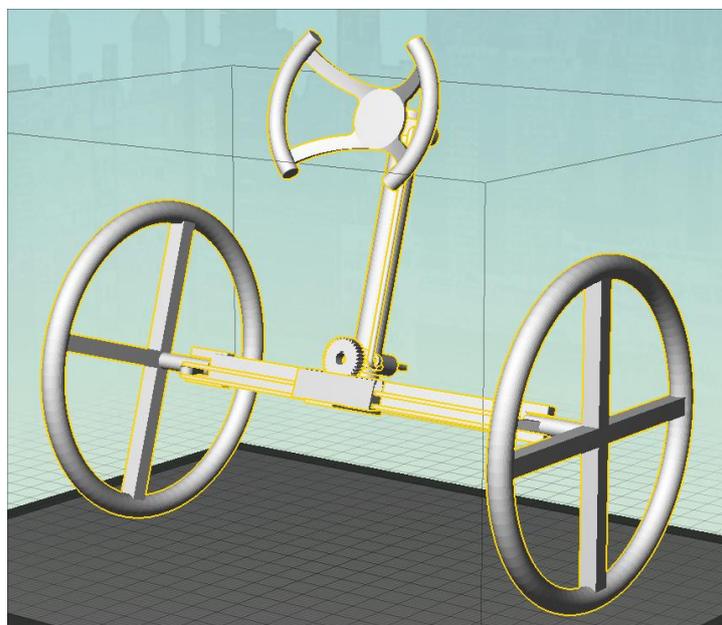


Figura 44 - Protótipo em escala reduzida montado  
Fonte: Próprio Autor (2022).

Com a impressão do protótipo foi possível verificar cada componente individualmente, assim como a proporção e relação entre eles. Essa visualização é de grande importância, pois permite que o desenvolvimento do restante dos componentes do triciclo (carenagem e estrutura) seja otimizado, a partir de uma visão da montagem dos elementos e da proporção das peças.

Além disso, a fabricação em escala possibilita a reimpressão do modelo com pequenas alterações em relações, como por exemplo o diâmetro do pinhão e ângulo das hastes de acionamento do giro das rodas. Essas alterações modificam a relação entre giro do volante e das rodas, modificando a forma de direção e de realizar as curvas. Dependendo do local e ambiente onde o triciclo será utilizado, pode ser interessante a modificação desses componentes.

Por fim, pode se concluir que a prototipagem em escala de projetos mecânicos representa uma técnica importante na otimização dos componentes, tanto na etapa de modelagem do sistema, quanto na etapa de ajuste das peças para customização do projeto, de acordo com a sua aplicação.

## 6 Conclusão

A presente dissertação teve o objetivo de desenvolver um controle direcional de triciclo do tipo tadpole, movido a propulsão humana. Esse desenvolvimento foi realizado a partir da análise do contexto de mobilidade urbana atual, em que há um menor interesse das novas gerações humanas na utilização de um automóvel particular como forma de transporte principal.

Isso ocorre devido a diversos fatores como: aumento da densidade da população urbana, do uso de aplicativos de transporte e de investimentos em novas formas de mobilidade. Demonstrando que o modelo de mobilidade urbana centrado no automóvel deverá diminuir no futuro. Esse fenômeno é observado no mundo todo, mas de maneira mais clara em países ditos desenvolvidos que vem utilizando outras formas de transporte.

Além disso, esse fenômeno associado a mudança da forma de se locomover nas cidades vem sendo acompanhado por um maior interesse da comunidade científica, assim como de investidores no desenvolvimento de produtos inovadores. Esses indicadores mostram uma clara tendência de mudança na mobilidade urbana, reforçando a necessidade de que os governos, empresas, usuários e acadêmicos atentem para esse fenômeno, buscando sempre oportunidades para criar equipamentos e dispositivos mais eficientes e ecológicos para o transporte humano.

Nos grandes centros urbanos mundiais, é cada vez mais popular a utilização de outras formas de transporte urbano, sendo que várias são complementares. Pequenos trajetos urbanos até estações de metrô, barcos ou trens podem ser realizados por bicicletas ou pequenos veículos elétricos (triciclos ou patinetes), que muitas vezes podem ser utilizados de maneira compartilhada através de aplicativos de celulares.

Nesse contexto, o uso de veículos com propulsão humana possui grande vantagem sobre outros meios de transporte, tanto no custo de deslocamento, quanto no custo de poluição urbana. Além é claro da constante ajuda na saúde humana devido a prática de exercícios físicos rotineiros.

A partir dessa análise, foi realizada uma extensa pesquisa dos principais veículos de propulsão humana, em especial os modelos de triciclos desenvolvidos. Essa pesquisa suportou o desenvolvimento do modelo de

controle direcional para um triciclo proposto nesse documento, principalmente nas definições das principais premissas do projeto.

A partir dessas pesquisas, análises e premissas, foi proposto um modelo que utiliza uma mecânica simples sob o aspecto construtivo, porém eficiente no controle da direção, que é o mecanismo de pinhão-cremalheira. Esse sistema mecânico é utilizado em veículos automotivos e sua dinâmica foi adaptada para um triciclo, atendendo as principais premissas desse tipo de transporte.

O modelo proposto de controle direcional foi validado através de simulações de esforços mecânicos (tensões, forças e deformações) e do estudo do movimento (esterçamento, relação entre giro do volante e rodas). Essas simulações foram realizadas no programa SolidWorks e suportaram ajustes no projeto mecânico apresentado.

Pode-se concluir que modelo proposto nessa pesquisa atendeu as principais premissas especificadas para o projeto mecânico e dentro do contexto de transformação da mobilidade urbana atual, o controle direcional desenvolvido, utilizado em um triciclo, apresenta-se como uma alternativa viável e competitiva no transporte urbano.

## **7 Propostas para a Continuação da Pesquisa**

De maneira complementar ao desenvolvimento do controle direcional de um triciclo, seria o projeto dos demais componentes estruturais do veículo, como a transmissão da rotação das rodas dianteiras para a roda traseira, da estrutura do banco do condutor e a carenagem do triciclo. Esses desenvolvimentos são complementares à pesquisa atual, e seu projeto pode ser realizado a partir das premissas, dimensões e resultados apresentados nessa dissertação.

Após o desenvolvimento do projeto da estrutura do triciclo, recomenda-se a construção de um modelo em escala real para testes práticos de direção do veículo. A partir desses testes, possíveis alterações e otimização do projeto proposto são esperados, como um processo de melhoria contínua comum em um novo desenvolvimento.

A partir da validação do modelo em escala real, também se sugere uma análise econômico financeira da produção de larga escala desse veículo como uma proposta comercial desse veículo.

Por fim, importante considerar que diversas pesquisas e novos desenvolvimentos estão sendo realizadas no ramo de mobilidade urbana. A tendência de utilização de mais de um tipo de transporte para execução de viagens são uma realidade, conforme citado nessa dissertação. Portanto, a pesquisa de outras modalidades de transportes e a análise de novas tendências é uma ferramenta importante e complementar ao desenvolvimento futuro dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTHONY, D. **The Horse, the Wheel, and Language: How Bronze-Age Riders from the Eurasian Steppes Shaped the Modern World**. Princeton University Press, 2007.

BEAUCHAMP, W. **Human Powered Race America**. Disponível: <http://www.recumbents.com/wisil/hpra.htm>. 2015.

BENETTI, G. L., MENEZES M. A., ALBERO, P. T. **Projeto de um Aparato de Medição de Torque no Volante de um Veículo de Alta Performance** .XXVI Congresso de Iniciação Científica, UNESP, 2014.

BESKO, M. A., BILYK, C. B. SIEBEN, P. G. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão, Tecnologia e Inovação. Vol.01 n.3, 2017.

CAMPBELL, A. A., CHERRY, C. R.; RYERSON, M. S.; Yang, X. M. **Factors Influencing the Choice of Shared Bicycles and Shared Electric Bikes in Beijing**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v.67, p.399–414, 2016.

CETSP, **Pesquisa de Monitoração da Mobilidade, Volume e Velocidade**. Companhia de Engenharia de Tráfego, 2018.

CORWIN, S.; PANKRATZ, D. **The future of mobility**. Deloitte Insights, 2017.

DIXON, S.; IRSHAD, H.; PANKRATZ, D.; BORNSTEIN, J. **Gauging global readiness for the future of mobility**. Deloitte City Mobility Index, 2019.

DURANTON, G.; TURNER, M. A. **The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence From US Cities**. American Economic Review, v.101(6), 2011.

EY, **Is your city as smart as its residents?** Quartz Creative Services, Ernst & Young Global, 2017.

FISHMAN, E. **A Review of Recent Literature**. Transport Reviews, v.36(1), p.92–113, 2016.

FISHMAN, E.; WASHINGTON, S.; HAWORTH, N. **Bike Share's Impact on Car Use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia**. Transportation Research Part D, p.13–20, 2014.

FOCAS, C.; CHRISTIDIS, P. **Peak Car in Europe?** Transportation Research Procedia, v.25, p.531–550, 2017.

FORKENBROCK, G. J., ELSASSER D., **An Assessment of Human Driver Steering Capability**. US Department of Transportation, 2005.

GRAHAM, B. **Frontrunner Website**. Disponível: <http://www.atomiczombie.com/>. 2016

HANNON, E.; McKERRACHER, C.; ORLANDI, I.; RAMKUMAR, S. **An Integrated Perspective on the Future of Mobility**. McKinsey & Company Sustainability & Resource Productivity, 2016.

IEA, **World Energy Balances: Overview International**. Energy Agency, 2018.

LETZ, D. H.; KLOSS, B.; KASSER, M.; MULLER, T. **Start me up: Where mobility investments are going**. McKinsey&Company, 2019.

MACHI, C.; ALONSO, M. **A bicicleta como modal de transporte sustentável para a cidade de São Paulo: O estudo de caso da trilha norte-sul**. Revista LABVERDE n°10, 2015.

MARQUES, F. A. **Estudo Comparativo das propriedades mecânicas do Quadro de Bicicletas, fabricados com Alumínio, Titânio e aço**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES, **Caderno Técnico para Projetos de Mobilidade Urbana**. Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana, 2016.

METROSP, **Pesquisa de mobilidade da região metropolitana de São Paulo**. Diretoria de planejamento e expansão dos transportes metropolitanos, 2013.

NASEM, **Millennials and Mobility: Understanding the Millennial Mindset and New Opportunities for Transit Providers**. Washington. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2013.

NBDA. **Industry Overview**. Disponível: <http://nbda.com/articles/industry-overview-2014-pg34.htm>, 2015.

NURSE, S.; NAPPER, R.; RICHARDSON. **The evolution of cycles from front wheel drive to delta tilting trike**. Australasian Transport Research Forum. Melbourne Australia, 2016.

NURSE, S.; NAPPER, R.; RICHARDSON, **Tilting Human Powered Trikes: Principles, Designs and New Developments**. Monash University, Australia, 2018.

PEETZ, R. A. M. **Projeto de uma caixa de direção para um protótipo Baja**. Escola de Engenharia de Piracicaba, 2018.

**Pesquisa Perfil do Ciclista Brasileiro**, disponível em <http://transporteativo.org.br/> 2015

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Relatório da mobilidade urbana: diagnóstico e prognóstico**. São José dos Campos, 2015.

PUCHER, J.; BUEHLER, Ralph. **Cycling towards a more sustainable transport future**. Transport Reviews, 37:6, 689-694, 2017.

RESENDE, C.; TERRA, R.; GRECO M.; GRECO J. **Aproveitamento energético no tráfego: uma análise para o campus UFMG**. REEC V.11 pg. 29-41, 2016.

RODE, P.; FLOARE, G. **Accessibility in Cities: Transport and Urban Form**. NCE Cities, v.3, 2014.

RONTESCU, C.; CICIC, T. D.; AMZA, C. G.; CHIVU, O.; DOBROTĂ, D. **Choosing the optimum material for making a bicycle frame**. METABK 54(4) 679-682, 2015.

ROSA, M. T. M. **Sistemas de direção**. Monografia (Especialização) Senai - Hortotec, Belo Horizonte, 2010.

SILVEIRA, M.; MAIA, M. **Variáveis que Influenciam no uso da Bicicleta e as Crenças da Teoria do Comportamento Planejado**. Transportes v. 23(1), p. 24-36, 2015.

SZILVSI-NAGY M., MATYASI G, Y. **Mathematical and computer modelling**, 2003.

UN, **The Speed of Urbanization Around the World**. United Nations, 2018.

VAN DE WALLE, F. **The velomobile as vehicle for more sustainable transportation**, Stockholm, Sweden, 2004.

WILSON, D. G. **Bicycling science**, 3rd edition Massachusetts Institute of Technology, 2004.

HORWITZ, R. M. **The Recumbent Trike Design Primer**, 2010.

## **APÊNDICE A**

**ARTIGO:** Uma visão da mobilidade urbana: passado, presente e futuro

**AUTORES:** Gabriel Campbell de Oliveira e Filipe Wiltgen

**REVISTA:** Tecnologia – UNIFOR - PUBLICADO

**ANO:**2020

## Uma visão da mobilidade urbana: passado, presente e futuro

*A vision of urban mobility: past, present and future*

*Una visión de la movilidad urbana: pasado, presente y futuro*

*Une vision de la mobilité urbaine: passé, présent et futur*

**Gabriel Campbell de Oliveira**   
 gabrieltcampbell04@gmail.com  
 Universidade de Taubaté  
 (Unitau)

**Filipe Wiltgen**   
 lfwbarbosa@gmail.com  
 Universidade de Taubaté  
 (Unitau)

### Resumo

Este artigo mostra uma visão temporal da mobilidade humana no mundo, assim como seus efeitos na cultura, na sociedade, no meio ambiente e na economia. O impacto que o passado teve na evolução técnico-científica e cultural, sob o aspecto dos veículos utilizados para deslocamentos curtos e rápidos dentro de centros urbanos, até hoje é importante para o desenvolvimento humano. A análise crítica relativa ao panorama presente deve ser capaz de identificar os principais desafios da mobilidade, quer seja para o lazer, quer seja para o trabalho diário, imaginando como os seres humanos deverão se locomover no futuro para serem sustentáveis, eficazes e estruturados de forma que seus meios de transporte possam ser parte natural e integral de uma determinada localidade. Por fim, o artigo mostra os modelos e ideias adotadas em cidades que tiveram sucesso em adaptar seus meios de transporte integrando seus anseios e princípios culturais com a mobilidade urbana.

**Palavras-chave:** Mobilidade urbana. Transporte. Veículos a propulsão humana.

### Abstract

This paper provides a temporal analysis of human mobility in the world, as well as its effects on culture, society, environment, and economy. The impact that the past had on scientific and cultural technical evolution, from the aspect of vehicles used for short and fast commuting within urban centers to this day is important for human development. The critical analysis of the present scenario should be able to identify the main challenges of mobility, whether for leisure or daily work. Forecasting how humans should move in the future to be sustainable, effective and structured in such a way that their means of transportation can be a natural and integral part of a given locality. Finally, this paper shows models and ideas adopted in cities that have succeeded in adapting their means of transportation by integrating their aspirations and cultural principles with urban mobility.

**Keywords:** Urban mobility. Transport. Human powered vehicle.

### Resumen

Este trabajo muestra una visión temporal de la movilidad urbana en el mundo, así como sus efectos en la cultura y sociedad, en el medio ambiente y en la economía. El impacto que el pasado tuvo en la evolución técnico-científica y cultural, bajo el aspecto de los vehículos utilizados para desplazamiento humano. El análisis crítico relativo al escenario actual debe ser capaz de identificar los principales desafíos de la movilidad, ya sea para el ocio o trabajo diario. Imaginando como los seres humanos deberán desplazarse en el futuro objetivando ser sostenibles, efectivos y estructurados de tal manera que sus medios de locomoción

puedan ser parte natural e integral de una determinada localidad. Finalmente, el trabajo muestra los modelos e ideas adoptadas en ciudades que lograron éxito en adaptar sus medios de transporte integrando sus deseos y principios culturales a la movilidad urbana.

**Palabras-clave:** Movilidad urbana. Transporte. Vehículos de propulsión humana.

### **Résumé**

Cet article montre une vision au cours du temps de la mobilité humaine dans le monde, bien comme ses effets sur la culture et la société, l'environnement et l'économie. L'impact que le passé a eu sur l'évolution technico-scientifique et sur l'évolution culturelle, concernant des véhicules utilisés pour les déplacements courts et rapides dans les centres urbains, est, à ce jour, important pour le développement humain. L'analyse critique du scénario actuel doit permettre d'identifier les principaux défis de la mobilité, soit pour les loisirs ou soit pour le travail quotidien. On imagine comment les humains devraient se déplacer dans le futur de manière durable, efficace et structuré de façon que leurs moyens de transport puissent être une partie naturelle et intégrante d'une localité donnée. Pour finir, l'article montre les modèles et les idées adoptés dans des villes où on a pu réussir à adapter les moyens de transport en intégrant leurs aspirations et principes culturels à la mobilité urbaine.

**Mots-clés:** Mobilité urbaine. Transport. Véhicules à propulsion humaine.

## **1 Introdução**

A mobilidade urbana é um tema que sempre esteve presente na discussão de modelo de sociedade. Com o rápido crescimento populacional experimentado nos últimos anos, associado ao desenvolvimento de novas tecnologias, o presente e o futuro do transporte se tornaram bastante dinâmicos. Os fatores humanos e sociais, em conjunto com o desenvolvimento tecnológico, são fundamentais na determinação do caminho que a locomoção de pessoas irá seguir no futuro próximo (SILVEIRA; MAIA, 2015).

Cada vez mais são observadas pesquisas científicas, empresas de tecnologia e políticas públicas associadas ao tema da mobilidade, pois é algo crucial no futuro. Hoje, a matriz energética mundial está centrada nos combustíveis fósseis, e o transporte representa uma parcela significativa desse consumo (IEA, 2018). Além disso, a questão da eficiência na locomoção das pessoas, considerando o gasto de energia, a poluição e o trânsito enfrentado nas cidades, torna essa discussão ainda mais relevante e necessária.

Este artigo aborda o passado, o presente e o futuro da mobilidade urbana considerando o contexto de problemas de nossa sociedade no trânsito e a matriz energética, associada ao desenvolvimento de novas tecnologias, além, é claro, da necessidade do ser humano em se locomover de forma sustentável e ecologicamente responsável.

Por fim, esta pesquisa discute o futuro da mobilidade urbana observando a tendência atual das pesquisas e investimentos, sempre observando em três tempos distintos: passado, presente e futuro.

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi um estudo descritivo e exploratório, que usa a análise de dados científicos através de uma abordagem qualitativa, quantitativa e comparativa entre os tipos de veículos utilizados pelos seres humanos em três períodos distintas (passado, presente e futuro da mobilidade urbana), com foco nos veículos de tração humana, como a bicicleta e os triciclos. As análises suportam a tese de uma tendência de mudança na mobilidade urbana, apresentada neste artigo.

## 2 O passado da mobilidade urbana

A locomoção de pessoas é um fator importante no desenvolvimento da civilização desde os tempos mais antigos. Se mover de uma comunidade a outra significava encontrar novos produtos, formas de comércio, culturas, tecnologias e pessoas (RODRIGUE, 2017). Essas jornadas, de diferentes civilizações, foram fundamentais para a formação do mundo que existe hoje. Em um primeiro momento, a locomoção era realizada sem uso de ferramentas, ou seja, através de longas caminhadas ou mesmo nadando.

O desenvolvimento e o uso de ferramentas fizeram com que o ser humano se colocasse em vantagem no deslocamento e na mobilidade frente a outros animais. Essa evolução foi gradativa. Inicialmente, utilizando materiais simples, como pedra e madeira. Ao longo dos anos, a complexidade dessas ferramentas foi aumentando, possibilitando a criação de máquinas e dispositivos que tinham como principal objetivo otimizar os esforços dos músculos humanos para integrar e propulsionar as máquinas.

Uma dessas invenções baseadas na propulsão humana foi o barco a remo. Grandes navios romanos eram movidos através de centenas de remos (WILSON, 2004). Inicialmente, a força exercida pelas pessoas era principalmente originária de músculos, como a mãos e braços. Os grandes músculos, como os das pernas, eram utilizados somente para promover o equilíbrio ou exercer força de reação.

Ao longo do tempo, as civilizações perceberam que utilizar esses grandes músculos associados às máquinas promovia melhor eficiência nas tarefas. A partir daí, novas invenções surgiram, como o cabrestante e o moinho (WILSON, 2004).

A roda foi uma dessas invenções que melhorava a eficiência nas tarefas. O seu uso promoveu uma grande mudança na forma de transporte e locomoção terrestre. A partir dessa invenção, ocorreu a expansão da exploração e da comercialização de novas terras para transportar suas mercadorias. O uso da roda popularizou a fabricação de charretes e carroças, veículos que eram movidos por tração animal (RODRIGUE, 2017).

Segundo Wilson (2004), o primeiro veículo a propulsão humana inventado na história foi a carroça, que era movida por pessoas andando a pé no ano de 1690, na França. Em 1817, na Alemanha, que surgiu a primeira bicicleta, que viria a se tornar o veículo de propulsão humana mais popular do mundo.

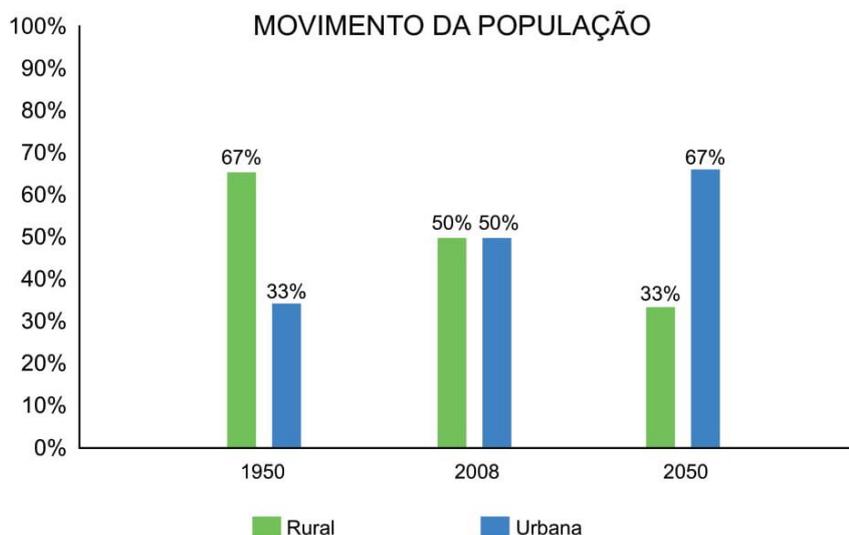
Por causa dessa popularidade, é comum na narrativa histórica do ciclismo ser resumida apenas a bicicleta que existe hoje, negligenciando formas de bicicletas do passado.

A importância da bicicleta como veículo de propulsão humana é indiscutível. A sua popularidade é reconhecida ao longo da história e se mantém até os dias atuais, abrangendo diferentes países, regiões e gerações.

## 3 O presente da mobilidade urbana

As invenções dos diversos veículos, sejam de propulsão humana, sejam movidos a combustíveis fósseis, sofreram algumas modificações significativas nas últimas décadas. Houve uma mudança na vida das civilizações, cuja principal mudança foi um grande aumento na quantidade de pessoas vivendo em grandes centros urbanos. Isso ocorreu devido ao grande fluxo migratório, conhecido como êxodo rural, a partir do qual um grande número de pessoas migrou das zonas rurais para as grandes cidades em busca de melhores oportunidades.

Esse fenômeno ocorreu, e ainda ocorre, principalmente nos países em desenvolvimento. Segundo um relatório das Nações Unidas (UN, 2018), esses países possuem uma taxa de crescimento urbano superior ao que os países desenvolvidos tiveram no passado, como pode ser visto na Fig.1, que mostra a taxa de crescimento urbano quando comparado ao crescimento rural. É fácil perceber a tendência crescente da inversão do movimento populacional rural para urbano que vem ocorrendo desde a década de 50. Observa-se que, em aproximadamente 30 anos, a inversão deverá ter sido alcançada.

**Figura 1**–Distribuição da população mundial entre zona rural e urbana.

Fonte: Ernest e Young, 2017.

O intenso crescimento fez com que as cidades com maior número de habitantes necessitassem de maior diversificação e oferta de meios de transporte. Um dos efeitos desse rápido crescimento populacional foi o aumento da área das cidades. Associado a isso, o aumento do número de veículos automotivos e das distâncias percorridas diariamente pioraram a mobilidade urbana e prejudicaram a eficiência dos meios de transporte.

Durante muito tempo, este foi o modelo de sistema de transporte público mais comum em grandes centros urbanos, nos quais os modais não motorizados ou a propulsão alternativa, incluindo a humana, não tiveram o mesmo incentivo.

Nesse contexto de crescimento do uso de veículos automotivos, os tamanhos das cidades fizeram com que o trânsito se tornasse um problema. Os grandes centros urbanos possuem congestionamentos crônicos.

Assim, uma das principais ações para diminuir a quantidade de veículos automotivos foi a substituição gradual dos meios de transporte e a melhoria organizacional das cidades, o que permitiu à população optar por outros modais menos problemáticos.

O trânsito gerado pelo uso intensivo de automóveis torna o deslocamento em grandes cidades um desafio nos dias de hoje. Os veículos automotivos ocupam um grande espaço físico nas vias urbanas e, em muitos deslocamentos, o potencial de transporte de pessoas em automóveis de passeio é subutilizado, pois é comum a utilização deste tipo de transporte para locomover uma ou duas pessoas.

A Figura 2 exemplifica esse problema, mostrando que a mesma quantidade de pessoas pode ser transportada por um único ônibus, por dezenas de bicicletas e por dezenas de automóveis. Além disso, é fácil perceber, nas fotografias da Fig. 2, que o volume de ocupação da via é muito menor com o ônibus e com as bicicletas, mas o volume ocupado na via urbana pelos automóveis supera, e muito, os outros meios de transporte.

**Figura 2** – Espaço ocupado para o transporte do mesmo número de pessoas para ônibus, bicicletas e automóveis.



Fonte: Dixon *et al.* 2019.

Uma das consequências do espaço ocupado pelos veículos é a expansão dos efeitos dos congestionamentos que tornam os centros urbanos, que possuem uma alta densidade populacional, uma região de difícil locomoção e mobilidade.

Além disso, o congestionamento gerado pelo uso extensivo de automóveis é intensificado em determinados horários, como o início da manhã e o final de tarde, tornando o deslocamento das pessoas nas cidades um desafio maior pelas condições de trânsito nesses horários.

Dessa forma, se faz necessário repensar o modelo de crescimento e infraestrutura das cidades, possivelmente desocupando progressivamente os centros comerciais urbanos, porém uma das consequências da desocupação dos centros comerciais das cidades é o progressivo aumento das distâncias percorridas pelas pessoas do trabalho até suas residências, dificultando a utilização de transportes menos rápidos e não motorizados.

Esse fenômeno, da expansão do uso de automóveis em detrimento de outros modais, ocorreu em quase todos os países. No Brasil (MACHI; ALONSO, 2015 ; CET SP, 2018), na cidade de São Paulo, o aumento da frota de automóveis foi incentivado pelas esferas governamentais, não só devido ao crescimento do tamanho das cidades, mas também devido aos subsídios concedidos pelo governo.

O efeito disso pode ser observado na Tabela 1, no qual é possível observar a composição da frota da cidade de São Paulo no ano de 2017.

Segundo uma pesquisa de mobilidade na região metropolitana de São Paulo realizada pelo METROSP (2013), a quantidade de carros particulares, entre 2007 e 2012, na cidade de São Paulo, cresceu 18%, enquanto o incremento de transporte não motorizado foi de apenas 8%.

**Tabela 1** - Composição da frota da cidade de São Paulo em 2017.

Tipo de transporte	Composição da frota (%)
Automóvel	79,2%
Motocicleta	15,3%
Ônibus urbano	2,7%
Caminhão	1,5%
Ônibus fretado	0,4%
Bicicletas	0,9%

Fonte: CETSP, 2018.

A taxa de veículos motorizados nesse período foi de 212 (duzentos e doze) veículos para cada 1.000 (mil) habitantes. Também foi identificado um aumento expressivo no uso de automóveis. Essas mudanças fizeram com que o volume de tráfego variasse significativamente. Como consequência, o sistema viário tornou-se incapaz de atender essa demanda crescente.

Em muitas cidades, a solução proposta para contornar esse problema foi a expansão das vias existentes e a construção de novas rotas, através de altos investimentos públicos. Entretanto os efeitos desses investimentos não trazem a redução dos congestionamentos. A expansão da infraestrutura viária, na maioria das cidades, é insuficiente em comparação com a demanda solicitada.

Um estudo realizado pela Escola de Planejamento Urbano de Montreal (MACHI; ALONSO, 2015) mostra que a estratégia de investimentos, ao invés de resolver o problema, na verdade, agravou, pois incentivou o aumento da frota veículos automotivos. Esse efeito negativo é observado, principalmente, em médio e longo prazo. Portanto, pode-se concluir que uma das soluções para os problemas crônicos de trânsito passa pelos incentivos e substituição dos modais de transporte, e não só pelos investimentos na expansão ou melhorias da malha viária.

Nesse contexto, a bicicleta possui um papel importante, pois seu tamanho, sua propulsão e a infraestrutura requerida é muito menor que um automóvel.

Além disso, em muitas cidades, essa infraestrutura pode estar associada a uma mudança positiva nas paisagens urbanas e à implantação de ciclovias em margens de rios, córregos e parques, melhorando a qualidade ambiental e paisagística.

A partir da década de 1970, surgiram as preocupações ambientais e com congestionamentos frequentes nas cidades, além da preocupação com a falta de segurança referente aos ciclistas urbanos, o que fez com que os países começassem a mudar a maneira de tratar o transporte urbano.

A expansão desenfreada e crescente da utilização de automóveis leva a um futuro não sustentável da mobilidade urbana, tanto do ponto de vista socioambiental quanto econômico. O planejamento urbano das cidades deve considerar uma alternativa novos e inteligentes modais.

#### **4 O Futuro da mobilidade urbana**

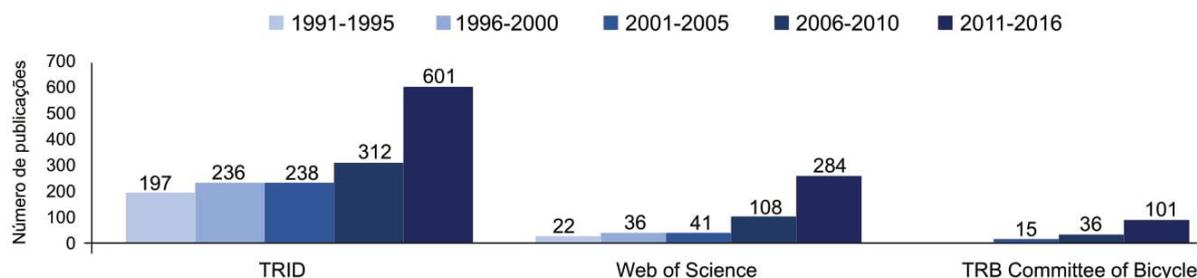
Em países da Europa o uso de automóveis tem sido substituído, principalmente, por transportes públicos, como metrô e trens, e também por veículos de propulsão humana, como a bicicleta. A redução do uso de veículos automotivos é motivada pelos custos na compra, custos de manutenção, custo dos combustíveis e pelo tempo gasto em congestionamentos.

Dessa forma, a bicicleta torna-se uma alternativa relevante para contornar esses problemas, de modo que o investimento em políticas de incentivo a esse modal é uma tendência na nossa sociedade moderna. Algumas cidades, principalmente nos países desenvolvidos, possuem uma cultura de infraestrutura desenvolvida que estimula e cuida dos ciclistas. A bicicleta é, provavelmente, o modal de transporte urbano mais sustentável desenvolvido pela sociedade (PUCHER; BUEHLER, 2017), viável não só para pequenas viagens, como também para percursos médios e longos.

Por conta das características desse modal, que é por natureza ecologicamente correto e importante para condicionamento físico humano, é também importante na redução da necessidade de espaço físico necessário e economicamente viável, tanto relativo ao equipamento quanto na infraestrutura necessária.

Atualmente, a bicicleta tem despertado muita atenção da comunidade científica, principalmente em seus novos desenvolvimentos. Nos últimos anos, observou-se forte tendência de pesquisas relacionadas a esse modal, conforme pode ser visto na Fig.3.

**Figura 3** - Média anual de publicações sobre bicicletas divididas em períodos de cinco anos. Baseados nas revistas especializadas *TRID*, *Web of Science* e *TRB Committee of Bicycle*.

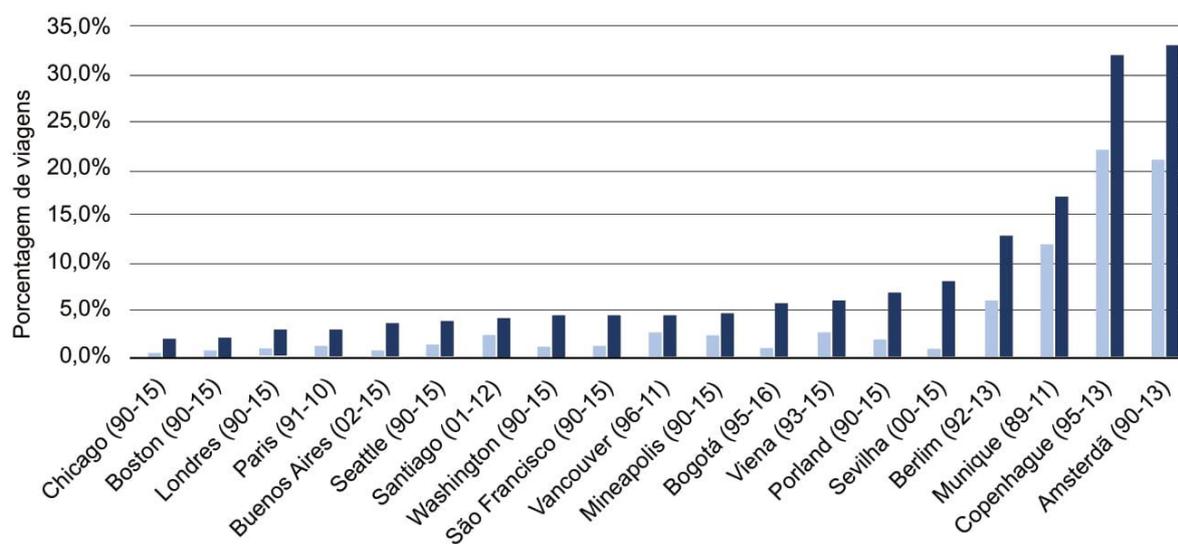


Fonte: Pucher e Buehler, 2017.

Além do aumento das pesquisas sobre bicicletas, é observado, também, um crescimento de conferências acadêmicas a respeito das bicicletas e suas derivações em diferentes países. Cada vez mais é possível observar novas organizações internacionais de divulgação e melhorias nas bicicletas. Com isso, é promovido de maneira consistente esse meio de transporte urbano.

Experiências bem-sucedidas de incentivo ao uso das bicicletas em alguns países, como Holanda, Dinamarca e Alemanha, reforçam a possibilidade desse modal ser utilizado de maneira mais ampla. Na Figura 4 é possível notar os países pioneiros na ampla utilização desse meio de transporte urbano, assim como as diversas cidades no mundo que estão acompanhando essa tendência.

**Figura 4** - Porcentagem de percursos realizados utilizando bicicleta.



Fonte: Pucher e Buehler, 2017.

O uso de bicicletas deve aumentar nos próximos anos devido às recentes inovações (PUCHER; BUEHLER, 2017), tais como: compartilhamento de bicicletas (*bikesharing*) e a ampla comercialização de bicicletas elétricas (*e-bikes*).

O primeiro sistema em larga escala de compartilhamento de bicicletas foi criado na cidade francesa de Lyon, em 2005 (FISHMAN, 2016), com cerca de apenas 1.500 (mil e quinhentas) bicicletas. Hoje, o mundo possui cerca de 1.300 (mil e trezentos) sistemas de compartilhamento de bicicletas com milhares de unidades,

quase o mesmo número do total de bicicletas que teve início o primeiro sistema de compartilhamento. Hoje, esses sistemas espalhados pelo mundo totalizam cerca de três milhões e meio de bicicletas operando no modo de compartilhamento.

Essa forma de utilização aumentou de maneira significativa a disponibilidade de bicicletas, flexibilizou as rotas de transporte, e possibilitou o uso em conjunto com outros meios de transporte, como os metrô. Esses sistemas estão amadurecendo tecnologicamente e devem haver um grande aumento nessa forma de utilizar as bicicletas.

Ao mesmo tempo, observa-se que o uso desse tipo de serviço diminuiu o número de viagens de veículos automotivos entre 2% e 21%, dependendo da cidade analisada. A cidade de Londres, no Reino Unido, foi a que conseguiu a menor redução (2%), e em Brisbane, na Austrália, a maior redução (21%) de uso de automóveis (FISHMAN *et al.*, 2014).

Outra inovação são as bicicletas com tração híbrida (humano-elétrica), as chamadas *e-bikes*. Cerca de 90% das bicicletas, mais de quarenta milhões, estão localizadas na China (CAMPBELL *et al.*, 2016), mas o número de *e-bikes* no norte da Europa tem aumentado rapidamente. Na Holanda e Bélgica, as *e-bikes* respondem por cerca de 30% de todas as vendas de bicicletas em 2016.

A *e-bike* tem a vantagem de auxiliar o condutor em trechos de subida e em grandes distâncias. Sua utilização complementa o uso de bicicletas convencionais, pois as políticas e infraestrutura para uso desses modelos são similares.

Os grandes centros urbanos possuem problemas crônicos relativos ao transporte público, sendo a principal forma de locomoção o uso de veículos automotivos, mas a bicicleta apresenta uma alternativa viável e crescente em todo o mundo.

O aumento no número de pesquisas científicas, grupos e comunidades especializadas, compartilhamento e utilização de *e-bikes* permite que a bicicleta ocupe uma importante posição na solução da mobilidade urbana no futuro, provavelmente protagonizando sua utilização nas cidades do mundo.

## 5 A Discussão do futuro da mobilidade urbana

O desenvolvimento de novas tecnologias e o crescimento das cidades e da população urbana ao redor do mundo são importantes variáveis no contexto de novas formas de mobilidade.

Um estudo das Nações Unidas (2018) mostra que, atualmente, 54% da população mundial vive em cidades e que, em 2050, esse número irá aumentar para 66% (como pode ser observado na Figura 1). Além disso, segundo Hannon *et al.* (2016), a densidade populacional irá aumentar em 30% nos próximos 15 anos. Essa mudança de concentração de pessoas irá representar um grande desafio para o transporte nos próximos anos, principalmente para o modelo de mobilidade centrado no automóvel.

Um dos principais motivos para o aumento dos congestionamentos de trânsito nas grandes cidades é o uso de automóveis, pois a relação entre espaço ocupado nas ruas por quantidade de pessoas transportadas em um carro é muito alta em relação a outros meios de transporte, como bicicleta, ônibus ou metrô. Para contornar esse problema, alguns países estão promovendo o uso racional de veículos, uma vez que o investimento em novas estradas ou rodovias, muitas vezes, não acarretam em melhorias expressivas no trânsito.

Estudos realizados em cidades americanas mostram que há uma relação entre a quantidade de rodovias (fornecimento) e de quilômetros percorridos por veículos (demanda). Investimentos em estradas acabam incentivando maiores percursos por condutores, mantendo o equilíbrio de fornecimento e demanda, ou seja, acabam não melhorando o trânsito de maneira definitiva (DURANTON; TURNER, 2011).

Para contornar o problema de congestionamento provocado por automóveis, algumas cidades estão adotando medidas em curto prazo para limitar o uso de veículos, como aplicação do rodízio, criando de zonas que restringem o uso de automóveis, além da cobrança de pedágios urbanos, acarretando uma diminuição do uso de automóveis no futuro.

Observa-se também, que alto custo econômico para manter um veículo automotivo particular tem desmotivado a aquisição pelos mais jovens. Esse efeito é notado de maneira mais relevante nas novas gerações, de acordo com uma pesquisa realizada pela Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos (NASEM, 2013). A geração de pessoas chamadas de *millennials*, que nasceram entre 1980 e 2000, possui cada vez menos interesse na utilização de veículos próprios automotivos.

No Brasil, pode-se observar essa tendência de menor interesse nas novas gerações humanas em possuir um veículo automotivo próprio, a partir dos números de novas habilitações concedidas no país.

Segundo dados do Denatran (2018), o número de novos motoristas habilitados, entre 18 e 21 anos, caiu 20% de 2014 a 2017. O menor interesse das novas gerações em possuir um automóvel pode ser observado em um aumento na utilização do transporte de pessoas via aplicativos de celular e outros modais.

Segundo Rode e Floater (2014), os aplicativos de transporte via celular é utilizado por cerca de 70% dos habitantes de Londres. Em Sidney são registradas mais de 40 (quarenta) milhões de solicitações de informação sobre viagens por mês.

A proliferação dos celulares também tem mudado a mobilidade urbana. Hoje é cada vez mais comum a utilização de aplicativos para verificar as condições de trânsito, para solicitar um serviço de táxi, para compartilhar uma bicicleta ou um patinete elétrico.

Nesse contexto de utilização de tecnologia da informação, há grande oportunidade nos serviços de compartilhamento de transporte.

Já existe esse tipo de serviço para bicicletas e patinetes, e a tendência é que se replique para outras formas de transporte. No caso do automóvel, o potencial desse serviço é grande, pois a utilização ainda é baixa, segundo Rode e Floater (2014).

Isso pode ser observado dado que uma pessoa que vai trabalhar durante oito horas por dia deixa o veículo estacionado, e isso equivale a cerca de 96% do tempo total. Além disso, cerca de 0,8% do tempo o motorista fica procurando uma vaga, 0,5% do tempo no trânsito cotidiano e apenas 2,6% do tempo realmente se locomovendo da residência ao local de trabalho.

O investimento para explorar novas maneiras de se locomover tem aumentado ano após ano e se mostra uma tendência mundial. Segundo um estudo realizado pela consultoria *McKinsey* (LETZ *et al.*, 2019), foram investidos mais de 220 (duzentos e vinte) bilhões de dólares em *startups* de mobilidade desde 2010. São mais de 1.100 (mil e cem) empresas de diferentes segmentos de transporte, como veículos elétricos, empresas de tecnologias de compartilhamento, de trânsito inteligente, entre outras. Esses dados são relevantes, pois reforçam a transformação da mobilidade urbana no mundo.

## 6 Conclusão

O menor interesse das novas gerações humanas na utilização de um automóvel particular como forma de transporte principal está associado a diversos fatores, como o aumento da densidade da população urbana, o uso de aplicativos de transporte e os investimentos em novas formas de mobilidade, mostrando que o modelo de mobilidade urbana centrado no automóvel deverá diminuir significativamente no futuro. Esse fenômeno é observado no mundo todo, mas de maneira mais clara em países desenvolvidos, os quais já utilizam outras formas de transporte.

Nos grandes centros urbanos mundiais, é cada vez mais popular a utilização de outras formas de transporte urbano, e várias são complementares. Pequenos trajetos urbanos até estações de metrô, barcos ou trens podem ser realizados por bicicletas ou pequenos veículos elétricos (tríciclos ou patinetes), que podem ser utilizados de maneira compartilhada através de aplicativos de celulares.

O uso de veículos com propulsão humana possui grande vantagem sobre outros meios de transporte, tanto no custo de deslocamento quanto no custo de poluição urbana. Além, é claro, da constante ajuda na

saúde humana pela prática de exercícios físicos rotineiros. Assim, possui importante significado para as novas gerações.

Por fim, esse fenômeno, associado à mudança na forma de se locomover nas cidades, vem sendo acompanhado com grande interesse pela comunidade científica, assim como também por investidores no desenvolvimento de produtos inovadores.

Esses indicadores mostram uma clara tendência de mudança na mobilidade urbana, reforçando a necessidade de que os governos, as empresas, os usuários e os acadêmicos atentem para esse fenômeno, buscando oportunidades para criar equipamentos e dispositivos mais eficientes e ecologicamente corretos para o transporte humano.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade de Taubaté – Unitau por fazerem parte do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, como estudante e professor. O segundo autor aproveita a oportunidade para agradecer o apoio financeiro concedido pela empresa de pesquisa, tecnologia e serviços da universidade de taubaté – EPTS, o qual permitiu o desenvolvimento desta pesquisa.

## Referências

- CAMPBELL, A. A. *et al.* Factors influencing the choice of shared bicycles and shared electric bikes in Beijing. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S. l.], v. 67, p. 399–414, 2016.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO DE SÃO PAULO. **Pesquisa de monitoração da mobilidade, volume e velocidade**. São Paulo: CETSP, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Dados referentes à novas habilitações concedidas**. Brasília: DENATRAN, 2018.
- DIXON, S. *et al.* **Gauging global readiness for the future of mobility**. New York: Deloitte City Mobility Index, 2019.
- DURANTON, G.; TURNER, M. A. The fundamental law of road congestion: evidence from US Cities. **American Economic Review**, Pennsylvania, v. 101, n. 6, p. 2616–2652, 2011.
- ERNEST e YOUNG. **Is your city as smart as its residents?** Quartz Creative Services. United States: Ernst & Young Global, 2017.
- FISHMAN, E. Bikeshare: a review of recent literature. **Transport Reviews**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 92–113, 2016.
- FISHMAN, E.; WASHINGTON, S.; HAWORTH, N., Bike share's impact on car use: evidence from the United States, Great Britain, and Australia. **Transportation Research Part D**, Transport and Environment, [S. l.], v. 31, p. 13–20, 2014.
- HANNON, E. *et al.* An integrated perspective on the future of mobility. **McKinsey & Company Sustainability & Resource Productivity**, Amsterdã, p. 1-5, 2016.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy balances: overview international**. Paris: IEA, 2018.
- LETZ, D. H. *et al.* Start me up: where mobility investments are going. **Sustainability & Resource Productivity**, Amsterdã, [S. l.], p. 1-8, 2019.
- MACHI, C.; ALONSO, M. A. Bicicleta como modal de transporte sustentável para a cidade de São Paulo: o estudo de caso da Trilha Norte-Sul. **Rev. Labverden**, São Paulo, Brasil, v. 10, p. 34-60, 2015.

METRO DE SÃO PAULO. **Pesquisa de mobilidade da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Diretoria de Planejamento e Expansão dos Transportes Metropolitanos, 2013.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Millennials and mobility: understanding the millennial mindset and new opportunities for transit providers**. Washington: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2013.

PUCHER, J.; BUEHLER, R. Cycling towards a more sustainable transport future. **Transport Reviews**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 689-694, 2017.

RODRIGUE, J. P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. **The geography of transport systems**. 4. ed. New York: Routledge, 2017.

RODE, P.; FLOATER, G. Accessibility in cities: transport and urban form. **NCE Cities**, London, v.3, p. 1-61, 2014.

SILVEIRA, M.; MAIA, M., Variáveis que influenciam no uso da bicicleta e as crenças da teoria do comportamento planejado. **Transportes**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 24-36, 2015.

UNITED NATIONS. **The speed of urbanization around the world**. United Nations, 2018.

WILSON, D. G. **Bicycling science**. 3. ed. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

### **Sobre os autores**

---

#### **Gabriel Campbell de Oliveira**

Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) na área de Energia e Materiais e graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em projetos de máquinas, tanto acadêmicas quanto profissionais.

#### **Filipe Wiltgen (L.F.W. Barbosa)**

Doutor em Dispositivos Eletrônicos e Computação na área de Fusão Termonuclear Controlada utilizando inteligência artificial para controle do plasma de Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 2003. Mestre em Dispositivos Eletrônicos e Computação na área de Fusão Termonuclear Controlada utilizando controle de campos magnéticos para confinamento e produção de plasma em Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 1998. Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica de Potência pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 1994. Atualmente atua como professor no Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica e como coordenador e professor do curso de pós-graduação Especialização em Energia Solar Fotovoltaica na Universidade de Taubaté (UNITAU).

---

**Recebido em:** 30/09/2019

**Aceito em:** 15/12/2019

## APÊNDICE B

### **Título:** Parâmetros e Resultados das Simulações Computacionais

O programa utilizado no projeto mecânica e nas simulações computacionais foi o SolidWorks versão 2018. Para as simulações foi utilizado dois suplementos de análises:

- “SolidWorks Motion” para o estudo de movimento de giro do volante e sua relação com o movimento das rodas;
- “SolidWorks Simulation” para o estudo de forças, tensões e deformações e no chassi, que é o principal elemento estrutural do sistema de direção.

Os principais parâmetros utilizados no estudo de movimento foram:

- Eliminação do efeito atrito entre os componentes móveis e seus elementos de fixação (rolamento, parafusos e porcas). Na prática, uma montagem e manutenção adequada desses elementos diminuem consideravelmente as forças de atrito envolvidas nesse movimento;
- Dimensões dos componentes conforme desenhos apresentados no “apêndice C” deste documento;
- Modelo “análise de movimento” do SolidWorks, que apresenta a simulação mais realista, levando em conta todos os tipos de objeto de movimento e fornecendo resultados numéricos precisos;
- Início do movimento gerado a partir de torque no sentido horário no volante, de magnitude de 10 N.m, simulando o giro do volante efetuado por uma pessoa;
- Principais variáveis registradas e plotadas a partir do torque aplicado foram a variação do ângulo do volante e das rodas.

- Os principais parâmetros utilizados na análise das forças foram:
- Análise de forças, tensões e deformações no elemento chassi estrutural, que é o principal componente do sistema para sustentação dos esforços;
- Dimensões dos componentes conforme desenhos apresentados no “apêndice C” deste documento;
- Aplicação das forças, simulando a reação das rodas do peso do condutor, nas extremidades do chassi, direção vertical, sentido de baixo para cima, magnitude de 588 N;
- Chapa base, localizada no centro do chassi, como elemento fixo;
- “Malha padrão” utilizada para cálculo dos elementos finitos;
- Análise de tensões conforme critério von Mises;
- Liga de alumínio utilizada no chassi e simulação de forças: 6061;
- Principais parâmetros utilizados para fibra de carbono: Limite de escoamento: 4150 Mpa e Coeficiente de Poisson: 0,26;
- Principais parâmetros utilizados para fibra de vidro: Limite de escoamento: 3445 Mpa e Coeficiente de Poisson: 0,21.

## APÊNDICE C

**Título:** Desenhos Técnicos do Projeto Mecânico do Sistema Direcional em Tamanho Real

