U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise dos Impactos dos Veículos Autônomos em Ambientes Urbanos

O caso de Florianópolis.

EDUARDO CORRÊA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM PLANEAMENTO E PROJETO URBANO

Orientador: Professor Doutor Álvaro Fernando de Oliveira Costa

---

Coorientadora: Engenheira Mestre Lígia Conceição Pereira

JULHO DE 2019

MESTRADO EM PLANEAMENTO E PROJETO URBANO 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌍 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Planeamento e Projeto Urbano- 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir. O idioma escolhido para este documento foi o Português do Brasil.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrônica fornecida pelo respetivo Autor.

A minha Família

Alguns poucos resistem e seguem adiante, sabendo que sua chama não deve ser traída, aprendendo a dar-lhe forma, propósito e realidade.

Any Rand

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, e por me conduzir por tantos caminhos ao longo desta minha breve história. A minha família, em especial, a meu pai, Luiz Valmor Corrêa, a minha mãe, Ana Rosemeri Beber Corrêa e a minha irmã, Isabela Corrêa, por estarem presente em meu coração, mesmo quando temos um oceano de distância entre nós. Agradeço a minha esposa, Caroline Schwabel, pelo amor e companheirismo, em tantos momentos que já passamos juntos.

Ao meu orientador, o professor doutor Álvaro Fernando de Oliveira Costa, pelas discussões acerca de diversos aspectos que envolvem o tema, que me motivaram desde o primeiro momento deste trabalho. Foi através de sua orientação que a ideia central desta dissertação de mestrado foi desenvolvida.

A minha coorientadora, a engenheira mestre Lígia Conceição Pereira, pelo seu grande empenho e interesse no desenvolvimento deste trabalho. Em especial, a seu conhecimento estratégico em programação matemática linear, através do programa FICO Xpress IVE.

A todo corpo docente do Mestrado em Planeamento e Projeto Urbano da FEUP, nomeadamente ao professor Fernando Manuel Brandão Alves, ao professor Paulo Manuel Neto da Costa Pinho, a professora Isabel Maria Fernandes Ribeiro Breda Lacerda Vazquez, ao professor Paulo Santos Conceição, ao professor Alberto Manuel Botelho de Miranda, a professora Cecília do Carmo Ferreira da Silva, a professora Sara Maria dos Santos Rodrigues da Cruz, e aos demais professores que foram essenciais em minha formação.

Aos professores da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da universidade UniSociesc, em especial a professora Graziella Cristina Demantova, ao professor José Emídio de Barros Filho, ao professor Cervantes Ayres Filho, e a todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Por fim, aos colegas e amigos que tive o prazer de conhecer no continente Europeu, cuja presença enriqueceu esta fantástica experiência que tive o prazer de viver.

RESUMO

O âmbito desta dissertação de mestrado é analisar e estimar quais serão os impactos causado pela implementação dos veículos autônomos na região metropolitana de Florianópolis. Para isso, chegou-se a sete objetivos, que foram estruturados em duas estratégias de análise principais. A primeira estratégia de análise consiste em realizar uma revisão da literatura, incorporando os seguintes objetivos: Analisar os tipos de operações de veículos autônomos; Compreender quais são as possíveis estratégias de controle e regulação; Avaliar quais serão os possíveis impactos urbanos causados pelos veículos autônomos. A segunda estratégia de análise consiste em realizar um estudo de caso e uma análise matemática, incorporando os seguintes objetivos: Identificar a atual situação do tráfego urbana do município de Florianópolis; Estimar e analisar a operação dos veículos autônomos em Florianópolis; Analisar o impacto deste processo de transição na área central de Florianópolis; Avaliar estratégias para otimizar globalmente o tráfego de veículos.

A principal conclusão obtida a partir deste estudo de caso é que o impacto dos veículos autônomos no ambiente urbano depende totalmente da intervenção de políticas públicas. Em cenários onde há um pedágio urbano associado a uma gestão do estacionamento, a operação dos veículos autônomos poderá contribuir para uma diminuição do congestionamento urbano, bem como, uma diminuição da demanda por vagas de estacionamento.

Deste modo, os veículos autônomos, e as suas consequentes implicações, podem fomentar diversas oportunidades de requalificações urbanas, de espaços que estão hoje degradados, cujo uso do solo está normalmente direcionado para o transporte veicular. No entanto, se não houver preocupação com as políticas de controle e regulação de veículos autônomos, poderá ocorrer um aumento significativo do número de viagens, que agravará o problema do congestionamento.

De fato, esta tecnologia promissora pode intensificar a dependência do uso do carro, que é corrente na maioria das cidades brasileiras. Entretanto, se trabalhado estrategicamente, os veículos autônomos poderão criar um sistema de mobilidade urbana mais eficiente e talvez de baixo custo, contribuindo para o equilíbrio espacial urbano e liberando espaço urbano para pedestres e ciclistas.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos autônomos; Políticas públicas; Uso do espaço urbano; Mobilidade urbana; Florianópolis; Brasil.

ABSTRACT

The scope of this master's thesis is to analyze and estimate the impacts caused by the implementation of autonomous vehicles in the metropolitan area of Florianópolis. To achieve this, we reached seven objectives, structured in two main strategies of analysis. The first strategy consists in performing a literature review with the following objectives: To analyze the types of operations of autonomous vehicles; Understand the possible strategies of control and regulation; Evaluate what are the urban impacts caused by the autonomous vehicles. The second strategy is to carry out a case study through mathematical programming with the following objectives: Identify the current urban mobility situation of the municipality of Florianópolis; Estimate and analyze the operation of autonomous vehicles in Florianópolis; Analyze the impact of this transition process in the central area of Florianópolis; Evaluate strategies to globally optimize vehicle traffic.

The main conclusion obtained from this case study is that the impact of autonomous vehicles in the urban environment totally depends on the intervention of public policies. In scenarios where there is an urban toll associated with parking management, the operation of autonomous vehicles may contribute to a decrease in urban congestion, as well as a decrease in the demand for parking spaces.

Therefore, the deployment of automated vehicles and its implications might foster several opportunities for the requalification of the urban regions, which today is degraded, focused on land use currently assigned for vehicular transportation. However, if there is no concern regarding policies for the control and regulation of autonomous vehicles, a significant increase on trips might happen, worsening congestion.

In fact, such promising technology might intensify the dependence on the use of vehicles, current in most Brazilian cities. Autonomous vehicles have the potential to create an efficient and low-cost urban mobility system that, if worked strategically, could contribute to urban spatial balance, freeing up space for pedestrians and cyclists.

KEYWORDS: Autonomous vehicles; Policy; Urban regions; Land-use; Mobility; Florianópolis; Brasil.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA 1
1.2. ÂMBITO, OBJETIVOS E MÉTODOS 3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 4
2. REVISÃO DA LITERATURA: VEÍCULOS AUTÔNOMOS 7
2.1. INTRODUÇÃO 7
2.2. O ATUAL CENÁRIO DA MOBILIDADE URBANA 7
2.2.1. DEMANDA POR VIAGENS 8
2.2.2. GESTÃO DA MOBILIDADE 8
2.3. TIPOS DE OPERAÇÕES DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS 10
2.3.1. OPERAÇÃO DE VEÍCULO DE BAIXA E MÉDIA CAPACIDADE 11
2.3.2. COEXISTÊNCIA NO ESPAÇO URBANO 13
2.3.2.1. Relação com pedestres e bicicletas: 13
2.3.2.2. Relação com veículos não autônomos: 13
2.4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E REGULAÇÃO 14
2.4.1. SISTEMA DE OPERAÇÃO 14
2.4.1.1. Zonas de restrição de uso 14
2.4.1.2. Sistema de avaliação de usuários 15
2.4.2. CUSTO DE OPERAÇÃO: 15
2.4.3. SISTEMA DE COBRANÇA PELA OPERAÇÃO 17
2.4.4. ATUAÇÃO DO PODER PÚBLICO NA LEGISLAÇÃO E FISCALIZAÇÃO: 18
2.4.4.1. Estabelecer uma legislação clara e padronizada 20
2.4.4.2. Prover a conectividade digital da infraestrutura 20
2.4.4.3. Avaliar a necessidade de adequar a infraestrutura existente 20
2.4.4.4. Incentivar o desenvolvimento de tecnologias de automação 20
2.4.4.5. Regular os provedores de serviços 21
2.4.4.6. Garantir a segurança cibernética 21

2.4.4.7. Garantir a privacidade dos usuários 21
2.4.4.8. Prever a responsabilização por eventuais acidentes 21
2.5. IMPACTOS URBANOS DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS 24
2.5.1. MOBILIDADE 24
2.5.1.1. Impacto na frota de veículos 24
2.5.1.2. Impacto nos sistemas de transportes públicos 25
2.5.1.3. Impacto no volume de viagens 25
2.5.1.4. Impacto no congestionamento 26
2.5.1.5. Impacto do valor do tempo de viagem 26
2.5.1.6. Impacto social através da mobilidade 26
2.5.2. SEGURANÇA RODOVIÁRIA 27
2.5.3. INFRAESTRUTURA URBANA 27
2.5.3.1 Impacto no espaço urbano 27
2.5.3.2 Impacto nas tecnologias de informação e comunicação 28
2.6. REFLEXÃO CRÍTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 29
2.6.1 OS IMPACTOS URBANOS 29
2.6.2 OS IMPACTOS LEGAIS 30
3. ESTUDO DE CASO: A SITUAÇÃO DA MOBILIDADE EM FLORIANÓPOLIS 33
3.1. INTRODUÇÃO 33
3.2. CARACTERIZAÇÃO DE FLORIANÓPOLIS 33
3.2.1. CARACTERIZAÇÃO DA CIDADE DE FLORIANÓPOLIS 33
3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA 34
3.2.2.1. Configuração Urbana 35
3.2.2.2. Principais Redes de Transporte e Mobilidade Urbana 35
3.2.2.3. Situação atual da infraestrutura para os ciclistas e pedestres 37
3.3. COLETA DE DADOS 38
3.3.1. TRÁFEGO DE VEÍCULOS 38
3.3.2. AVALIAÇÃO DA TAXA DE OCUPAÇÃO 39
3.4. ESTADO ATUAL DO TRÁFEGO RODOVIÁRIO DE FLORIANÓPOLIS 40
3.5. O IMPACTO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS: ANÁLISE DETERMINÍSTICA 41

4. OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE ESTRATÉGICA DA OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS 43
4.1. INTRODUÇÃO 43
4.2. FORMULAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO EM PROGRAMAÇÃO LINEAR 44
4.2.1. CONJUNTOS 44
4.2.2. DADOS 45
4.2.3. PARÂMETROS 46
4.2.4. VARIÁVEIS DE DECISÃO 47
4.2.5. FUNÇÃO OBJETIVA 47
4.2.6. RESTRIÇÕES 48
4.3. A INCLUSÃO DE FATORES ESTRATÉGICOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS 49
4.3.1. ESTACIONAMENTO 49
4.3.2. PEDÁGIO 51
4.4. APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DE FLORIANÓPOLIS 52
4.4.1. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS NA REDE 52
4.4.2. RESULTADOS 53
4.5. OUTRAS APLICAÇÕES DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO 58
4.5.1. SÃO LUÍS 58
4.5.2. RIO DE JANEIRO 59
4.6. REFLEXÕES CRÍTICAS DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO MODELO 60
5. OPORTUNIDADES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS 63
5.1. INTRODUÇÃO 63
5.2. MÉTODO DE COLETA DE DADOS 64
5.3. IMPACTOS E OPORTUNIDADES EM FLORIANÓPOLIS 65
5.4. ANÁLISE DOS IMPACTOS E OPORTUNIDADES EM FLORIANÓPOLIS 67
5.4.1 IMPACTOS IDENTIFICADOS NO ESTUDO DE CASO 67
5.4.1.1. Estacionamentos 67
5.4.1.2. Nível de serviço 68
5.4.1.3. Compartilhamento de viagens 68
5.4.1.4. Áreas de Carga e Descarga 69
5.4.2 IMPACTOS IDENTIFICADOS NA REVISÃO DA LITERATURA 70
5.4.2.1. Transporte público 70
5.4.2.2. Legislação 71

5.4.2.3. Acesso a mobilidade....71
5.4.2.4. Acidentes....71
5.4.2.5. Dados Urbanos....72
5.5. REFLEXÃO DOS IMPACTOS E OPORTUNIDADES EM FLORIANÓPOLIS....73
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES....75
6.1. CONCLUSÕES FINAIS....75
6.2. RECOMENDAÇÕES....77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....79
APÊNDICES....85

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Representação do sistema *Smart Para-Transit* 12
Fig. 2 - Localização da cidade e das pontes de acesso à ilha 34
Fig. 3 - Quarteirões de bairros de Florianópolis 35
Fig. 4 - Região central da cidade de Florianópolis 36
Fig. 5 - Linhas de ônibus da Região Metropolitana de Florianópolis 37
Fig. 6 - Localização dos pontos de contagem 38
Fig. 7 - Impresso de contagem com mapa de secção 39
Fig. 8 - Variação do volume equivalente de veículos por horário 40
Fig. 9 - Impacto da tecnologia dos veículos autônomos no fluxo de veículos 42
Fig. 10 - Organograma de formação da restrição de estacionamento 50
Fig. 11 - Organograma de formação do preço de pedágio 51
Fig. 12 - Interface da ferramenta de otimização FICO Xpress IVE 53
Fig. 13 - Resultados do modelo com taxa de penetração AV: 20% 54
Fig. 14 - Resultados do modelo com taxa de penetração AV: 50% 55
Fig. 15 - Resultados do modelo com taxa de penetração AV: 80% 57
Fig. 16 - Acesso rodoviário pela BR 135 à São Luís no estado do Maranhão 59
Fig. 17 - Ponte entre as cidades de Rio de Janeiro e Niterói 60
Fig. 18 - Imagem Ortofoto 2016 da região de análise 64
Fig. 19 - Imagem Ortofoto 2016 de uma vaga de estacionamento 65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de compartilhamento de veículos.....10
Quadro 2 - Níveis de direção autônoma 11
Quadro 3 - Comparação da estrutura de custos.....16
Quadro 4 - Código de ética dos veículos autônomos 22
Quadro 5 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.00 dólar 54
Quadro 6 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.75 dólar 54
Quadro 7 - Resultados do modelo com preço do pedágio 1.50 dólar 55
Quadro 8 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.00 dólar 56
Quadro 9 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.75 dólar 56
Quadro 10 - Resultados do modelo com preço do pedágio 1.50 dólar 56
Quadro 11 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.00 dólar 57
Quadro 12 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.75 dólar 58
Quadro 13 - Resultados do modelo com preço do pedágio 1.50 dólar 58
Quadro 14 - Impactos e oportunidades em Florianópolis 66

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AEQ – Fator de eficiência

BFFS - Velocidade em regime livre base [Km/h]

D – Concentração de veículos [u.v.l/km/via]

f - Volume de veículos totais [Veíc]

f_A – Fator de ajuste devido aos pontos de acesso

f^{AV} – Volume de veículos autônomos [Veíc]

f^{CV} – Volume de veículos convencionais [Veíc]

FFS - Velocidade em regime livre [Km/h]

f_{HV} - Fator de ajustamento devido à presença de veículos pesados

f_{LC} - Fator de ajuste devido à desobstrução lateral

f_M - Fator de ajuste devido ao tipo de separador central

f_{LW} - Fator de ajuste devido à largura das vias

f_{p} - Fator de ajustamento devido ao tipo de condutor

N - Número de vias por sentido

PHF - Fator da hora de ponta

$\mathrm{PR}_{\mathrm{AV}}$ – Taxa de Penetração veículos autônomos [%]

S - Velocidade média de percurso [Km/h]

V - Volume de tráfego por sentido para a hora de ponta [Veíc/h]

Vp – Volume de veículos por via por hora [u.v.l/km/via]

AV - Autonomous Vehicle

AVR - Autonomous Vehicle in Return

CACC - Cooperative Adaptive Cruise Control

CPF - Cadastro de Pessoa Física

CV - Conventional Vehicle

DETER - Departamento de Transportes e Terminais

EUA – Estados Unidos da América

ONU - Organização das Nações Unidas

PRT - Personal Rapid Transit

SAV - Shared Autonomous Vehicle

SPT - Smart Para-Transit

UNECE - United Nations Economic Commission for Europe

VC - Vienna Convention

Un – Unidade

Veíc – Veículos

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

No último século, a paisagem das cidades foi drasticamente alterada pelo automóvel. Por volta de 1960, a ideologia modernista torna-se dominante, e com isso, grandes quantidades de carros invadem as cidades (Gehl 2013). Durante este processo, houve a deterioração, em muitos aspectos, da vitalidade do ambiente urbano. Como mostra Solà-Morales (1987), a ruptura que houve entre a rua e os espaços de convivência, que ocorreu no ambiente urbano, gerou posteriormente críticas ao movimento moderno.

No atual cenário, existe um grande debate sobre o paradigma da cidade sustentável, que teoricamente deveria priorizar meios alternativos de mobilidade urbana em detrimento dos automóveis. Todavia, de acordo com Gehl (2013), por décadas, a dimensão humana tem sido um tópico do planejamento urbano esquecido e tratado a esmo. Isso ocorre, em função da grande influência que ainda existe das ideologias dominantes de planejamento, que deram baixa prioridade ao espaço público, às áreas de pedestres e ao papel do espaço urbano como local de encontro dos moradores.

Para Jacobs (2011), o urbanismo modernista foi inspirado na fusão de conceitos Cidade-Jardim e *Ville Radieuse*. A unidade básica do traçado urbano não é mais a rua, mas sim a superquadra, pensada para o trânsito de carros. A rua foi transformada em um lugar ruim para os seres humanos.

Estas alterações morfológicas, causadas pelo movimento moderno, são baseadas na lógica racional da padronização e da segregação de funções. Além disso, conforme os carros foram invadindo as cidades, gradualmente, calçadas estreitas foram ficando pontilhadas de placas de sinalização, parquímetros, postes, luminárias de rua e outros obstáculos colocados de modo a não ficar no caminho do tráfego motorizado. Neste cenário de conflito entre veículos e pedestres, para os pedestres foi oferecido o espaço residual, cheio de obstáculos físicos e frequentes interrupções no ritmo da caminhada, que são causadas pelas longas paradas em semáforos e difíceis cruzamentos de ruas (Alvez 2003; Gehl 2013).

Entretanto, com o surgimento dos veículos autônomos, muito do espaço que é ofertado ao automóvel, principalmente dentro das áreas urbanas, poderá começar a ser repensado. Deste modo, a operação dos veículos autônomos, pode gerar uma melhor mobilidade urbana. Neste sentido, os veículos autônomos podem transformar a experiência da viagem, permitindo que os passageiros descansem ou sejam produtivos enquanto viajam. Algumas estimativas mostram que os veículos com este nível de automação, devem estar comercialmente disponíveis entre as décadas de 2030 e 2040, sendo que, poderão representar entorno de 50% da frota de veículos (Litman 2018; Trommer et al. 2016).

O surgimento desta nova forma de mobilidade coincide com um cenário de desenvolvimento das regiões metropolitanas do Brasil. No território nacional brasileiro, cerca de 84,3% da população vive em centros urbanos, sendo que, há 40 regiões metropolitanas estabelecidas, que concentram 45% da população total, o que corresponde a mais de 80 milhões de pessoas. Nestas regiões metropolitanas há uma clara dependência do automóvel, sendo que o problema do congestionamento vem crescendo a cada ano (Cavararo 2017; Carvalho 2016).

Tradicionalmente, a grande maioria das cidades tentou resolver o problema do congestionamento através de uma maior oferta de infraestrutura viária. Porém, ao longo dos anos ficou evidente que a ampliação da infraestrutura se tornou um estímulo a maior utilização do automóvel (Scaringella 2001).

Neste sentido, de acordo com o relatório de PLAMUS (2015), no atual cenário, a região metropolitana de Florianópolis enfrenta um sério problema de mobilidade urbana, através de uma dependência do uso do automóvel pelos residentes, somada a uma sobrecarga da capacidade do sistema rodoviário. Assim sendo, o surgimento dos veículos autônomos, e a sua possível operação, certamente irão impactar nesta realidade. Contudo ainda é incerto se estes impactos serão positivos ou negativos.

Todavia, é evidente que além dos impactos gerados na mobilidade urbana, a operação dos veículos autônomos poderá causar grandes impactos no espaço urbano. Deste modo, serão analisados também estes impactos na área central da cidade de Florianópolis.

Segundo dados de PLAMUS (2015), na região central da cidade existe um sistema de controle e regulação do estacionamento denominado como Zona Azul, estabelecido pela Lei n° 4.666, de 24 de julho de 1995, sendo que há atualmente 5000 de vagas de estacionamento pagas. Com a operação dos veículos autônomos, provavelmente haverá uma mudança na dinâmica de ocupação destas vagas.

Provavelmente também haverá a necessidade de criar locais de carga e descarga para os passageiros, bens e mercadorias. Como mostra ITF (2015), uma parte dos espaço que pode ser economizado dos estacionamentos deve ser transformados em áreas de carga e descarga.

Além disso, a grande maioria das pessoas que estacionam nas ruas, dentro da Grande Florianópolis precisam investir tempo para buscar uma vaga de estacionamento, e após andar até o destino. De acordo com PLAMUS (2015) o tempo médio de procura de uma vaga, somado com o tempo médio de caminhada, fica entorno de 11 minutos. Portanto, fica evidente que no atual cenário, os motoristas precisam caminhar distancias relativamente grandes entre o estacionamento do veículo e o destino final, o que indica que há espaço para criar um sistema de estações, onde o tempo de caminhada até o destino final seja inferior a 11 minutos.

Deste modo, fica claro que existem diversos impactos e oportunidades que serão criadas a partir da operação dos veículos autônomos. Para buscar compreender estes impactos, o presente trabalho irá analisar a operação dos veículos autônomos no acesso da ilha de Florianópolis, através de diferentes possibilidades de cenários, em um modelo matemático de otimização da atual infraestrutura rodoviária. É importante ressaltar que a ilha de Florianópolis possui atualmente apenas um ponto de ligação rodoviário com a parte continental da cidade.

Além disso, o modelo de otimização proposto nesta dissertação irá considerar a dinâmica de ocupação das vagas de estacionamento da área central da cidade. Vale destacar que nesta análise os principais fatores serão a possibilidade de haver um pedágio urbano e a gestão da ocupação das vagas de estacionamentos.

Esta avaliação dos impactos causados por veículos autônomos, acontece dentro da esfera do planejamento urbano. Deste modo, além da análise de aspectos tecnológicos dos veículos autônomos, este trabalho busca analisar principalmente, os aspectos relacionados às estratégias de políticas públicas.

1.2. ÂMBITO, OBJETIVOS E MÉTODOS

No âmbito do desenvolvimento desta dissertação de mestrado, pretende-se abordar e estimar quais serão os impactos causado pela implementação dos veículos autônomos na região metropolitana de Florianópolis, capital do Estado de Santa Catarina, sul do Brasil. Assim, este estudo pretende responder às seguintes questões de investigação:

- Quais serão as oportunidades geradas nas áreas centrais das cidades pela operação dos veículos autônomos?
- Qual será o impacto dos veículos autônomos?
- Quais políticas públicas as regiões metropolitanas podem adotar para tirar o melhor partido dos veículos autônomos?

Através destas questões, chegou-se a sete objetivos, que deram o direcionamento da investigação. Para atingir estes objetivos, a estratégia desta dissertação de mestrado está dividia em dois métodos de análises principais, cada qual, associado a seus objetivos gerais:

- Expositiva:
    - Analisar os tipos de operações de veículos autônomos;
    - Compreender quais são as possíveis estratégias de controle e regulação;
    - Avaliar quais serão os possíveis impactos urbanos causados pelos veículos autônomos;

- Argumentativa:
    - Identificar a atual situação do tráfego urbano do município de Florianópolis;
    - Estimar e analisar a operação dos veículos autônomos em Florianópolis;
    - Analisar o impacto deste processo de transição na área central de Florianópolis;
    - Avaliar estratégias para otimizar globalmente o tráfego de veículos.

Portanto, na análise Expositiva, o método consiste em realizar uma revisão da literatura para expor qual é o pensamento acadêmico sobre o tema proposto. Na análise Argumentativa, o método consiste em realizar um estudo de caso e uma análise matemática para que seja possível entender e mensurar quais serão os impactos causados na área de estudo.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O conteúdo desta dissertação de mestrado está organizado em seis capítulos. No presente Capítulo «Introdução», há o enquadramento do tema proposto a nível histórico e no contexto das regiões metropolitanas brasileiras, principalmente em relação ao caso de estudo. Este Capítulo refere-se também ao âmbito do tema de investigação, bem como aos objetivos do trabalho e aos principais métodos de investigação que serão utilizados.

No Capítulo 2 «Revisão da Literatura: Veículos Autônomos» há o aprofundamento do enquadramento do tema em relação ao que foi exposto no Capítulo 1. Além disso, está apresentado a discussão bibliográfica sobre a operação, impactos e estratégias de controle e regulação dos veículos autônomos. Por fim, há uma reflexão crítica sobre a análise realizada.

No Capítulo 3 «Estudo de Caso: A Situação da Mobilidade em Florianópolis» é apresentada uma análise e caracterização da atual situação da mobilidade urbana de Florianópolis, através do embasamento do Capítulo 2. No fim, apresenta-se uma análise do impacto da eficiência dos veículos autônomos no atual cenário.

No Capítulo 4 «Otimização e Análise Estratégica da Operação dos Veículos Autônomos» é realizado uma otimização em programação matemática, no programa FICO Xpress IVE, com o objetivo de analisar o desempenho do tráfego no caso de estudo, incluindo os custos de estacionamento e pedágio ao custo de operação dos veículos. Esta análise é realizada em função da reflexão crítica realizada no Capítulo 2, que aponta a política de pedágios urbanos e a gestão do estacionamento, como as principais estratégias de controle e regulação dos veículos autônomos. Os dados utilizados para a análise foram coletados no estudo de caso realizado no Capítulo 3.

No Capítulo 5 «Oportunidades para Políticas Públicas» apresenta-se uma análise dos impactos causados pelos veículos autônomos, que é realizada em função da agregação os dados obtidos nos Capítulos 2 e 4. Por fim, há uma avaliação das oportunidades para a requalificação da área central de Florianópolis, que surgem a partir dos impactos urbanos.

No Capítulo 6 «Conclusão e Recomendações» há a análise final da presente dissertação de mestrado, com as considerações finais.

2

REVISÃO DA LITERATURA: VEÍCULOS AUTÔNOMOS

2.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo é caracterizado pela revisão da literatura acerca do atual problema de mobilidade urbana das regiões metropolitanas e como o surgimento da tecnologia dos veículos autônomos poderá impactar neste cenário. A seção 2.2 deste capítulo aborda a evolução que há no conceito de viajar dentro das cidades, em função do atual cenário da mobilidade urbana.

A seção 2.3 aborda os níveis de automação dos veículos autônomos, os tipos de operação dos veículos autônomos, e por fim, de que forma provavelmente será a operação dos veículos autônomos no ambiente urbano. Na seção 2.4 do presente capítulo são apresentadas as principais estratégias de controle e regulação da operação dos veículos autônomos.

Na seção 2.5 deste capítulo são analisados os prováveis impactos que serão causados pela operação dos veículos autônomos em ambientes urbanos. Por fim, na seção 2.6, é realizada uma reflexão crítica da forma como a atual literatura científica aborda os veículos autônomos.

2.2. O ATUAL CENÁRIO DA MOBILIDADE URBANA

Tradicionalmente, o ato de viajar é considerado como uma demanda derivada, e não como uma demanda direta (Banister 2004; Mokhtarian e Salomon 2001). Desta forma, a tentativa para resolver o problema de congestionamento das cidades ocorreu através de uma maior oferta de infraestrutura viária, satisfazendo a procura. Entretanto, percebeu-se, que os investimentos em infraestrutura não conseguem acompanhar o crescimento da demanda, uma vez que a ampliação da infraestrutura se torna um estímulo a maior utilização do automóvel, gerando o problema da demanda induzida (Scaringella 2001).

Nos últimos anos, há um forte crescimento de alternativas de transporte, relacionadas a forma como as viagens interferem na mobilidade, para acesso aos serviços. Neste sentido, considera-se que os veículos autônomos, empregados no compartilhamento de viagens, poderão impactar em muitas cidades, em aspectos como a acessibilidade dos transportes públicos, a taxa de propriedade de veículos e na oferta de novas maneiras de acessar atividades (Vosooghi et al. 2017).

2.2.1. DEMANDA POR VIAGENS

A demanda derivada pode ser definida como uma demanda de utilização da infraestrutura de mobilidade, em função da necessidade de participar de alguma atividade. Desta forma, grande parte da demanda não é pela mobilidade, mas sim, a mobilidade é um meio para a pessoa acessar uma atividade. Neste contexto, a viagem é considerada um mal necessário para alcançar algum destino pretendido (Mokhtarian e Salomon 2001).

Todavia, nem todas as viagens são realizadas por causa dos benefícios derivados no destino. Grandes quantidades de viagens de lazer são realizadas por si mesmas (Banister 2004). Deste modo, há também a demanda induzida, que pode ser definida como uma demanda de utilização da infraestrutura de mobilidade, gerada pelo aumento da oferta de condições de mobilidade. Neste sentido, para que a mobilidade urbana seja sustentável, é necessário que o poder público interfira com o controle da demanda por viagens, e não mais, aumentando a oferta de infraestrutura rodoviária (Costa et al. 2013).

2.2.2. GESTÃO DA MOBILIDADE

O surgimento e aprimoramento da tecnologia de veículos autônomos, coincide com uma situação de colapso do sistema rodoviário das regiões metropolitanas brasileiras. As áreas urbanas no Brasil representam menos de 1% do território nacional, mas concentram cerca de 160 milhões de pessoas. Isso corresponde a 84,3% da população, que vive nos ambientes urbanos. Deste total, há 40 regiões metropolitanas, que concentram mais de 80 milhões de pessoas (Cavararo 2017; Carvalho 2016).

O Brasil perde em média, R$ 267 bilhões por ano, em função dos congestionamentos, principalmente nas regiões metropolitanas do país. Este valor representa entorno de 4% do Produto Interno Bruto do Brasil. Cerca de nove milhões de usuários do sistema de mobilidade brasileiro, possuem um tempo médio de deslocamento para o trabalho, superior a uma hora. O tempo considerado ideal, seria de 30 minutos. Este tempo perdido em congestionamentos, poderia ser transformado em trabalho, lazer ou estudo (Ramalho 2018).

Neste sentido, a atual abordagem na gestão da mobilidade urbana deve estar focada em prevenir a demanda por viagens, uma vez que, para criar um sistema sustentável de mobilidade, é necessário gerir a demanda, em vez de satisfazê-la. No Brasil já há alguns esforços legais que denotam o interesse em fortalecer a gestão da mobilidade urbana, segundo as competências de cada esfera de governo. É possível citar como exemplo a Política Nacional de Mobilidade Urbana, lei 12.587/12, que procura prover a Gestão da Mobilidade através da plena integração entre União, Estados e Municípios (Costa et al. 2013).

No mesmo contexto, há um o avanço crescente da economia do compartilhamento, através do desenvolvimento das redes sociais, internet e tecnologias móveis. Este é um fenômeno em desenvolvimento, baseado no aluguel de bens e serviços. Como exemplo, é possível citar o compartilhamento de viagens, que podem ocorrer através de caronas entre colegas, ou mesmo, através de operadores privados. Assim sendo, a economia do compartilhamento pode melhorar a eficiência dos serviços, monetizando os recursos existentes, e por fim, ajudando no enfrentamento do problema do congestionamento (Shaheen, Cohen e Zohdy 2016).

Entretanto, o conceito de compartilhamento de viagens não é algo que surgiu agora. Este foi um dos primeiros conceitos que surgiram com o intuito de resolver o problema da mobilidade urbana. Uma das primeiras experiências europeias no compartilhamento de viagens é atribuída a cooperativa Sefage, que iniciou serviços em Zurique, na Suíça, em 1948. Nesta época, a principal motivação para o compartilhamento era econômica, onde os individuas que não possuíam veículos procuravam pelas cooperativas de compartilhamento (Shaheen, Sperling e Wagner 1998).

Entretanto, além dos aspectos econômicos, é possível identificar, principalmente nas grandes cidades, novas motivações que estimulam o compartilhamento de viagens. De acordo com Vosooghi et al. (2017), atualmente, uma das principais motivações para o compartilhamento de viagens, está na busca pela resolução do problema do excesso de veículos que circulam nas cidades.

Com relação ao modelo operacional, a operação pode ser tanto terceirizada, quanto particular. Deste modo, o compartilhamento de viagens pode ser classificado como *carsharing* e *carpooling*. O *carsharing* é definido como o compartilhamento de viagens em veículos, por um determinado período, que são mantidos, gerenciados e segurados por uma organização terceirizada, sendo que as pessoas que realizam as viagens, pagam um valor pelo serviço à esta organização terceirizada (Shaheen, Chan e Micheaux 2015).

Já o *carpooling*, é definido como o compartilhamento de viagens, por um determinado período, que são realizadas em veículos particulares, com os passageiros contribuindo para as despesas do motorista (Ciari e Axhausen 2012).

Além disso, os sistemas de compartilhamento de viagens podem ser classificados ainda, em dois tipos principais, sendo eles: *Round-trip* e *One-way*. O sistema *One-way* pode ser dividido em três subsistemas. No Quadro 1 está ilustrado os tipos de compartilhamento de viagens, com as principais características de cada sistema e subsistema (Vosooghi et al. 2017).

Quadro 1 - Tipos de compartilhamento de veículos (Vosooghi et al. 2017)

	Tipos de Compartilhamentos			
	Round-trip	**One-way**		
		Em estações	**Flutuantes**	**Veículos Autônomos Compartilhados**
Entrada	Ponto específico	Em qualquer estação	Em qualquer local disponível	Em qualquer local
Saída	Ponto específico	Em qualquer estação	Em qualquer local autorizado	Em qualquer local
Problema de Estacionamento	Não	Sim	Não / Sim	Não
Problema com oferta de veículo	Não	Sim	Sim	Não

O uso atual do compartilhado de viagens, é uma faceta da economia compartilhada. Desta forma, a mobilidade compartilhada permite que os usuários obtenham acesso de curto prazo ao transporte, conforme necessário. Em todos os três subsistemas do compartilhamento *One-way*, o compartilhamento da viagem pode ocorrer de três formas principais. Assim sendo, o compartilhamento da viagem pode ser do tipo *ridesourcing*, operado por empresas como o Lyft e o Uber. Outro tipo de compartilhamento é o *ridesplitting*, operado por empresas como a UberPOOL e Lyft Line. Por fim, há também o compartilhamento do tipo *e-Hail*, que são basicamente táxis habilitados para aplicativos (Shaheen, Cohen e Zohdy 2016).

Neste sentido, a tecnologia dos veículos autônomos pode melhorar e expandir o compartilhamento de carros e o compartilhamento dinâmico de viagens, permitindo aluguéis próximos, em tempo real, por tempo ou por distância (Fagnant e Kockelman 2015). Atualmente, os fabricantes de automóveis estão diretamente envolvidos em operações de compartilhamento de veículos, com o objetivo de obter os benefícios financeiros desta forma de mobilidade urbana. Portanto, há expectativas de que os veículos autônomos compartilhados sejam a próxima geração de sistemas de compartilhamento de viagens (Vosooghi et al. 2017). De acordo com Martinez e Viegas (2017) para a maioria dos passageiros que viajam diariamente nas grandes cidades, os serviços de compartilhamento de viagens em veículos autônomo podem justificar, de forma financeira, a substituição de seu veículo convencional privado por esse tipo de serviço.

2.3. TIPOS DE OPERAÇÕES DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS

De acordo com SAE (2018), existem atualmente seis níveis de direção autônoma, conforme apresentado no Quadro 2. O Departamento de Transportes dos EUA usa estes seis níveis de automação, definidos pelo código J3016, para a regulação da operação de veículos autônomos. Desta forma, o documento se tornou um padrão global.

Quadro 2 - Níveis de direção autônoma (SAE 2018)

<table>
<tr><th>Nível 0</th><th>Nível 1</th><th>Nível 2</th><th></th><th>Nível 3</th><th>Nível 4</th><th>Nível 5</th></tr>
<tr><td colspan="3">Você está dirigindo sempre que esses recursos de suporte estiverem ativados, mesmo que seus pés estejam fora dos pedais e você não esteja dirigindo</td><td rowspan="3"></td><td colspan="3" rowspan="2">Você não está dirigindo quando esses recursos de direção automatizados estão acionados, mesmo se você estiver sentado no banco do motorista</td></tr>
<tr><td colspan="3">Você deve supervisionar constantemente esses recursos de suporte. Você deve dirigir, frear ou acelerar conforme necessário para manter a segurança</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Esses recursos são limitados a fornecer avisos e assistência momentânea</td><td rowspan="2">Esses recursos fornecem suporte de direção ou suporte de freio e aceleração ao motorista</td><td rowspan="2">Esses recursos fornecem suporte de direção e suporte de freio e aceleração ao motorista</td><td>Quando o recurso solicitar, você deve dirigir</td><td colspan="2">Esses recursos de direção automatizados não exigem que você assume a direção</td></tr>
<tr><td colspan="2">Esses recursos podem conduzir o veículo sob condições limitadas e não funcionarão a menos que todas as condições exigidas sejam atendidas</td><td>Esses recursos podem conduzir o veículo sob todas as condições</td></tr>
</table>

Para Litman (2018), a operação dos veículos autônomos dentro dos níveis 4 e 5, pode trazer diversos benefícios, como: Redução do estresse, melhoria da produtividade, e melhoria da mobilidade. Além disso, segundo o autor, haverá também impactos no custo de operação. Estes veículos autônomos irão transformar a experiência da viagem, permitindo que os passageiros descansem ou sejam produtivos enquanto viajam. Veículos com este nível de automação, devem estar comercialmente disponíveis entre as décadas de 2030 e 2040. Segundo Trommer et al. (2016), até 2035, em países como Alemanha e EUA, os veículos autônomos representarão entre 11% e 42% da frota total.

2.3.1. OPERAÇÃO DE VEÍCULO DE BAIXA E MÉDIA CAPACIDADE

Os veículos autônomos podem fornecer mobilidade para aqueles que não são motoristas, incluindo pessoas com deficiências, adolescentes, pessoas de baixa renda, entre outros. Os indivíduos não-motoristas, que vivem em áreas afastadas dos grandes centros poderão vir a comprar veículos autônomos particulares. Já os não-motoristas, que vivem no meio urbano, poderão vir a usar táxis autônomos, porque este tipo de serviço de mobilidade provavelmente estará concentrado nas áreas centrais das cidades. Deste modo, os veículos autônomos poderão beneficiar diretamente os viajantes, melhorando até mesmo o acesso a oportunidades de educação e emprego, e aumentando a produtividade econômica da população (Litman 2018). Para Vosooghi et al. (2017) os veículos autônomos compartilhados, têm o potencial de absorver uma quantidade significativa do congestionamento gerado pelos veículos convencionais. Além disso, através da tecnologia que está associada ao serviço de mobilidade, que utiliza os veículos autônomos, poderá haver a previsão da demanda de viagens, e desta forma, proporcionar uma maior eficiência na logística destes serviços, como um número ótimo de veículos alocados num determinado lugar.

Em relação aos sistemas compartilhados, de acordo com Brownell e Kornhauser (2014), uma rede de taxis autônomos deve atender cinco critérios chaves de trânsito, sendo eles: 1) Reduzir congestionamentos; 2) Evitar acidentes de trânsito; 3) Ter baixo impacto ambiental; 4) Ser economicamente viável; 5) Oferecer conforto e comodidade aos passageiros. Desta forma, esta rede de taxis funcionaria com veículos totalmente autônomos, e a demanda seria responsiva, onde haveria operação apenas após a solicitação de algum passageiro.

Para a operação desta rede de taxis autônomos, há a possibilidade de utilizar dois modelos distintos: *Personal Rapid Transit* (PRT) e o *Smart Para-Transit* (SPT). No modelo PRT, há o estabelecimento de estações espalhadas pelas cidades, em uma rede de 800 m de distância entre estações. Assim sendo, neste modelo sempre haverá uma estação próxima da partida ou destino dos passageiros (Brownell e Kornhauser 2014).

No modelo SPT, a operação ocorre em uma grade de trânsito, onde o veículo pode se movimentar dentro da região de origem para pegar vários passageiros antes de viajar para a região de destino. Assim sendo, os veículos autônomos podem dirigir-se às portas dos passageiros e deixar esses passageiros na porta de seus destinos. No modelo SPT, um veículo autônomo pode pegar dois passageiros de até 4 Km de distância em seis minutos, assumindo uma velocidade média de 40 Km/h. A distância entre pontos na malha de trânsito é de 2,4 Km (Brownell e Kornhauser 2014).

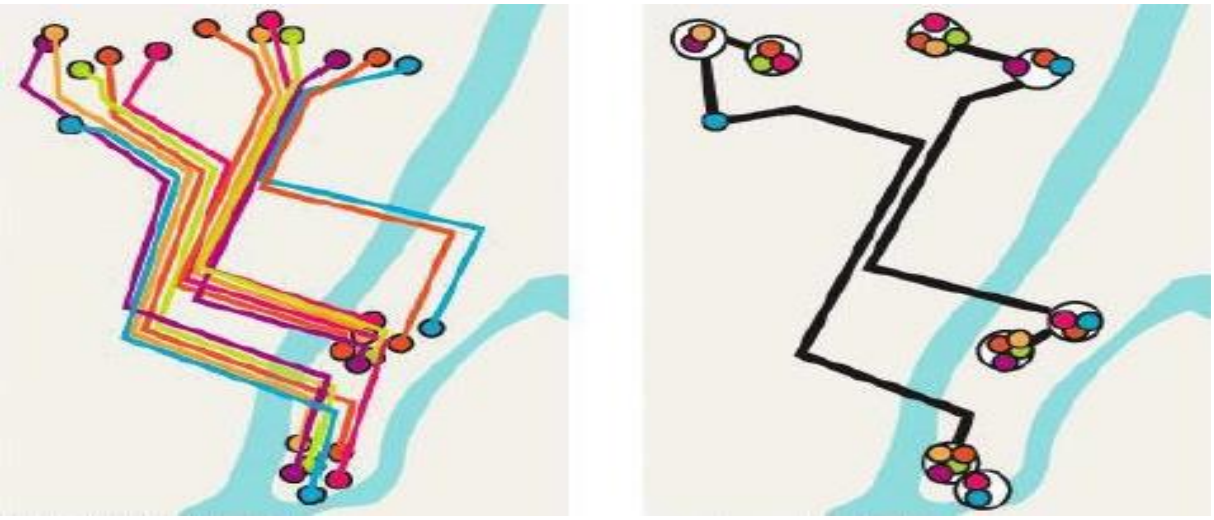

Figura 1 - Representação do sistema Smart Para-Transit (Brownell e Kornhauser 2014)

Martinez e Viegas (2017), apresentam também dois modelos de operação para veículos autônomos compartilhados. No primeiro caso, seria um taxi compartilhado, com capacidade para 6 passageiros, sendo que a operação seria similar ao modelo SPT, onde o cliente irá definir os pontos de origem e destino da viagem. No segundo caso, o sistema seria composto por ônibus-taxis, com um tipo de veículo com capacidade para 16 passageiros e outro para 8 passageiros, sendo que a operação seria similar ao sistema PRT, onde haveria uma estação a cada 600 metros de distância.

2.3.2. COEXISTÊNCIA NO ESPAÇO URBANO

Com o desenvolvimento das tecnologias que constituem os veículos autônomos, em alguns anos haverá nos ambientes urbanos a coexistência destes novos veículos, com os pedestres, ciclistas e veículos convencionais. Portanto, será fundamental que o desenvolvimento dos veículos autônomos gere relações harmoniosas nas relações da mobilidade urbana (USDOT 2018).

Além disso, a operação dos veículos autônomos, em coexistência com veículos convencionais, poderá impactar em uma redução nos níveis de congestionamentos e na ocupação das áreas de estacionamentos. Neste sentido, de acordo com Fagnant e Kockelman (2014) e ITF (2015), em cenários onde há a coexistência na operação de veículos não autônomos, com veículos autônomos compartilhados, os estudos mostram que cada veículo autônomo compartilhado poderia atender de 31 a 41 pessoas por dia, substituiria quase 12 veículos convencionais e levaria à eliminação de 11 vagas de estacionamento.

2.3.2.1. Relação com pedestres e bicicletas:

Os veículos usam uma quantidade considerável de espaço nas cidades, tanto quando estão em movimento, quanto quando estacionados. De acordo com ITF (2015) com a operação de veículos autônomos compartilhados, há um potencial grande para reduzir os espaços de estacionamento nas ruas. Neste sentido, ainda de acordo com ITF (2015), em algumas cidades, esta redução pode representar uma área equivalente a quase 20% da área da rua de uma cidade do porte de Lisboa, que corresponde à 1530000 m². Esse espaço liberado poderia ser dedicado a modos de transporte não motorizados, áreas de carga e descarga, parques ou outros usos recreativos e comerciais.

2.3.2.2. Relação com veículos não autônomos:

Em um futuro previsível, os veículos autônomos provavelmente serão incapazes de operar com chuva forte e neve, ou em estradas não pavimentadas. Além disso, serão relativamente lentos e não confiáveis no tráfego urbano misto (Litman 2018).

Entretanto, para Urmson et al. (2008), mesmo que a tecnologia dos veículos autônomos ainda não seja suficiente para enfrentar os desafios urbanos, como pedestres, semáforos, clima variado e tráfego denso, ela não está muito distante deste objetivo. Uma alternativa para promover a operação de veículos autônomos, seria a criação de zonas dedicadas de uso. De acordo com Conceição, Correia e Tavares (2017), a criação de uma rede urbana com ruas dedicadas a veículos autônomos poderá ser utilizada como uma opção para políticas futuras, com o objetivo de ajudar a reduzir os tempos de viagem em toda a rede.

2.4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E REGULAÇÃO

De acordo com a Política Nacional de Mobilidade Urbana no Brasil, os serviços de compartilhamento de viagens, denominados pela lei como "transporte público individual de passageiros", são de responsabilidade do poder público municipal. Desta forma, os municípios devem realizar o controle e regulação dos sistemas, com base nas exigências do Código de Trânsito Brasileiro (Costa et al. 2013). Desta forma, é o governo local o maior parceiro público das operadoras de mobilidade compartilhada (Shaheen, Cohen e Zohdy 2016).

Entretanto, segundo ITF (2015), novos serviços serão desenvolvidos sob essas condições, mas em muitos aspectos que englobam a operação dos veículos autônomos, ainda não está claro quem irá gerenciá-los e como eles serão monetizados. Neste sentido, o papel das autoridades, reguladoras e fiscais, será importante para orientar os desenvolvimentos ou potencialmente manter as barreiras do mercado.

2.4.1. SISTEMA DE OPERAÇÃO

Para a elaboração de estratégias de controle e regulação do sistema de operação dos veículos autônomos, é necessário avaliar tanto os aspectos internos dos veículos, no caso de veículos autônomos compartilhados, quanto aspectos urbanos, no caso de haver a necessidade de controlar o volume de tráfego destes veículos, por exemplo. Neste sentido, para os veículos autônomos compartilhados, de acordo com Litman (2018), será necessário que haja sistemas de monitoramento, para minimizar os custos de limpeza e vandalismo dos operadores dos sistemas de compartilhamento de viagens. Além disso, os táxis e ônibus autônomos deverão ter interiores reforçados, com poltronas de vinil e superfícies de aço inoxidável.

2.4.1.1. Zonas de restrição de uso

Em áreas de alto adensamento populacional pode ser interessante haver políticas de restrição de acesso de veículos. Segundo ITF (2015), uma das medidas de gerenciamento do espaço urbano, a fim de garantir benefícios da operação dos veículos autônomos, é a restrição do acesso de veículos em alguns espaço urbanos. Isso ocorre, pois, o planejamento da operação dos veículos autônomos deve ser pensado em termos de rede, tendo em conta que os custos mais baixos de operação dos veículos autônomos poderão estimular um aumento na demanda por viagens, agravando a mobilidade, principalmente das áreas centrais.

Outro aspecto importante em relação às zonas de restrição de uso é a segurança. No Brasil motoristas regulares de táxi há muito tempo precisam lidar com as ruas inseguras do país, mas se protegem aderindo a bairros mais seguros e declinando para áreas perigosas (Eisenhammer e Haynes 2017).

2.4.1.2. Sistema de avaliação de usuários

As cidades brasileiras possuem de modo geral um agravante relacionado à criminalidade. De acordo com a reportagem da Reuters, os índices de crimes ocorridos em viagens do aplicativo Uber no Brasil, tiveram um aumento significativo após o aplicativo começar aceitar pagamentos em dinheiro. Isso ocorreu, pois quando havia apenas a possibilidade de pagamentos em cartão de credito, a verificação e o rastreamento do usuário eram maiores. Portanto, o aplicativo começou a adotar três estratégias principais para aumentar a segurança das viagens no Brasil: Analisar o CPF dos usuários (similar ao número de segurança social); Bloquear novos usuários de dinheiro caso mostrem comportamentos estranhos, como cancelar várias corridas; e por fim, dar ao motorista a possibilidade de recusar os usuários que realizam pagamento em dinheiro (Eisenhammer e Haynes 2017).

Desta forma, o sistema deve ter mecanismos de controle e avaliação dos seus futuros usuários. Esse é um fator fundamental para que haja realmente a partilha das viagens, conforme mostra Litman (2018), que diz que os veículos autônomos compartilhados, com rotas flexíveis para pegar e deixar passageiros perto de seus destinos, irão criar um problema em relação a sensação de segurança dos passageiros, que poderão precisar dividir espaço com estranhos, sendo que, não haverá um motorista para garantir a segurança dos passageiros. Além disso, haverá uma redução na velocidade e na confiabilidade de viagem, uma vez que cada ponto de parada irá impor alguns minutos de atraso a outros passageiros, particularmente nas áreas periféricas, ou ainda em servidões.

2.4.2. CUSTO DE OPERAÇÃO:

Para a avaliação do custo de operação dos veículos autônomos, é necessário considerar que estes veículos exigirão equipamentos e serviços adicionais. Tais tecnologias podem acrescentar milhares de dólares aos preços de compra de veículos e centenas de dólares de taxas anuais (Litman 2018).

Neste mesmo sentido, Bösch et al. (2018), mostra que haverá um aumento de aproximadamente 20% no valor de aquisição do veículo em função dos efeitos da eletrificação e automação. No quesito de eletrificação do veículo, há um aumento do custo de manutenção de aproximadamente 28%, devido principalmente as baterias. Isso ocorre, pois ao longo da vida útil de um veículo elétrico, provavelmente será necessário trocar diversos componentes das baterias. Os impactos causados pela automação dos veículos são mais incertos. Contudo, segundo o autor, é possível estimar uma redução no valor do seguro, de cerca de 50%, em função da queda no número de acidentes, bem como nos valores relacionados à pneus e combustível, pela maior eficiência de condução.

Para Litman (2018), mesmo com a redução no valor do seguro anual em 50%, gerado pela automação, os custos adicionais irão aumentar em cerca de 80% o valor de um veículo autônomo eletrificado. Para a composição destes custos, o autor considera itens como: Sensores, controles automatizados, softwares, rede de conexão com a internet, sistemas de navegação, equipamentos de vigilância, serviços de limpeza e manutenção do interior do veículo.

Entretanto, na elaboração dos custos de operação por passageiro, por Km, Bösch et al. (2018) mostram que a automação de veículos altera drasticamente as estruturas de custos dos diferentes serviços. Mesmo com o aumento do preço dos veículos autônomos, há uma forte redução no custo operacional através de taxas de seguro mais baixas, custos de manutenção e combustível. Além disso, em relação as frotas de táxis autônomos, mesmo com o aumento expressivo do custo de limpeza e depreciação, a operação sem motorista reduz drasticamente o custo de operação.

Deste modo, para Keeney (2017), muitos dos primeiros modelos de carros autônomos provavelmente irão operar em plataformas de táxi autônomas, porque a viagem de táxi será muito mais econômica do que possuir um carro pessoal autônomo.

No quadro a seguir, é apresentado uma comparação entre os custos de operação dos veículos privados autônomos e convencionais, bem como, entre taxis autônomos e convencionais, através de uma estrutura de custos.

Quadro 3 - Comparação da estrutura de custos (Bösch et al. 2018)

	Veículo Privado Convencional	Veículo Privado Autônomo
	US$ / Pessoa / Km	US$ / Pessoa / Km
Custo de gestão da frota		
Salário		
Combustível	0,056 11,6%	0,051 10,0%
Limpeza	0,005 1,1%	0,005 1,0%
Estacionamento e Pedágio	0,068 13,9%	0,068 13,4%
Imposto	0,011 2,3%	0,011 2,2%
Seguro	0,044 9,1%	0,022 4,4%
Depreciação	0,203 41,9%	0,243 48,3%
Investimento	0,039 8,0%	0,046 9,2%
Manutenção	0,059 12,2%	0,058 11,4%
Total	**0,485 100%**	**0,504 100%**
	Táxi Individual Convencional	Táxi Individual Autônomo
	US$ / Pessoa / Km	US$ / Pessoa / Km
Custo de gestão da frota	0,083 3,0%	0,080 19,6%
Salário	2,409 88,3%	
Combustível	0,057 2,1%	0,051 12,5%
Limpeza	0,026 0,9%	0,117 28,8%
Estacionamento e Pedágio	0,033 1,2%	0,032 7,9%
Imposto	0,002 0,1%	0,002 0,6%
Seguro	0,008 0,3%	0,004 0,9%
Depreciação	0,061 2,2%	0,073 18,0%
Investimento	0,002 0,1%	0,002 0,5%
Manutenção	0,047 1,7%	0,046 11,3%
Total	**2,728 100%**	**0,407 100%**

Conforme apresentado no Quadro 3, no caso dos veículos privados, em função dos aumentos nos custos fixos, o custo de operação irá aumentar de US $ 0,48 por pessoa por km para US $ 0,50 por pessoa por km em função da automação. No caso dos taxis autônomos, as reduções nos custos variáveis e de mão-de-obra superam os aumentos nos custos fixos do veículo, havendo uma redução do custo de operação de US $ 2,73 por pessoa por km para US $ 0,41 por pessoa por km em função da automação. Dentro deste valor, estima-se que mais de metade dos custos operacionais das frotas de taxis autônomos serão custos de serviço e gestão. Isso ocorre, pois espera-se que os clientes de tais serviços mostrem um comportamento mais irresponsável no veículo (Bösch et al. 2018). Para Martinez e Viegas (2017), haverá uma redução proporcionalmente menor, onde as soluções de Táxi Compartilhado podem custar aproximadamente 55% menos por quilômetros, do que os serviços de táxi atuais.

Entretanto, vale destacar que os custos apresentados no Quadro 3, estão comparando veículos de propulsão não elétrica. Se considerarmos os custos de veículos com propulsão elétrica, há então, um custo de operação por pessoa por km de US $ 0,47 para os veículos privados autônomos, um custo por pessoa por km de US $ 0,39 para os taxis autônomos não compartilhados e por fim, um custo por pessoa por km de US $ 0,28 para os taxis autônomos compartilhados (Bösch et al. 2018).

Os valores apresentados no Quadro 3 mostram valores por pessoa por km. Entretanto, há também a possibilidade de analisar os valores de operações dos veículos apenas por km. Assim sendo, de acordo com Litman (2018) o custo de operação dos veículos autônomos, em uma década estará entre US $ 0,50 a US $ 0,74 por km, podendo ser reduzido para valores entre US $ 0,37 a US $ 0,62 por km, em três décadas. Para Spieser et al. (2014) o custo de operação dos veículos autônomos será de US $ 0,71 por km. Segundo Bösch et al. (2018), considerando veículos com propulsão elétrica, o custo de operação de veículos convencionais será de US $ 0,63 por km, dos autônomos privados será de US $ 0,67 por km, dos taxis autônomos não partilhados será de US $ 0,48 por km, e por fim, dos taxis autônomos partilhados será de US $ 0,58 por km.

2.4.3. SISTEMA DE COBRANÇA PELA OPERAÇÃO

O sistema de cobrança pela operação dos veículos autônomos poderá ser realizado de diferentes formas, como por exemplo, através de uma política de pedágios, cobrança por estacionamento ou mesmo pelo preço do serviço de transporte. De acordo com Ye e Wang (2018), tanto o design da rede quanto uma política de pedágio podem aliviar o congestionamento do tráfego. Desta forma, a otimização de preços de congestionamento pode alcançar melhores condições de tráfego. Para Chu, Wang e Hu (2017), além do preço do congestionamento é necessário haver um preço de estacionamento para um melhor gerenciamento do congestionamento.

Deste modo, conforme mostra Verhoef, Nijkamp e Rietveld (1995), as políticas regulatórias de estacionamento poderiam não apenas otimizar o congestionamento em uma rede rodoviária urbana, mas também otimizar a atividade de estacionamento em si. Entretanto, vale destacar que, de acordo com Litman (2018), se o estacionamento tem um preço, mas as estradas não, os veículos autônomos podem cruzar as ruas urbanas para evitar pagar pelo estacionamento, agravando o congestionamento.

Um aspecto que tem forte influência sobre as possível políticas de cobrança pela operação, é o fato de que os veículos autônomos permitem formas muito mais sutis de cobrança, levando em conta tempo, local, tipo de veículo, número de passageiros, níveis de tráfego e assim por diante, para maximizar o compartilhamento e minimizar o congestionamento (Economist 2018).

Todavia, seja o veículo autônomo ou não, os custos de construção e manutenção das vias para os automóveis são muito altos. Este valor é pago por toda a população, através dos impostos. Desta forma, a cobrança do pedágio urbano é uma ferramenta que deve ser utilizada para diminuir esta desigualdade econômica, bem como, redistribuir estes custos de forma mais justa, entre apenas os usuários dos automóveis. A lei 12.587/12, afirma que "tal receita deve ser aplicada exclusivamente no subsídio das tarifas e nas infraestruturas dos modos não motorizados e do transporte público coletivo" (Costa et al. 2013).

Para Fagnant e Kockelman (2015), deve haver a implementação de pedágios e outras políticas de gerenciamento de tráfego, para conter a demanda excessiva por viagens, que será gerada pela operação dos veículos autônomos.

Além do tempo de viagem, confiabilidade e conforto, o preço é o atributo chave de um serviço de transporte. Em vários casos, as políticas elaboradas para resolver o problema dos congestionamentos, procuram reduzir o volume de viagens aumentando o custo (Mokhtarian e Salomon 2001).

De acordo com Bösch et al. (2018), o preço de operação por passageiro por quilômetro, na operação de veículos autônomos compartilhados, poderia ser fixado em US $ 0,24 por passageiro por Km, com uma taxa de ocupação máxima. Para Trommer et al. (2016) a operação de veículos autônomos compartilhados deveria operar com lucro de US $ 0,34 a US $ 0,39 por km.

2.4.4. ATUAÇÃO DO PODER PÚBLICO NA LEGISLAÇÃO E FISCALIZAÇÃO:

Sem uma estrutura de certificação consistente e um conjunto padronizado de segurança para aceitação, os fabricantes de veículos autônomos podem enfrentar diversas incertezas regulatórias. Um dos conteúdos legislativos mais detalhado atualmente é o da Califórnia – EUA, que fornece requisitos concretos para a operação dos veículos autônomos. O SB 1298 estabelece requisitos específicos para testes veiculares autônomos em vias públicas, licenciamento de operador, entre outros (Fagnant e Kockelman 2015).

A Convenção de Viena sobre Tráfego Rodoviário, VC, e o regulamento da ONU, UNECE Nº 79, são considerados como os dois documentos legislativos primários que dizem respeito à condução autônoma. Neste sentido, a atualização do VC 2016 permite que um carro dirija sozinho, desde que o sistema possa ser substituído pelo motorista ou o carro esteja em conformidade com os regulamentos do veículo da ONU. O próximo passo é uma nova alteração do VC que permitirá o uso de carros totalmente sem motoristas, ou seja, veículos autônomos de nível 5 (Trommer et al. 2016).

Em 2015, o governo alemão publicou uma estratégia nacional sobre direção autônoma e conectada. De acordo com a estratégia, a Alemanha pretende tornar-se o principal fornecedor e também liderar o mercado de veículos autônomos. Para atingir esses objetivos, os próximos passos estão planejados em cinco campos de ação: infraestrutura, legislação, inovação, segurança cibernética e política de privacidade de dados (Trommer et al. 2016; Bundesregierung 2015).

No caso Norte Americano, o Governo Federal é responsável por regulamentar o desempenho de segurança de veículos e equipamentos de veículos, bem como sua operação comercial na escala interestadual, enquanto Estados e governos locais desempenham o papel principal no licenciamento de motoristas, estabelecendo regras de operação nas estradas e formulando políticas de responsabilidades (USDOT 2018).

O governo chinês anunciou em 2016 sua iniciativa para melhorar as regulamentações e estabelecer um ambiente de testes para apoiar o desenvolvimento de tecnologias autônomas. Este é o primeiro roteiro preliminar chinês, consistindo de padrões unificados e diretrizes regulatórias que permitirão veículos autônomos em rodovias dentro de cinco anos e permitirão veículos autônomos para a condução urbana até 2025. O roteiro também propõem padrões técnicos para os veículos autônomos que inclui uma linguagem comum para comunicação (Trommer et al. 2016). No contexto global, de acordo com Trommer et al. (2016), para que haja o desenvolvimento dos veículos autônomos, superar os desafios regulatórios e legais é tão importante quanto superar os desafios tecnológicos. Neste sentido, os primeiros passos a serem dados pelos órgãos reguladores para preparar o caminho para os veículos autônomos são o desenvolvimento de uma estrutura legal para permitir testes, seguida pela operação real dos veículos autônomos em vias públicas. Portanto, é papel do governo garantir que os veículos autônomos possam ser integrados de forma segura e eficaz ao sistema de transporte existente, juntamente com veículos convencionais, pedestres, ciclistas, motociclistas e outros usuários do espaço público. Para atingir esses objetivos, o poder público deve trabalhar de perto com as partes interessadas para realizar as seguintes atividades (USDOT 2018):

- Estabelecer padrões e orientações voltados para o desempenho, com base em consenso público, para segurança, mobilidade e operações de veículos e infraestrutura.
- Regular as entidades que fornecem serviços de mobilidade automatizada.
- Realizar pesquisas direcionadas para apoiar a integração segura da automação.
- Avaliar elementos de infraestrutura, tais como marcações de estradas e sinalização, para que eles sejam conducentes à operação de veículos autônomos.
- Identificar e remover barreiras regulatórias para a integração segura de veículos autônomos.
- Avaliar os impactos da tecnologia na segurança, nas condições e no desempenho da infraestrutura, na mobilidade e na competitividade econômica.
- Prover o licenciamento dos veículos e fazer cumprir as leis de trânsito.
- Garantir consistência nacional para viagens interestaduais.
- Realizar inspeções de segurança e regular o seguro e responsabilidade de veículos autônomos.
- Educar o público sobre as capacidades e limitações dos veículos autônomos.

Além disso, para garantir a segurança da operação dos veículos autônomos, não basta apenas a validação da tecnologia, como hardware, software e componentes, mas também dependerá de regras operacionais apropriadas, condições da estrada e protocolos de resposta a emergências.

Neste sentido, existem algumas questões legislativas que devem ser abordados pelo poder público para ajudar no desenvolvimento da tecnologia dos veículos autônomos no Brasil (USDOT 2018; Keeney 2017; Trommer et al. 2016).

2.4.4.1. Estabelecer uma legislação clara e padronizada

Diferentes usos e interpretações da terminologia em relação a veículos autônomos podem ser confusos para o público, agências estaduais e locais, bem como, para a indústria. Portanto, deve haver uma legislação consistente, desenvolvida por meio de padrões técnicos e baseada em um debate público (USDOT 2018; Trommer et al. 2016).

2.4.4.2. Prover a conectividade digital da infraestrutura

A conectividade permite a comunicação entre veículos, a infraestrutura e outros usuários da estrada. A comunicação entre veículos e com o ambiente circundante é uma importante tecnologia complementar que deve aumentar os benefícios da automação em todos os níveis. Para isso, deve haver um esforço entre as esferas de poder público federal, estadual e municipal, juntamente com o setor privado, para desenvolver e implantar uma infraestrutura de comunicações entre veículos e com o ambiente circundante em corredores estratégicos (USDOT 2018).

2.4.4.3. Avaliar a necessidade de adequar a infraestrutura existente

Os desenvolvedores estão projetando os veículos autônomos com a suposição de que essa tecnologia precisará funcionar com a infraestrutura existente. Neste sentido, existe um consenso geral de que uma maior uniformidade e qualidade das marcações rodoviárias, sinalização e condição do pavimento seriam benéficas tanto para os motoristas humanos quanto para os veículos autônomos. Portanto, o poder público precisa avaliar a prontidão das rodovias, com o intuito de garantir as condições necessárias para a operação dos veículos autônomos (USDOT 2018).

2.4.4.4. Incentivar o desenvolvimento de tecnologias de automação

O poder público necessita apoiar e incentivar o teste e o desenvolvimento de tecnologias de automação em todo o país com o mínimo de barreiras necessárias. Isso é importante, pois, os testes nas vias públicas oferecem uma oportunidade para avaliar a infraestrutura da rodovia, os elementos operacionais, a aceitação do usuário, os padrões de viagens e muito mais. Em países como os Estados Unidos, Alemanha e China os desenvolvedores de veículos autônomos já estão testando tecnologias em pistas de teste (Trommer et al. 2016).

2.4.4.5. Regular os provedores de serviços

Os sistemas de veículos autônomos compartilhados, também denominados como táxis autônomos, terão operadores terceirizados que controlarão o sistema. Estes provedores de serviços de táxi autônomos provavelmente controlarão os dados geográficos porque usarão suas frotas para coletar os dados necessários para criar mapas para a operação dos veículos e desenvolver seus sistemas. Portanto, sem uma regulação adequada, esse reservatório de dados poderá fornecer barreiras à entrada de provedores de serviços concorrentes (Keeney 2017).

2.4.4.6. Garantir a segurança cibernética

Os sistemas de transporte são cada vez mais complexos e confiáveis através da conectividade para comunicação e troca de dados. Entretanto, é necessário saber como lidar com vulnerabilidades cibernéticas e gerenciar riscos cibernéticos relacionados à tecnologia e dados de automação. Portanto, no caso de um incidente cibernético significativo, o sistema de transporte de superfície requer coordenação entre todos os níveis do governo e do setor privado para permitir o conhecimento da situação e uma abordagem unificada (USDOT 2018).

2.4.4.7. Garantir a privacidade dos usuários

Embora as tecnologias de segurança avançadas tenham o potencial de fornecer enorme segurança, conveniência e outros benefícios importantes para os consumidores, as partes interessadas frequentemente levantam preocupações quanto à privacidade de dados como um impedimento potencial à implantação. Neste sentido, as trocas de dados que ocorrem em um sistema de veículos autônomos precisam respeitar a privacidade do consumidor e informações de negócios privados (USDOT 2018).

2.4.4.8. Prever a responsabilização por eventuais acidentes

Em situações de acidentes inevitáveis, os veículos autônomos precisarão decidir como dividir o risco de dano entre as diferentes partes interessadas na estrada. Assim sendo, com o avanço desta tecnologia, existe então a necessidade de haver normas e leis que tratem destes dilemas (Awad et al. 2018; Bonnefon, Shariff e Rahwan 2016).

Neste sentido, no ano de 2016, o Ministério Federal Alemão dos Transportes e Infraestrutura Digital, criou o comitê nacional de ética para direção automatizada e conectada, que trabalhou na elaboração de um código, conforme Quadro 4, formado por 20 diretrizes éticas, com o intuito prever a responsabilização por eventuais acidentes (Luetge 2017).

Quadro 4 - Código de ética dos veículos autônomos (BMVI 2017)

Introdução
01 - Os principais objetivos dos sistemas de transporte parcial e totalmente automatizados são: Melhorar a segurança para todos os usuários e aumentar as oportunidades de mobilidade. Os indivíduos gozam de liberdade de ação pela qual eles mesmos são responsáveis.
Benefícios Éticos Gerais da Condução Automatizada
02 - A proteção dos indivíduos tem precedência sobre todas as outras diretrizes. Assim sendo, o licenciamento de sistemas automatizados não é justificável, a menos que se produza uma diminuição do dano em comparação com a condução humana.
03 - O setor público é responsável por garantir a segurança dos sistemas automatizados e conectados introduzidos e licenciados no ambiente urbano. O princípio orientador é evitar os acidentes, embora os riscos residuais tecnologicamente inevitáveis não contrariem a introdução da condução automatizada se o balanço de riscos for fundamentalmente positivo.
04 - A responsabilidade pessoal dos indivíduos por tomar decisões é uma expressão de uma sociedade centrada em seres humanos individuais, com seu direito ao desenvolvimento pessoal e sua necessidade de proteção.
Situações inevitáveis do dilema
05 - A tecnologia automatizada e conectada deve evitar acidentes sempre que isso for possível. A melhoria significativa da segurança no trânsito é o objetivo do desenvolvimento e da regulamentação, começando com o projeto e a programação dos veículos de tal forma que eles conduzam de maneira defensiva e antecipatória, representando o menor risco possível para os usuários vulneráveis da estrada.
06 - A introdução de sistemas de condução altamente automatizados, especialmente com a opção de prevenção de colisão automatizada, pode ser social e eticamente exigida se puder liberar o potencial existente para limitação de danos. Por outro lado, uma obrigação legalmente imposta de usar sistemas de transporte totalmente automatizados ou a causa da inescapabilidade prática é eticamente questionável.
07 - Em situações perigosas que se revelem inevitáveis, apesar de todas as precauções tecnológicas adotadas, a proteção da vida humana tem prioridade máxima. Assim, dentro das restrições do que é tecnologicamente viável, os sistemas devem ser programados para aceitar danos a animais ou propriedades em um conflito, se isso significar que danos pessoais possam ser evitados.
08 - A decisão entre uma vida humana e outra, dependem da situação específica real. Sistemas tecnológicos devem ser projetados para evitar acidentes, no entanto, eles não podem ser padronizados para uma avaliação complexa ou intuitiva dos impactos de um acidente. Tais julgamentos legais, feitos em retrospecto e considerando circunstâncias especiais, não podem ser prontamente transformados em atividades de programação correspondentes. Por esta razão, talvez mais do que qualquer outra, seria desejável que uma agência independente do setor público sistematicamente processar as lições aprendidas.
09 - Em situações de acidentes inevitáveis, qualquer distinção baseada em características pessoais (idade, sexo, constituição física ou mental) é proibida. Também é proibido compensar as vítimas umas contra as outras. A programação geral para reduzir o número de ferimentos pessoais pode ser justificável. As partes envolvidas na geração de riscos de mobilidade não devem sacrificar as partes não envolvidas.
Quem é responsável?
10 - No caso de sistemas de direção automatizados e conectados, a prestação de contas desloca-se do motorista para os fabricantes, operadores dos sistemas tecnológicos e órgãos responsáveis. Os regimes de responsabilidade estatutária e sua adequação às decisões cotidianas tomadas pelos tribunais devem refletir suficientemente essa transição.

11 - A responsabilidade por danos causados por sistemas de acionamento automatizados ativados é regida pelos mesmos princípios que em outras responsabilidades do produto. Daí resulta que os fabricantes ou operadores são obrigados a otimizar continuamente os seus sistemas e a observar os sistemas que já forneceram e a melhorá-los quando isso for tecnologicamente possível e razoável.
Informação pública
12 - O público tem o direito de ser informado sobre novas tecnologias e sua implantação. Para a implementação prática dos princípios aqui desenvolvidos, a orientação para a implantação e programação de veículos autônomos deve ser derivada de uma forma que seja tão transparente quanto possível, comunicada em público e revista por um órgão independente profissionalmente adequado.
Condução Conectada: Segurança e Proteção
13 - A conectividade completa e o controle central de todos os automóveis, no contexto de uma infraestrutura de transporte digital são eticamente questionáveis se, e na medida em que, não for possível excluir com segurança a vigilância total dos utentes da estrada e a manipulação do controle do veículo.
14 - A condução automatizada só é justificável na medida em que os ataques concebíveis, em particular a manipulação do sistema de TI ou os pontos fracos do sistema inato, não resultam em danos, tais como a destruição duradoura da confiança das pessoas no transporte rodoviário.
Proteção de Dados
15 - São os guardiões e os usuários do veículo que decidem se os dados do veículo que são gerados devem ser encaminhados e usados.
Interface Humano-máquina
16 - Deve ser possível distinguir claramente se um sistema sem motorista está sendo usado ou se um motorista mantém a responsabilidade com a opção de anular o sistema. No caso de sistemas sem motoristas, a interface humano-máquina deve ser projetada de tal forma que, a qualquer momento, seja claramente regulada e aparente de que lado está a responsabilidade pelo controle. A distribuição de responsabilidades deve ser documentada e armazenada.
17 - O software e a tecnologia em veículos altamente automatizados devem ser projetados de tal forma que a necessidade de uma transferência abrupta de controle para o motorista seja evitada.
Sistemas de Aprendizagem
18 - Os sistemas de autoaprendizagem na operação de veículos e sua conexão com bancos de dados de cenários centrais podem ser eticamente permitidos se gerarem ganhos de segurança. Parece aconselhável entregar cenários relevantes a um catálogo de cenário central em um corpo neutro, a fim de desenvolver padrões universais apropriados, incluindo quaisquer testes de aceitação.
19 - Em emergências, o veículo deve, de forma autônoma, isto é, sem assistência humana, entrar em uma condição de segurança. A harmonização de uma condição de segurança é desejável.
20 - O uso adequado de sistemas automatizados deve fazer parte da educação digital geral das pessoas. O manuseio adequado de sistemas de condução automatizados deve ser ensinado de maneira apropriada durante a condução de aulas e testado.

Contudo, mesmo que os especialistas concordem em como veículos autônomos devam resolver dilemas morais, seu trabalho será inútil se os cidadãos discordarem da solução adotada. Qualquer tentativa de conceber a ética da inteligência artificial deve ser, pelo menos, consciente da moralidade pública. Assim sendo, há um projeto, denominado por *Moral Machine*, que mostra como os cidadãos gostariam que veículos autônomos resolvessem dilemas morais no contexto de acidentes inevitáveis. Através deste projeto foi identificado três preferências fortes que podem servir como blocos de construção para discussões sobre a ética universal da máquina: A preferência por poupar vidas humanas, a preferência por poupar mais vidas e a preferência por poupar vidas jovens (Awad et al. 2018).

Neste sentido, segundo BMVI (2017), da diretriz 5 até a diretriz 9 já são previstas situações de acidentes inevitáveis. Nas diretrizes 3, 10 e 11 já fica previsto a responsabilização, que será dos fabricantes, operadores dos sistemas tecnológicos e do poder público.

2.5. IMPACTOS URBANOS DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS

2.5.1. MOBILIDADE

Segundo Martinez e Viegas (2017) o táxi autônomo compartilhado será a principal forma de modalidade urbana. Neste cenário, o sistema poderá funcionar de forma integrada com os demais sistemas de transporte público, aumentando sua eficiência, principalmente durante o período de pico.

Entretanto, de acordo com Ye e Wang (2018), será necessário aplicar estratégias para controlar os impactos urbanos causados pelos veículos autônomos. Neste sentido, o preço de congestionamento é eficaz quando a penetração no mercado de veículos autônomos é baixa. Já para situações onde há uma penetração alta de veículos autônomos é necessário pensar em estratégias complementares ao pedágio. Como tal, deve haver estratégias diferentes para diferentes taxas de penetrações de veículos autônomos.

Além disso, existem outros aspectos dos veículos autônomos que podem impactar na mobilidade, como é o caso do tamanho dos veículos. De acordo com Litman (2018), os veículos autônomos poderão aumentar de tamanho, se utilizados como escritórios móveis, por exemplo, impactando de forma negativa na mobilidade urbana. Entretanto, alguns tipos de veículos de entrega poderão ter o tamanho reduzido. Segundo Melo, Baptista e Costa (2014), os veículos de pequeno porte poderão ser utilizados para transportar mercadorias, principalmente em pequenas distancias, o que poderia impactar de forma positiva na mobilidade urbana, principalmente em áreas centrais.

2.5.1.1. Impacto na frota de veículos

De acordo com Martinez e Viegas (2017), com um estudo feito em Lisboa, chegou-se à conclusão que através da implementação de um sistema de táxis autônomos compartilhados, a frota necessária para produzir a mesma mobilidade da atualidade, apresenta uma redução impressionante de 97%. Para Burghout, Rigole e Andréasson (2015), através de um sistema de Táxis autônomos compartilhados, haverá uma redução de 95% da frota de veículos. Segundo Brownell e Kornhauser (2014) a redução do tamanho da frota de veículos, em um modelo de PRT (sistema operado em linhas com estações fixas) seria entre 42% e 69%. Para um modelo SPT (sistema operado porta a porta), a redução da frota seria entre 63% e 79%. Shaheen, Cohen e Zohdy (2016), mostram que mesmo considerando a operação dos veículos convencionais, o compartilhamento de viagens pode causar uma redução, entre 4,6 a 20 veículos pessoais por veículo de compartilhamento. Desta forma, a redução da posse de veículos, é um dos maiores impactos causados pelo compartilhamento de viagens em veículos autônomos.

2.5.1.2. Impacto nos sistemas de transportes públicos

De acordo com Shaheen e Galczynski (2014), a operação de veículos autônomos compartilhados poderá ser realizada em conjunto com a operação dos demais sistemas de transporte públicos, fornecendo a conectividade do primeiro e último quilômetro.

Entretanto, para Litman (2018), os benefícios de veículos autônomos podem fazer com que algumas comunidades reduzam o apoio à serviços de transporte público, o que pode reduzir as opções de mobilidade.

De acordo com ITF (2015), para cidades pequenas e médias, é concebível que uma frota compartilhada de veículos autônomos possa eliminar completamente a necessidade de transporte público tradicional. Isso ocorre, pois, as frotas de veículos autônomos compartilhados podem efetivamente tornar-se uma nova forma de transporte público de baixa capacidade e alta qualidade.

Esta tendência é afirmada pelo trabalho de Costa e Fernandes (2012), demostrando que quando um novo sistema de transporte urbano oferece um serviço mais eficiente, confiável e barato, se comparado aos sistemas de transportes anteriores, há grande probabilidade deste novo sistema ter sucesso e substituir as opções anteriores.

2.5.1.3. Impacto no volume de viagens

Para Litman (2018), se não houver compartilhamento na operação dos veículos autônomos, esta tecnologia provavelmente aumentará o congestionamento em áreas urbanas, pois há um aumento estimado entre 10% à 14% no número de viagens. Segundo Sivak e Schoettle (2015) a operação dos veículos autônomos particulares, têm o potencial de aumentar a quantidade de viagens realizadas por jovens adultos, aqueles entre 18 e 39 anos, em cerca de 11%. De acordo com Trommer et al. (2016), em 2035 poderá haver um aumento entre 3% a 9%, no número de viagens, em função da operação dos veículos autônomos, em um cenário onde apenas 10% do total das viagens são realizadas por veículos autônomos compartilhados.

Desta forma, fica evidente que os serviços de compartilhamento de viagens são importantes para reduzir os índices de congestionamento, uma vez que a operação dos veículos autônomos, seja compartilhado ou não, provavelmente aumentará o número de viagens. O estudo de Fagnant e Kockelman (2014) chega nesta conclusão, mostrando que a operação de veículos autônomos compartilhados poderá aumentar em 11% o número de viagens, mas ao mesmo tempo, irão impactar em uma redução de 10 veículos particulares, para cada veículo autônomo em operação.

Da mesma forma, Spieser et al. (2014) mostram que através de um sistema de veículos autônomos, operando no compartilhamento de viagens sob demanda, será possível reduzir a frota de veículos em um terço do número atual.

2.5.1.4. Impacto no congestionamento

Segundo Fagnant e Kockelman (2015), com 50% da frota de veículos operando de forma autônoma, poderá haver uma redução de 39% nos congestionamento, apenas em função dos sistemas de fluxo suavizado (tecnologia que permite uma travagem mais suave e ajustes de velocidade precisos, evitando a propagação de ondas de choque desestabilizadoras do tráfego). Além disso, mesmo com o aumento do número de viagens, pode haver uma redução adicional de 4,5%, através das melhorias na prevenção de acidentes. Com 90% da frota de veículos operando de forma autônoma, poderá haver uma redução de 60% nos congestionamentos. Entretanto, para Vosooghi et al. (2017), as estimativa da demanda dos sistemas de veículos autônomos, na literatura de hoje, permanecem muito limitadas, havendo a necessidade de analisar os impactos em relação ao contexto de cada cidade.

2.5.1.5. Impacto do valor do tempo de viagem

De acordo com Trommer et al. (2016) a condução autônoma poderia alterar os custos generalizados de dirigir, os custos de tempo e os custos monetários e, portanto, também poderia alterar os padrões de mobilidade dos usuários de transporte. No entanto, muitas das mudanças mais consideráveis nessa área estão sujeitas a certo grau de incerteza. A avaliação do tempo de viagem deve ser entendida como uma avaliação da economia de tempo de viagem e expressa a disposição de pagar pelas reduções do tempo de viagem.

Neste sentido, a disponibilidade para o uso do tempo dentro do veículo é consideravelmente maior para um veículo autônomo, em comparação com um veículo convencional. Como consequência, o valor do tempo de viagem em um veículo autônomo é consideravelmente maior, em comparação com um veículo convencional. Portanto, há vantagens teóricas para usar o tempo de viagem de forma mais eficiente em um veículo autônomo. Desta forma, para um veículo autônomo, a disposição de pagar pelas reduções do tempo de viagem de 10 minutos, gera uma economia de tempo de viagem bastante alta, (€ 2.25- € 2.35) comparando com a disposição de pagar pelas reduções do tempo de viagem de veículos convencionais (€ 1.80- € 1.90) (Yap, Correia e Van Arem 2015).

2.5.1.6. Impacto social através da mobilidade

O compartilhamento de viagens fornece aos consumidores maior mobilidade a um custo reduzido. Desta forma operação dos veículos autônomos pode ter fortes impactos sociais, através de um maior acesso a mobilidade, para estudantes universitários, idosos, famílias de baixa renda, e até mesmo, menores de idade (Shaheen, Cohen e Zohdy 2016).

De acordo com Martinez e Viegas (2017) com a implementação do veículos autônomos, haverá uma melhoria muito grande no acesso a empregos. Essa mudança melhoraria amplamente a igualdade de acesso e forneceria níveis semelhantes de acesso a todos. De acordo com Fagnant e Kockelman (2015) os veículos autônomos podem proporcionar mobilidade para aqueles que são jovens demais para dirigir, idosos e deficientes.

Entretanto, de acordo com Gruel e Stanford (2016), este aumento na atratividade de viajar de carro, gera como consequência, um incentivo à expansão da infraestrutura rodoviária, sendo que o transporte público se tornaria cada vez menos adequado. Portanto, neste cenário, os veículos autônomos não compartilhados, não contribuirão para um sistema de mobilidade mais sustentável, mas provavelmente colocarão pressão adicional nos sistemas de tráfego que, em muitas áreas, já estão em seus limites.

2.5.2. SEGURANÇA RODOVIÁRIA

Os veículos autônomos permitirão que todos os ocupantes descansem, leiam, trabalhem e assistam à televisão, mas por segurança, os ocupantes deverão usar cinto de segurança (Litman 2018).

Entretanto, as perspectivas em relação a segurança de operação são animadoras, pois atualmente, mais de 40% dos acidentes fatais envolvem alguma combinação de álcool, distração, drogas e fadiga. Além disso, o erro humano é a principal razão por trás de mais de 90% de todos os acidentes. Desta forma, algumas previsões apontam para uma redução de 99% dos acidentes, em situações onde a frota de veículos é totalmente autônoma (Fagnant e Kockelman 2015). Outras previsões apontam para uma redução de 90% do número de acidentes, com uma economia estimada em US $ 190 bilhões em gastos com danos (Bonnefon, Shariff e Rahwan 2016).

Além disso, a tecnologia dos veículos autônomos tem o potencial de impactar positivamente na gestão da velocidade de operação. De acordo com Obelheiro et al. (2016), uma das alternativas para melhorar a segurança de pedestres e ciclistas, é a redução da velocidade dos veículos. Neste sentido, o risco de mortalidade para os pedestres, quando os veículos podem operar a 50 km/h, é o dobro em relação a uma velocidade de operação de 40km/h. Já para a operação em 30 km/h, o risco de mortalidade é 5 vezes menor se comparado a operação em 40km/h.

Todavia, projetar um sistema que possa funcionar com segurança em quase todas as situações é um desafio. O reconhecimento de seres humanos e outros objetos na estrada é crítico e mais difícil para os veículos autônomos do que para os condutores humanos. Além disso, o mau tempo, como neblina e neve, e as superfícies reflexivas da chuva e do gelo criam outros desafios para os sensores e as operações de direção (Fagnant e Kockelman 2015).

2.5.3. INFRAESTRUTURA URBANA

2.5.3.1 Impacto no espaço urbano

Com o gradativo aumento dos veículos autônomos, haverá a necessidade de repensar os espaços destinados para vagas de estacionamentos. A Política Nacional de Mobilidade Urbana aborta a necessidade de colocar a questão do estacionamento, dentro do planejamento da gestão de mobilidade. Neste sentido, por exemplo, a boa gestão da oferta de estacionamentos pode evitar ou diminuir a circulação de veículos em áreas congestionadas (Costa et al. 2013).

Com a plena operação dos táxis autônomos, poderá haver a redução da demanda por estacionamento em cerca de 90%. No entanto, o estacionamento reduzido pode aumentar o número de deslocamentos por viagem (Litman 2018). De acordo com Burghout, Rigole e Andréasson (2015), através da operação dos táxis autônomos, poderá haver a redução da demanda por estacionamento em cerca de 96%. Para Martinez e Viegas (2017) através da implementa de um sistema de táxis autônomos compartilhados haverá a liberação total do espaço de estacionamento na rua, bem como, uma redução significativa dos espaços de estacionamento privados.

Segundo Fagnant e Kockelman (2015), haverá uma grande mudança nos padrões de estacionamento, mas não a extinção das vagas. Para os autores, haverá uma relocação das vagas, das áreas centras para as regiões periféricas, em função de uma economia do custo de uma vaga (terra, construção, manutenção e operação), que pode chegar a uma redução de 27% a 88% do valor. Além disso, os veículos irão provavelmente, se comunicar com a infraestrutura de estacionamento. Segundo ITF (2015), as frotas de veículos autônomos compartilhadas liberam uma quantidade significativa de espaço na rua. No entanto, é necessário que esse espaço seja gerenciado a fim de garantir benefícios urbanos em seu novo uso. De acordo com Litman (2018), os veículos autônomos compartilhados reduzem a demanda de estacionamento, mas aumentam a necessidade de opções convenientes de carga e descarga de passageiros, o que exige um melhor gerenciamento do espaço urbano. Desta forma, as estratégias de gerenciamento deste espaço poderiam incluir usos comerciais ou recreativos, áreas de carga e descarga de passageiros, ciclovias e ampliação das calçadas.

2.5.3.2 Impacto nas tecnologias de informação e comunicação

De acordo com Meijer e Bolívar (2015), a integração entre governança urbana e Tecnologias de Informação e Comunicação, que também pode ser denominada de *E-government*, é necessária para desenvolver abordagens que possam tornar as cidades mais “inteligentes” face aos novos desafios.

Para isso, é necessário coletar e processar os dados gerados no território urbano. Neste sentido, dados de maior qualidade tendem a gerar ações mais significativas e melhor compreensão dos processos que ocorrem na cidade (Kitchin 2013). Segundo Zheng et al. (2014), a grande variedade de dados gerados no espaço urbano é uma poderosa informação que pode ajudar a enfrentar os desafios urbanos quando analisados e usados corretamente.

A fonte dos dados urbanos pode ser dividida em três categorias: Direcionadas, automatizadas e voluntárias, sendo que os dados automatizados possuem maior relevância para a governança urbana. Este tipo de dados é gerado como uma função inerente e automática do dispositivo ou sistema. Existem diversos meios pelos quais dados automatizados são produzidos.

Entretanto, é possível destacar os dados gerados por sensores e atuadores incorporados em objetos ou ambientes, que comunicam regularmente suas medições, como os presentes em veículos autônomos, por exemplo (Kitchin 2013; Zheng et al. 2014). De acordo com Obelheiro et al. (2016), os dados podem ajudar fortemente as cidades, permitindo analisar as informações para vários fins, como por exemplo, criar metas de políticas públicas.

Segundo Zheng et al. (2014), os dados gerados pelos veículos podem ajudar na gestão de diversos aspectos, como congestionamento, pedágios e estacionamentos. Por exemplo, os dados gerados pelos veículos, em relação ao estacionamento podem incluir o tempo de permanência do veículo, a tarifa paga e a demanda por vagas em determinada região.

2.6. REFLEXÃO CRÍTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos Capítulos 1 e 2, houve a avaliação dos tipos de operação de veículos autônomos, das estratégias de controle e regulação e dos impactos urbanos. Com isso, pretende-se entender o atual cenário, físico e jurídico, através da tecnologia projetada para os próximos anos. Esta avaliação ocorre por meio de conceitos teóricos, apresentados na bibliografia cientifica utilizada neste trabalho. Deste modo, através da análise da operação dos veículos autônomos surgem alguns aspectos relevantes, que serão incorporadas aos próximos capítulos, principalmente dentro da esfera do planejamento urbano.

2.6.1 OS IMPACTOS URBANOS

De acordo com a Política Nacional de Mobilidade Urbana no Brasil, os serviços de compartilhamento de viagens, são de responsabilidade do poder público municipal. Desta forma, os municípios devem realizar o controle e regulação dos sistemas, com base nas exigências do Código de Trânsito Brasileiro.

Através da revisão bibliográfica, fica evidente que para mitigar o congestionamento do tráfego nas cidades, o poder público pode trabalhar com a regulação dos estacionamentos e com o preço do congestionamento. Além disso, há ainda a influência da tecnologia dos veículos autônomos. Portanto, a política de pedágios urbanos e a gestão do estacionamento, associados a operação de veículos autônomos, podem contribuir para melhores condições de tráfego.

Neste sentido, os veículos autônomos permitem formas muito mais sutis de cobrança, levando em conta, por exemplo o tipo de veículo, número de passageiros, níveis de tráfego e assim por diante, para maximizar o compartilhamento e minimizar o congestionamento. Segundo a lei 12.587/12, a receita arrecada no pedágio urbano deve ser aplicada pelo poder público municipal exclusivamente na infraestrutura dos modos não motorizados e do transporte público. Entretanto, além da regulação do preço, é necessário avaliar o impacto do compartilhamento de viagens para compreender a operação dos veículos autônomos. Isso ocorre, pois, segundo a análise de alguns autores apresentados neste capítulo, as vantagens dos veículos autônomos para os sistemas de compartilhamento de viagens poderão justificar, de forma financeira, a substituição do veículo convencional privado por esse tipo de serviço.

Outro possível impacto dos veículos autônomos compartilhados em cidades pequenas e médias, como é o caso da cidade de Florianópolis, é a possibilidade da eliminação completa da necessidade do sistema de transporte público tradicional. Isso ocorre, pois, as frotas de veículos autônomos compartilhados podem efetivamente tornar-se uma nova forma de transporte público de baixa capacidade e alta qualidade. Além disso, os veículos autônomos compartilhados fornecem aos consumidores maior mobilidade a um custo reduzido.

Desta forma operação dos veículos autônomos pode ter fortes impactos sociais, através de um maior acesso a mobilidade, para estudantes universitários, idosos, famílias de baixa renda, e até mesmo, menores de idade. Neste sentido, um sistema de compartilhamento de viagens em veículos autônomos, por um curto período, que são mantidos, gerenciados e segurados por uma organização terceirizada, deve atender cinco critérios chaves de trânsito, sendo eles:

- Reduzir congestionamentos;
- Evitar acidentes de trânsito;
- Ter baixo impacto ambiental;
- Ser economicamente viável;
- Deve oferecer conforto e comodidade aos passageiros.

Portanto, uma rede de veículos autônomos compartilhados, poderá auxiliar na gestão da mobilidade urbana. Outro aspecto importante dos veículos autônomos em relação a gestão urbana, está relacionada com sua capacidade de coletar uma vasta quantidade de dados no ambiente urbano, que podem ser utilizados pelo poder público em diversos aspectos, como congestionamento, pedágios e estacionamentos.

Por fim, a operação poderá ser realizada no modelo SPT responsivo, em uma grade de trânsito, onde o veículo pode se movimentar dentro da região de origem para pegar vários passageiros antes de viajar para a região de destino. Entretanto, existe a necessidade de estabelecer estações de carga e descarga de passageiros, espalhadas pelas cidades, que neste aspecto poderiam seguir o modelo PRT, onde há uma rede de estações, em uma grade de 600 m a 800 m de distância entre estações.

2.6.2 OS IMPACTOS LEGAIS

É papel do governo garantir que os veículos autônomos possam ser integrados de forma segura e eficaz ao sistema de transporte existente, juntamente com veículos convencionais, pedestres, ciclistas, motociclistas e outros usuários do espaço público. Entretanto, sem uma estrutura de certificação consistente e um conjunto padronizado de segurança para aceitação, os fabricantes de veículos autônomos podem enfrentar diversas incertezas regulatórias.

Para que haja o desenvolvimento dos veículos autônomos, superar os desafios regulatórios e legais é tão importante quanto superar os desafios tecnológicos. Neste sentido, os primeiros passos a serem dados pelos órgãos reguladores para preparar o caminho para os veículos autônomos são o desenvolvimento de uma estrutura legal para permitir testes, seguida pela operação real dos veículos autônomos em vias públicas.

Portanto, para assegurar a segurança da operação dos veículos autônomos, não basta apenas a validação da tecnologia, como hardware, software e componentes, mas também dependerá de regras operacionais apropriadas, condições da estrada e protocolos de resposta a emergências. Neste sentido, existem algumas questões políticas que devem ser abordados pelo poder público para ajudar no desenvolvimento da tecnologia dos veículos autônomos, como: infraestrutura, legislação, inovação, segurança cibernética e política de privacidade de dados, por exemplo.

Além disso, mesmo que os veículos autônomos tenham o potencial de reduzir 99% dos acidentes, em situações onde a frota de veículos é totalmente autônoma, em situações de acidentes inevitáveis, os veículos autônomos precisarão decidir como dividir o risco de dano entre as diferentes partes interessadas na estrada. Desta forma, existe a necessidade de haver normas e leis que tratem destes dilemas éticos.

3

ESTUDO DE CASO: A SITUAÇÃO DA MOBILIDADE EM FLORIANÓPOLIS

3.1. INTRODUÇÃO

O presente Capítulo, diz respeito ao estudo de caso da região metropolitana de Florianópolis, localizada na região sul do Brasil, através da avaliação do atual cenário da mobilidade urbana e de algumas caraterísticas morfológicas do território, sendo que no final do presente capítulo é realizado uma avalição determinística da eficiência dos veículos autônomos, operando sem qualquer tipo de ação preventiva por parte do poder público. Como resultado, foi avaliado a melhora, ou não, do nível de serviço da via em análise, em função do fator de eficiência dos veículos autônomos. Portanto, na seção 3.2 é realizado a caracterização da cidade de Florianópolis, bem como, da sua região metropolitana. A seção 3.3 apresenta a estratégia de análise adotada para a coleta dos dados que foram utilizados nas seções posteriores do presente capítulo. Na seção 3.4 é apresentado uma análise da atual situação do tráfego rodoviário na cidade de Florianópolis. Por fim, a secção 3.5 apresenta uma análise determinística dos impactos que poderão ser gerados pelos veículos autônomos na cidade de Florianópolis.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DE FLORIANÓPOLIS

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO DA CIDADE DE FLORIANÓPOLIS

A cidade de Florianópolis está situada na região sul do Brasil e é a capital do estado de Santa Catarina. O município possui uma população estimada, para o ano de 2018, de 492.977 habitantes. A sua área total é de 675,409 km², dividida em duas partes territoriais. A menor parte se encontra no continente e a maior parte na Ilha de Santa Catarina, separadas por um estreito de aproximadamente 500 m de largura, com apenas um único ponto de ligação, que são as pontes Pedro Ivo Campos e Ponte Governador Colombo Machado Salles. Cada uma das pontes, com quatro pistas de rolamento, conforme Figura 2 (IBGE 2018; PMF 2016).

Um aspecto muito importante da cidade de Florianópolis, em relação com as demais capitais brasileiras, é o alto nível de qualidade de vida. Isso fica claro, por exemplo, quando analisado o índice de desenvolvimento humano da cidade, que é de 0.847, o maior do país, se comparado com as demais capitais brasileiras (Teixeira et al. 2013).

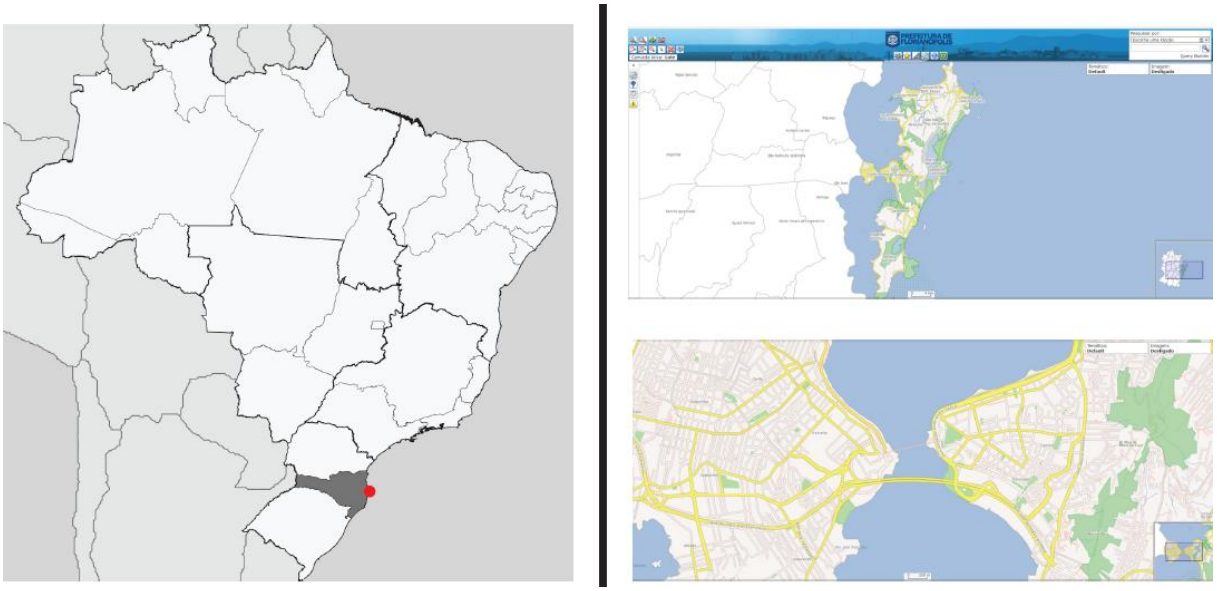

Figura 2 - Localização da cidade e das pontes de acesso à ilha

Todavia, existem muitos problemas no município, como é o caso da mobilidade urbana. Na cidade de Florianópolis, em 2003, houve a implementação de um Sistema Integrado de Transportes (SIT), sendo que, o município possui 237 linhas de ônibus. Contudo, mesmo após a implementação do SIT, ainda persiste o problema de integração entre as cinco empresas de transporte, que operam dentro do município. Desta forma, não existem linhas ligando todos os terminais, pois a configuração do SIT respeita as regiões de cada empresa. Da mesma maneira, em uma escala maior, o sistema de transporte público na região metropolitana de Florianópolis caracteriza-se pela ausência de um planejamento integrado e racional (PLAMUS 2015).

A falta de um sistema de transporte público que seja eficiente cria uma maior dependência ao uso do automóvel privado. Deste modo, em outubro de 2018, a frota de automóveis da cidade era de 227.734 unidades, de caminhonetes e camionetas era de 42.697 unidades, de utilitários era de 8.899 unidades, e por fim, de motocicletas e motonetas era de 55.326 unidades. Portanto, na cidade de Florianópolis há atualmente um total de 334.656 veículos, que corresponde a uma média de aproximadamente 0,68 veículos por habitante (DETRAN/SC 2018).

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA

A região metropolitana de Florianópolis é formada por 9 municípios, compondo uma malha urbana de municípios contíguos e economicamente semelhantes, sendo eles: Águas Mornas, Antônio Carlos, Biguaçu, Florianópolis, Governador Celso Ramos, Palhoça, Santo Amaro da Imperatriz, São Pedro de Alcântara e São José (PLAMUS 2015).

De acordo com IBGE (2018), a população total desta região metropolitana, em 2018, estava estimada em 1.029.357 pessoas, sendo que a área total, é de 2.751,068 km². Os principais segmentos econômicos da região metropolitana de Florianópolis, se concentram no setor de serviços, comércio, setor público e turismo, destacando-se também nos últimos anos as indústrias de tecnologia da informação e da construção civil.

3.2.2.1. Configuração Urbana

A configuração urbana, da região metropolitana de Florianópolis, é composta por uma grande quantidade de servidões. São vias estreitas e sem saída, criando uma extensa malha de baixa conectividade, baseada em estradas de origem rural, que concentram uma grande quantidade do tráfego urbano. Há servidões que excedem 1 km de extensão, sem qualquer intersecção com vias perpendiculares, ou seja, servem somente ao acesso dos lotes perpendiculares à via principal. Entretanto, existem vários bairros em áreas relativamente planas, que apresentam uma estrutura viária em grelha, como grande parte de São José, o centro e diversos bairros de Florianópolis, e alguns bairros de Palhoça. No centro de Florianópolis, os quarteirões são mais quadrados e variam de 40m x 40m a 200m x 200m, implicando em uma maior área dedicada às vias em relação aos outros bairros com um layout de grelha de maior área (PLAMUS 2015).

Figura 3 - Quarteirões de bairros de Florianópolis (Canasvieras, Centro e Ingleses) (PLAMUS 2015)

3.2.2.2. Principais Redes de Transporte e Mobilidade Urbana

A região metropolitana de Florianópolis apresenta características peculiares a serem consideradas. A ilha de Florianópolis abriga o centro político-administrativo do estado de Santa Catarina. Desta forma, toda a estrutura administrativa estadual, estabeleceu-se na ilha, bem como, grandes equipamentos urbanos, como o aeroporto e universidades, por exemplo. Em função disso, há uma grande demanda por deslocamentos no sistema viário urbano de acesso e saída da ilha. Além disso, no verão, a atratividade turística da cidade criar um agravamento no sistema viário. Associado a isso, há o problema da falta de integração entre as empresas que operam as linhas de ônibus na região metropolitana.

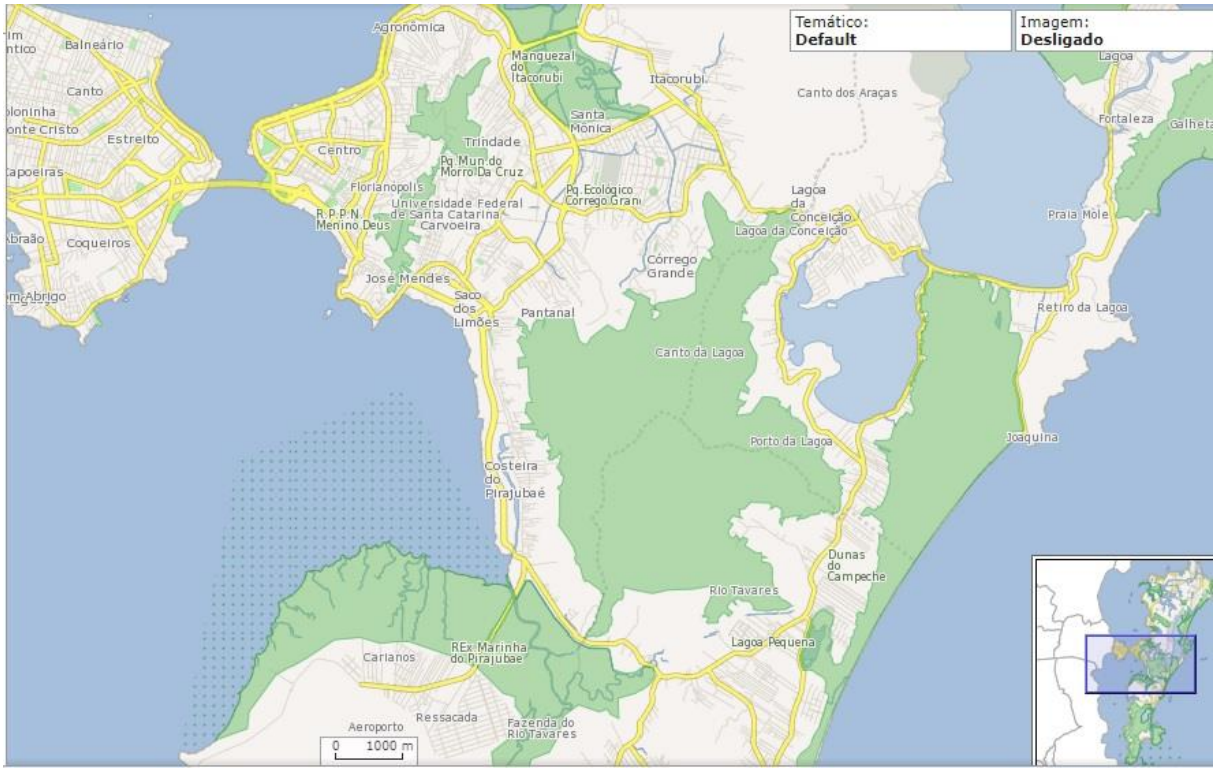

Figura 4 – Região central da cidade de Florianópolis

No contexto metropolitano, também é possível identificar uma dependência ao uso dos automóveis para o deslocamento diário. Em Outubro de 2018, a frota total de automóveis (incluindo automóvel, caminhonete, camioneta e utilitários) da região metropolitana de Florianópolis, era de 527.677 unidades (DETRAN/SC 2018).

É possível constatar ainda, que a oferta de transporte público na região metropolitana de Florianópolis está restrita na operação de linhas de ônibus, que não atendem as expectativas da população. Isto fica evidente, analisando dados de uma pesquisa recente realizada por IPUF (2016), mostrando que 87% da população avalia o sistema de transporte público como ruim ou péssimo.

Portanto, no contexto da região metropolitana, existem nove empresas de transporte público, em um sistema parcialmente integrado, que operam 454 linhas de ônibus. Deste total de linhas, atualmente 154 linhas cruzam as Pontes Colombo Salles e Pedro Ivo Campos diariamente, para acessar a ilha de Florianópolis (PLAMUS 2015).

Na operação intermunicipal, os contratos são celebrados com o Governo do Estado de Santa Catarina, representado pelo DETER - Departamento de Transportes e Terminais. Conforme Figura 5, a conexão entre as linhas das sete principais empresas ocorrem apenas nos oito terminais de integração (indicados com estrelas vermelhas), espalhados pela região metropolitana, sendo que seis terminais estão localizados na ilha, e apenas dois estão na região continental (PLAMUS 2015).

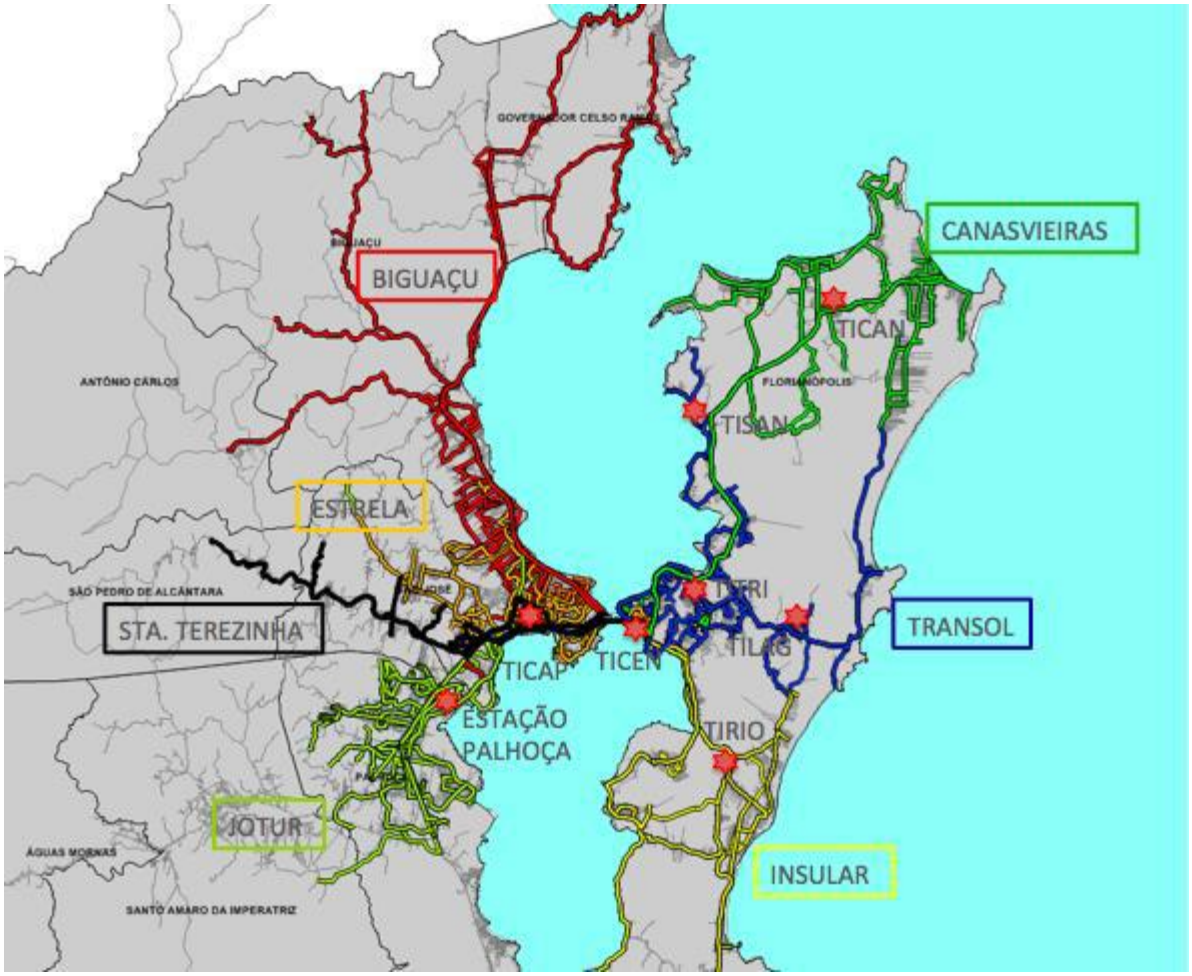

Figura 5 - Linhas de ônibus da Região Metropolitana de Florianópolis (PLAMUS 2015)

Segundo dados de PLAMUS (2015), no contexto do município de Florianópolis, o sistema tarifário é integrado, através de um bilhete eletrônico. Entretanto, na região metropolitana não existe esta integração. Desta forma, há diferentes preços, através de nove tipos de cartões tarifários. Esta característica de falta de integração do sistema tarifário, acaba prejudicando os usuários que necessitam utilizar o sistema de transporte público em seus deslocamentos diários. De acordo com IPUF (2016), 76% da população acredita que o sistema de transporte público deveria ter mais investimentos para melhorar as suas condições.

3.2.2.3. Situação atual da infraestrutura para os ciclistas e pedestres

Na região metropolita, a mobilidade através de bicicleta, é precária, sendo que, 96% dos residentes, avaliam as ciclovias como ruins ou péssimas (IPUF 2016). A infraestrutura existente destinada aos ciclistas é composta por 43 km de ciclovias e ciclofaixas. Entretanto, um dos principais problemas está na descontinuidade que há na rede (Redação–dc 2012).

Além disso, outro aspecto negativo em relação à infraestrutura para os ciclistas, está no medo de acidentes e da criminalidade. De acordo com IPUF (2016), 64 % da população não utiliza bicicletas, sendo que 48% afirmaram que o motivo é a falta de segurança.

No caso da infraestrutura ofertada aos pedestres, a região metropolitana de Florianópolis também apresenta alguns problemas. Neste sentido, as condições de mobilidade, oferecidas aos pedestres são bastante deficientes, com grande parte das calçadas tendo uma largura não compatível com o deslocamento de uma cadeira de rodas.

Existe ainda, uma grande descontinuidade no material da superfície, com os obstáculos recorrentes dentro dos percursos. Esta falta de qualidade do ambiente urbano ofertado ao uso dos pedestres fica evidente com a pesquisa de IPUF (2016), mostrando que 69% da população classifica as calçadas da cidade como ruim ou muito ruim.

3.3. COLETA DE DADOS

Neste capítulo, a estratégia de análise adotada foi a revisão bibliográfica e análise de dados oficiais do poder público, tendo como objetivo construir uma caracterização do atual cenário da região metropolitana de Florianópolis. Deste modo, vale destacar que o principal aspecto de avaliação das seções posteriores deste capítulo é a situação do volume de tráfego atual da região metropolitana de Florianópolis.

3.3.1. TRÁFEGO DE VEÍCULOS

Para determinar o volume de tráfego atual da região de estudo, optou-se por utilizar os dados obtidos na pesquisa PLAMUS (2015), que identificou o volume de tráfego, de forma detalhada, de toda a grande Florianópolis. Ao todo, as contagens foram realizadas em 41 pontos da rede viária. Para o presente trabalho, serão utilizados apenas os dados do ponto 002, localizado entre as pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles, conforme Figura 6. Neste ponto, a pesquisa ocorreu por 16 horas, das 06:00 às 22:00, no dia 30 de junho de 2014.

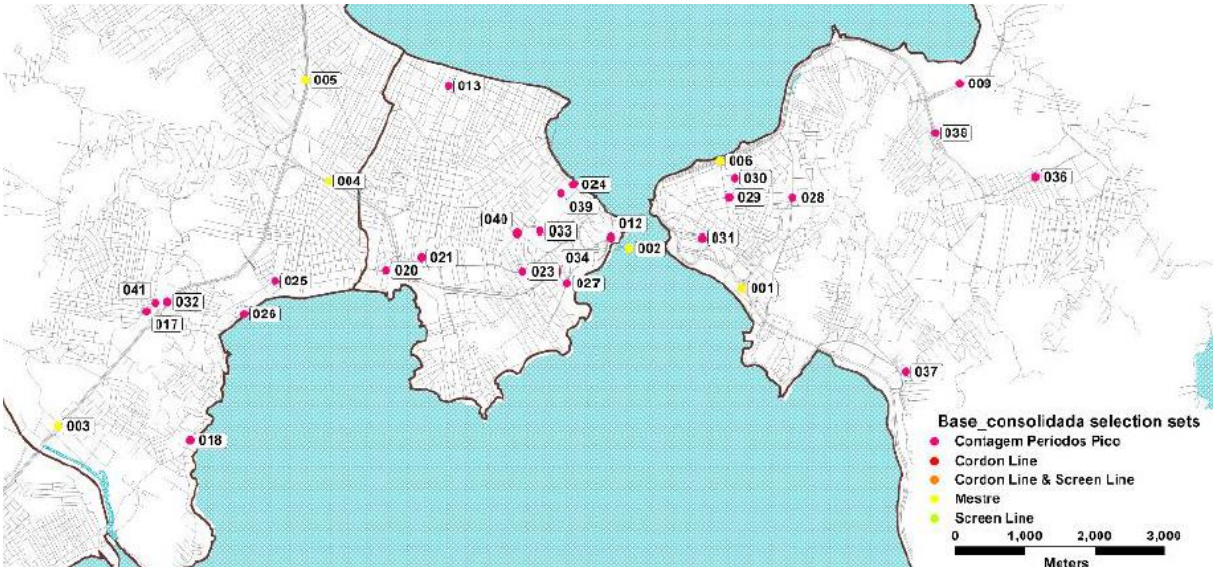

Figura 6 - Localização dos pontos de contagem (PLAMUS 2015)

O método de pesquisa consistiu em se fazer a contagem dos tipos de veículos, através de formulário eletrônico em tablets, classificando-os nas seguintes categorias: Carro; Ônibus; Bicicleta; Motocicleta; Caminhão (2 eixos); Caminhão (3 ou mais eixos); Van e Táxi.

3.3.2. AVALIAÇÃO DA TAXA DE OCUPAÇÃO

Se faz necessário, a avaliação da taxa de ocupação em dois momentos distintos neste trabalho. Para a parte inicial do ensaio, é necessário verificar a atual taxa de ocupação dos veículos que circulam pela região metropolitana de Florianópolis.

Feito isso, é necessário então, estimar uma taxa de ocupação para os veículos autônomos. Para a verificação da taxa atual de ocupação dos veículos, foi utilizado o método de levantamento manual (Seabra et al. 2011). Desta forma, a tipologia de contagem foi direcional em seção, nas pontes de acesso da ilha de Florianópolis.

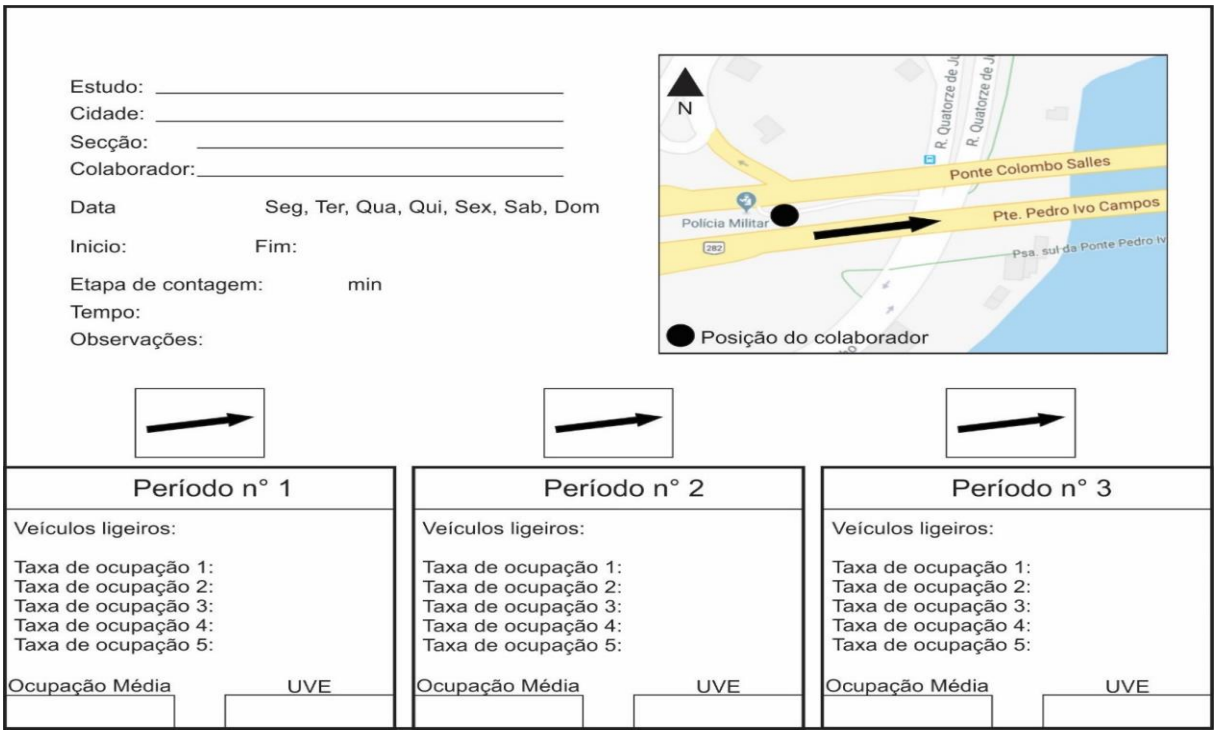

Figura 7 - Impresso de contagem com mapa de secção (Seabra et al. 2011)

No método de recolha de informação, para evitar que os dados sejam comprometidos, as contagens foram realizadas em um dia útil, quarta-feira, no dia 19 de dezembro de 2018, fora do período de férias escolares ou no final de semana.

De acordo com Redação–hsc (2018) o ano letivo em Florianópolis se encerrará no dia 20 de dezembro. Assim, a recolha de informação foi durante um só dia. No entanto, a análise também incidi sobre um local turístico e, desta forma, o período de recolha foi efetuado durante o verão brasileiro, pois é a época onde a procura é mais intensa. Os levantamentos foram realizados por períodos de 15 minutos, durante 16 horas, das 06:00 às 22:00.

3.4. ESTADO ATUAL DO TRÁFEGO RODOVIÁRIO DE FLORIANÓPOLIS

Além da demanda natural imposta ao tráfego, o fato de existir apenas uma ponte de ligação Continente-Ilha e uma ponte de ligação Ilha-Continente, compromete a mobilidade na região metropolitana de Florianópolis. Dados do Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis (PLAMUS 2015), indicam que a Ilha concentra 60% dos postos de trabalho da região. Além disso, se analisarmos a relação entre atração e produção das viagens em toda a região de metropolitana de Florianópolis, cerca de 40% do total de todas as viagens realizadas tem como destino a região central de Florianópolis, que está na ilha.

O volume equivalente atual de veículos por hora, que atravessam a ponte Pedro Ivo Campos (Sentido Ilha) e Colombo Salles (Sentido continente), são determinados pelos dados obtidos em uma pesquisa realizada por PLAMUS (2015).

De acordo com a Figura 8, que mostra a variação demanda por horário, é perceptível que o volume equivalente de veículos, nas pontes tem um exponencial aumento às 07:00 da manhã e mantem o seu volume elevado e relativamente constante até às 22:00. Desta forma, através destes dados, foi calculado um volume médio de veículos por hora de aproximadamente 6500 unidades.

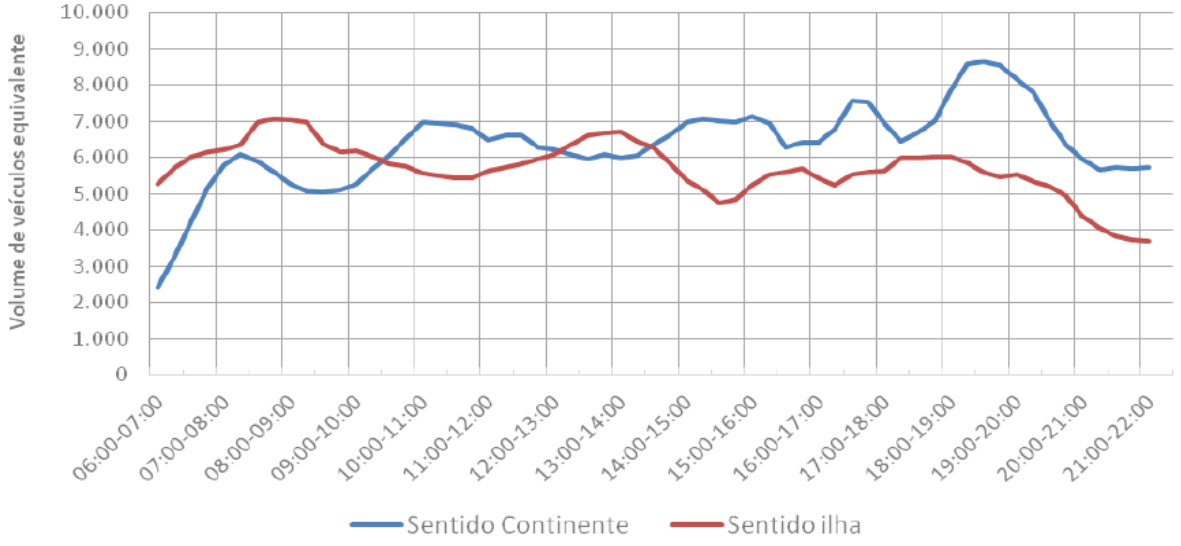

Figura 8 - Variação do volume equivalente de veículos por horário (PLAMUS 2015)

Para determinar a qualidade operacional das pontes, é necessário avaliar o nível de serviço. De modo geral, o nível de serviço pode ser classificado entre “A” e “F”. O nível “A” representando condições com menores volumes de tráfego e maior conforto para os usuários, o nível “F” caracterizando situações em que o elemento viário se encontra totalmente saturado e operando em condições extremamente insatisfatórias. Normalmente, são considerados como aceitáveis, nos horários de pico, os níveis de serviço variando entre “A” e “C”, considerando críticos em relação à fluidez e qualidade operacional nos horários de pico (HCM 2010).

De acordo com HCM (2010) para vias artérias, com velocidade máxima de 80 Km/h em fluxo livre, em um nível de serviço C, que é o limite do considerável aceitável, o volume máximo de veículos por hora por via, é de 1280.

Entretanto, considerando o atual volume médio total de veículos por hora nas pontes, sendo que, de acordo com PMF (2016), cada ponte possui 04 vias de rodagem, com 3,75m de largura cada via, ocupando 15 m do tabuleiro, há um volume médio de 1625 veículos por via por hora, valor acima do máximo aceitável. Além disso, considerando o volume médio entre os horários de ponta, que é de aproximadamente 6500 veículos por hora, há atualmente um nível de serviço "D" nas duas pontes.

3.5. O IMPACTO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS: ANÁLISE DETERMINÍSTICA

Para evitar que a infraestrutura viária das pontes opere com nível de serviço "D", é necessário ampliar a capacidade das pontes. De acordo com PLAMUS (2015), isso deve ser feito, seja através de ampliação da infraestrutura existente, seja através de mudanças na operação do sistema. Portanto, o estudo determinístico empírico do presente capítulo é baseado na metodologia dos níveis de serviço do *Highway Capacity Manual* (HCM), em relação ao fator de eficiência dos veículos autônomos.

Neste sentido, o fator de eficiência dos veículos autônomos pode impactar no nível de serviço, através de uma mudança de operação do sistema. Segundo Calvert, Van den Broek e Van Noort (2011) a aplicação do controle adaptativo da velocidade de cruzeiro (CACC) em um modelo de rede de tráfego de vias artérias, possui um efeito positivo na taxa de transferência do tráfego e no desempenho geral do tráfego na rede. Este se deve ao efeito de amortecimento nas ondas de choque de congestionamento que se propagam a partir de um local de gargalo. Desta forma, a taxa de penetração de veículos autônomos tem um grande impacto no desempenho do tráfego na rede. Para taxas de penetração de 10%, o rendimento aumentado é limitado a aproximadamente 3%. Para uma taxa de penetração de 50%, a taxa de transferência aumentada é de aproximadamente 22% e, em 75%, o aumento é de 39%. Já a penetração completa leva a um aumento na taxa de transferência de tráfego de 68% e mais significativamente à redução da ocorrência de congestionamento na vizinhança direta do gargalo.

Entretanto, além da metodologia apresentada por Calvert, Van den Broek e Van Noort (2011), o presente trabalho busca referência na metodologia apresentada por Conceição, Correia e Tavares (2017) para calcular o fator de eficiência (AEQ) da taxa de ocupação, em função da taxa de penetração de veículos autônomos. Portanto, é utilizada a seguinte fórmula:

$$\mathrm{AEQ} = \frac{1}{1+\left(0.5087*\mathrm{PR}_{\mathrm{AV}}^{2}+0.1636*\mathrm{PR}_{\mathrm{AV}}\right)} \qquad (1)$$

Do volume total de veículos por hora, que é de aproximadamente 6500 unidades, a porcentagem de automóveis é de 75%, que corresponde a 4875 carros por hora (PLAMUS 2015). Desta forma, a taxa de penetração de veículos autônomos acontece apenas em relação aos carros, que correspondem à 75% do volume total. Para a presente análise, foi avaliado o volume de veículos totais, em função do fator de eficiência para uma taxa de penetração de 20%, 50% e 80%, através da fórmula 2, conforme Conceição, Correia e Tavares (2017).

$$\sum f = \sum f^{AV} * AEQ + \sum f^{CV} \qquad (2)$$

Através da fórmula 2, com uma taxa de penetração de 20%, haveria um fator de eficiência de 0,949, que corresponde a uma redução de aproximadamente 49 veículos. Com uma taxa de penetração de 50%, haveria um fator de eficiência de 0,827, que corresponde a uma redução de aproximadamente 843 veículos. Já em uma taxa de penetração de 80%, haveria um fator de eficiência de 0,686, que corresponde a uma redução de aproximadamente 1530 veículos.

Assim, o volume total passaria para 6451 veículos por hora, com penetração de 20%, para 5675 veículos por hora, com penetração de 50% e para 4970 veículos por hora, com penetração de 80%. Considerando que cada ponte possui quatro vias por sentido, então este resultado representa um volume aproximado de 1613 veículos por hora por via, com penetração de 20%, 1419 veículos por hora por via, com penetração de 50% e 1242 veículos por hora por via, com penetração de 80%. Desta forma, a referência para a avaliação do nível de serviço das vias foi o *Highway Capacity Manual* (HCM). De acordo com os parâmetros do HCM, a estrada em análise é uma estrada de vias múltiplas com separador. Portanto, conforme HCM (2010), o formulário para o cálculo do nível de serviço é apresentado a seguir:

$$Vp=\frac{V}{PHF*N*f_{HV}*f_p} \quad (3)$$

$$FSS=BFSS-f_{LW}-f_{LC}-f_M-f_A \quad (4)$$

$$S=FSS \quad (5)$$

$$D=\frac{Vp}{S} \quad (6)$$

Portanto, para volume de 6451 veículos por hora, a concentração (uvl/km/via), é de 18,26, dentro do limite do Nível de Serviço D. Para volume de 5675 veículos por hora, a concentração (uvl/km/via), é de 16,02, dentro do limite do Nível de Serviço D. Para volume de 4970 veículos por hora, a concentração (uvl/km/via), é de 14,02, dentro do limite do Nível de Serviço C.

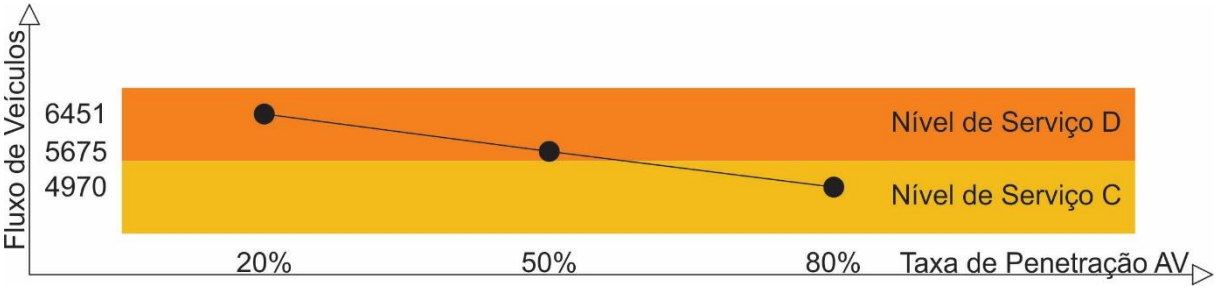

Figura 9 – Impacto da tecnologia dos veículos autônomos no fluxo de veículos

Entretanto, analisar apenas o impacto positivo do fator de eficiência de operação dos veículos autônomos, não é suficiente para entender o impacto desta tecnologia na mobilidade nas pontes de acesso à ilha de Florianópolis. Isso ocorre, pois além do fator de eficiência, existem outros fatores que devem ser considerados para a análise da operação desta nova tecnologia. Deste modo, este estudo determinístico empírico não considera fatores como o impacto desta tecnologia em veículos autônomos compartilhados, a relação com os espaços de estacionamento e a influência de uma possível política de pedágio.

4

OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE ESTRATÉGICA DA OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS

4.1. INTRODUÇÃO

No atual cenário da mobilidade urbana de Florianópolis, a implementação de veículos autônomos, em níveis de automação 4 e 5, trará possíveis impactos no desempenho do tráfego e na ocupação do espaço urbano. Como se percebeu pela análise determinística, os níveis de serviço não melhoram de forma substancial apenas considerando os fatores de otimização da tecnologia dos veículos autônomos. Além disso, há outros aspectos que devem ser considerados na análise da operação dos veículos autônomos. Portanto, no presente capítulo quis-se testar fatores estratégicos de forma a otimizar o sistema durante a operação de veículos autônomos, incluindo o compartilhamento de viagens, a implementação de um pedágio urbano e a gestão das vagas de estacionamentos.

Além disso, as estimativas da demanda dos sistemas de veículos autônomos, na literatura de hoje, permanecem muito limitadas, havendo a necessidade de analisar os impactos em relação ao contexto de cada cidade, tendo portanto, a necessidade de realizar uma análise própria para o contexto da cidade de Florianópolis (Litman 2018; Vosooghi et al. 2017; Martinez e Viegas 2017).

Para a análise do modelo, foi considerado apenas pessoas que já utilizam o automóvel como principal meio de deslocamento diário. Desta forma, no cenário calculado, o modelo de análise se aplica em situações onde não existem opção de mobilidade urbana, a não ser, através do automóvel.

Neste sentido, a seção 4.2 aborda a metodologia da formulação do modelo de otimização em programação linear. Na seção 4.3 são apresentados os fatores estratégicos de políticas públicas.

Na seção 4.4 é apresentado o modelo de otimização e os principais resultados extraídos do modelo. Na seção 4.5 são apresentados exemplos de cidades com morfologia semelhante ao caso de Florianópolis, onde a é possível a aplicação do modelo de otimização. E por fim, na seção 4.6 há uma reflexão crítica com as principais conclusões do modelo.

4.2. FORMULAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO EM PROGRAMAÇÃO LINEAR

O método de análise do desempenho do tráfego no eixo de estudo, constituído pela ponte Pedro Ivo Campos (Sentido Ilha) e Colombo Salles (Sentido continente), possui como principal função objetiva, a minimização dos custos, uma vez que esta função permite relacionar os custos de estacionamento e pedágio ao custo de operação dos veículos. Neste sentido, o modelo considera a possibilidade de estacionamento na área central da cidade de Florianópolis, ou ainda, no ponto de origem da viagem. O método utilizado foi o de otimização em programação matemática linear, através do programa Xpress IVE. Os pressupostos do nosso modelo são:

- O fluxo de pessoas é constante e foi determinado em função população que atualmente acesso a cidade de Florianópolis de carro;
- Não foi considerado a população que atualmente acessa a cidade de Florianópolis através de outros modos de transportes;
- No modelo, as viagens realizadas são feitas por AV (*Autonomous Vehicle*), SAV (*Shared Autonomous Vehicle*) e CV (*Conventional Vehicle*), de acordo com sua taxa de penetração;
- A taxa de penetração dos AVs e SAVs é uma entrada. Já o volume de CVs é determinado pelo modelo e é variável em função das taxas de penetração dos AVs e SAVs.
- Quando o modelo decide pelo estacionamento no ponto de origem da viagem, surge o AVR (*Autonomous Vehicle in Return*).
- A taxa de ocupação dos AVs e CVs são fixas, e a de ocupação dos SAVs é variável em função do preço do pedágio;
- O valor do pedágio é uma entrada, mas é determinado em função da taxa de ocupação, sendo que, quando há a lotação do veículo, o valor final do pedágio é nulo.
- Um AV é considerado como nível de direção autônoma 4 ou 5. AVs viajam de forma mais eficiente do que CVs, permitindo um aumento da capacidade da via;
- A viagem ocorre apenas entre dois nós, com apenas um eixo em cada sentido;

O modelo é formulado como um problema de programação linear inteira e discreta, conforme apresentados nos quadros a seguir:

4.2.1. CONJUNTOS

Nodes	(1..2) Origens e destinos das viagens, 1 é ilha, 2 é continente;
Type	(1..2) Tipo de operação do veículo, 1 é privado, 2 é compartilhado;
Systems	(1..2) Tipo de sistema do veículo, 1 é convencional (CVs), 2 é autônomo (AVs)

4.2.2. DADOS

PR_AV	Taxa de penetração de veículos autônomos na rede;
PR_SAV	Taxa de penetração de veículos autônomos compartilhados na rede;
PES	Preço do pedágio por lugar vazio em dólar;
NV	Número de vias das Pontes por sentido;
MSF	Volume de veículos por via por hora, com nível C de Nível de Serviço;
EVVH	Volume equivalente inicial de veículos por hora
PC	Porcentagem de automóveis
TX_{OC_I}	Ocupação média de veículos
TX_OC_MAX	Ocupação máxima de veículos
PP	Porcentagem de automóveis que necessitam permanecer na ilha por mais de 6 horas
PWP	Porcentagem de automóveis que necessitam permanecer na ilha por 2 horas
PWV	Porcentagem de automóveis com acesso a estacionamento privado gratuito
HS	Horas de permanência na ilha
TTP_CV	Custo do tempo de viagem em veículo convencional em dólar
TTP_AV	Custo do tempo de viagem em veículo autônomo privado em dólar
AVPF	Preço médio por hora de estacionamento privado em dólar
PARK_P	Preço do estacionamento público em dólar
OP_AV	Preço de operação por KM veículo autônomo em dólar
OP_CV	Preço de operação por KM veículo convencional em dólar
DAB	Distância AB em Km
t_{ij}^{min}	Tempo mínimo para atravessar as pontes
t_{ij}^{max}	Tempo máximo para atravessar as pontes

4.2.3. PARÂMETROS

D	Total de carros por hora inicial
F_{PEOPLE}	Total de pessoas por hora
RVVH	Volume residual de veículos por hora (caminhão, ônibus, motos, etc...)
TOP_park_conv	Preço de operação total de veículo autônomo estacionado
TOP_park	Preço de operação total de veículo autônomo estacionado e SAV
TOP_avr	Preço de operação total de veículo autônomo em retorno
PPP	Preço do estacionamento privado
AEQ	Fator de eficiência leves
AET	Fator de eficiência pesados
Capacity	Capacidade de veículos por hora
Custo_avp_6_i	Custo inicial veículo autônomo privado estacionado - 6 horas
Custo_cvp_6_i	Custo inicial veículo convencional estacionado - 6 horas
Custo_avp_2_i	Custo inicial veículo autônomo privado estacionado - 2 horas
Custo_cvp_2_i	Custo inicial veículo convencional estacionado - 2 horas
PES_minimo	Preço pedágio por lugar vazio mínimo
PES_maximo	Preço pedágio por lugar vazio máximo
TP	Preço de pedágio AV em retorno
TP_park	Preço de pedágio AV e convencional estacionado
TP_sav	Preço de pedágio SAV
TX_{OC_F}	Taxa de ocupação final
TTP_sav	Custo do tempo de viagem SAV
tt_inicial	Tempo de viagem inicial

4.2.4. VARIÁVEIS DE DECISÃO

f_{ij}^{AV}	Total de carros autônomos por hora
f_{ij}^{CV}	Total de carros convencionais por hora
f_{ij}^{Total}	Total de carros por hora
TVVH	Volume final total de veículos por hora
f_{ij}^{AVR}	Total de carros autônomos em retorno por hora
t_{ij}	Tempo de viagem final
Pf_i^{CV}	Ocupação do estacionamento pelos CVs
Pf_i^{AV}	Ocupação do estacionamento pelos AVs
Pf_i^{AVR}	Ocupação do estacionamento pelos AVRs
P_i	Somatório da Ocupação do estacionamento
$CustoF_{ij}^{AV}$	Custo dos AVs
$CustoF_{ij}^{CV}$	Custo dos CVs
$CustoF_{ij}^{AVR}$	Custo dos AVRs

4.2.5. FUNÇÃO OBJETIVA

Através da operação dos veículos autônomos, surgem alguns efeitos econômicos. Portanto, neste modelo, foi considerado o impacto da introdução de AVs quando comparado com o cenário atual (sem implantação de AV). Para isso, é analisado, principalmente, a relação entre os custos de pedágio e de estacionamento dentro da operação dos veículos. Deste modo, o modelo considera a relação entre os valores de estacionamento e pedágio, para decidir em que local os veículos autônomos permanecerão estacionados. Portanto, esta análise visa minimizar os custos generalizados da operação dos veículos.

$$\text{Minimize(Custos_generalizados)} = \sum_{j \in I} CustoF_{ij}^{AV} + \sum_{j \in I} CustoF_{ij}^{CV} + \sum_{j \in I} CustoF_{ij}^{AVR} \quad (7)$$

4.2.6. RESTRIÇÕES

A função objetivo está sujeita às restrições expressas entre (8) e (28).

$$\sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} = D * PR_AV \tag{8}$$

$$\sum_{j\in I} f_{ij2}^{AV} = \sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} * PR_SAV \tag{9}$$

$$\sum_{j\in I} f_{ij}^{CV} = (F_{PEOPLE} - \left(\left(\left(\sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} - f_{ij2}^{AV}\right) * TX_{OC_I}\right) + \left(\sum_{j\in I} f_{ij2}^{AV} * TX_{OC_F}\right)\right))/TX_{OC_I} \tag{10}$$

$$\sum_{j\in I} Pf_{i1}^{CV} \geq \sum_{j\in I} f_{ij}^{CV} * PWP \tag{11}$$

$$\sum_{j\in I} Pf_{i2}^{CV} \geq \sum_{j\in I} f_{ij}^{CV} * (PP - PWV) \tag{12}$$

$$\sum_{j\in I} Pf_{i3}^{CV} \geq \sum_{j\in I} f_{ij}^{CV} * PWV \tag{13}$$

$$\sum_{j\in I} Pf_{i1}^{AV} \leq \left(\sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} - \sum_{j\in I} f_{ij2}^{AV}\right) * PWP \tag{14}$$

$$\sum_{j\in I} Pf_{i2}^{AV} \leq \left(\sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} - \sum_{j\in I} f_{ij2}^{AV}\right) * (PP - PWV) \tag{15}$$

$$\sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AV} \leq \left(\sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} - \sum_{j\in I} f_{ij2}^{AV}\right) * PWV \tag{16}$$

$$\sum_{j\in I} f_{ij}^{AVR} \leq \sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} \tag{17}$$

$$\sum_{j\in I} f_{ij}^{AVR} \geq \sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} - \left(\sum_{j\in I} Pf_{i1}^{AV} + \sum_{j\in I} Pf_{i2}^{AV} + \sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AV}\right) \tag{18}$$

$$\sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AVR} \geq \sum_{j\in I} f_{ij}^{AVR} \tag{19}$$

$$\sum_{j\in I} P_{i1} \geq \sum_{j\in I} Pf_{i1}^{CV} + \sum_{j\in I} Pf_{i1}^{AV} \tag{20}$$

$$\sum_{j\in I} P_{i2} \geq \sum_{j\in I} Pf_{i2}^{CV} + \sum_{j\in I} Pf_{i2}^{AV} \tag{21}$$

$$\sum_{j\in I} P_{i3} \geq \sum_{j\in I} Pf_{i3}^{CV} + \sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AV} + \sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AVR} \tag{22}$$

$$\sum_{j\in I} f_{ij}^{Total} = \sum_{j\in I\in t} f_{ijt}^{AV} + \sum_{j\in I} f_{ij}^{CV} + \sum_{j\in I} f_{ij}^{AVR} \tag{23}$$

$$\sum_{j\in I} TVVH_{ij} = (RVVH * AET) + \left(\sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV} * AEQ\right) + \sum_{j\in I} f_{ij}^{CV} + \left(\sum_{j\in I} f_{ij1}^{AVR} * AEQ\right) \tag{24}$$

$$\sum_{j\in I} t_{ij} = t_{ij}^{min} + \sum_{j\in I} TVVH_{ij} * \frac{t_{ij}^{max} - t_{ij}^{min}}{Capacity} \tag{25}$$

$$\sum_{j\in I} CustoF_{ij}^{AV} = \left(TOP_{park} * \sum_{j\in I\in t} f_{ijt}^{AV}\right) + \left(F_{PEOPLE} * TTP_{AV} * \sum_{j\in I} t_{ij}\right) + \left(TP_{PARK} * \sum_{j\in I} f_{ij1}^{AV}\right) + \left(TP_{SAV} * \sum_{j\in I} f_{ij2}^{AV}\right) + \left(\sum_{j\in I} Pf_{i1}^{AV} * \mathrm{PARK_P} + \sum_{j\in I} Pf_{i2}^{AV} * PPP + \sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AV} * 0\right) \quad (26)$$

$$\sum_{j\in I} CustoF_{ij}^{CV} = \left(TOP_{parkCV} * \sum_{j\in I} f_{ij}^{CV}\right) + \left(F_{PEOPLE} * TTP_{CV} * \sum_{j\in I} t_{ij}\right) + \left(TP_{PARK} * \sum_{j\in I} f_{ij}^{CV}\right) + \left(\sum_{j\in I} Pf_{i1}^{CV} * \mathrm{PARK_P} + \sum_{j\in I} Pf_{i2}^{CV} * PPP + \sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AV} * 0\right) \quad (27)$$

$$\sum_{j\in I} CustoF_{ij}^{AVR} = \left(TOP_{AVR} * \sum_{j\in I} f_{ij}^{AVR}\right) + \left(TP \quad * \sum_{j\in I} f_{ij}^{AVR}\right) + \left(\sum_{j\in I} Pf_{i3}^{AVR} * 0\right) \quad (28)$$

As restrições (8) e (9) estabelecem a taxa de penetração de veículos autônomos (f_{ij1}^{AV}) e veículos compartilhados (f_{ij2}^{AV}) na rede. A restrição (10) assegura que a quantidade de veículos convencionais (f_{ij}^{CV}), irá variar em função da taxa de ocupação dos veículos compartilhados, uma vez que somatório do número de pessoas (F_{PEOPLE}) é fixo no modelo. As restrições (11), (12) e (13), asseguram a distribuição proporcional das vagas ocupadas pelos veículos convencionais, de acordo com PLAMUS (2015). As restrições (14), (15) e (16), asseguram a limitação de capacidade das vagas para os veículos autônomos, de acordo com PLAMUS (2015). A restrição (17) estabelece o limite máximo de veículos que podem realizar viagens de retorno vazios (f_{ij}^{AVR}), em função do número de veículos autônomos. A restrição (18) garante a quantidade mínima de veículos em retorno, em função da relação de veículos autônomos não estacionados e em função dos veículos compartilhados. A restrição (19) assegura as vagas para os veículos em retorno, nos pontos de partida destes veículos. As restrições (20), (21) e (22) estabelecem a distribuição da ocupação total das vagas de estacionamento. A restrição (23) calcula o fluxo total de carros no link em estudo. A restrição (24) calcula o fluxo total de veículos em função dos fatores de eficiência no link em estudo. A restrição (25) calcula o tempo de viagem final no link em estudo. A restrição (26), (27) e (28), calculam o custo total de operação dos veículos autônomos, convencionais e em retorno, respectivamente.

4.3. A INCLUSÃO DE FATORES ESTRATÉGICOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Na presente seção são apresentados dois fatores de políticas públicas, que serão considerados pelo modelo de otimização deste capítulo. Neste sentido, a importância estratégica do estacionamento e do pedágio urbano, está no fato de que sua implementação depende da intervenção direta do poder público municipal.

4.3.1. ESTACIONAMENTO

Nas viagens realizadas por automóveis privados, em 70% dos casos, o motivo da viagem é residência – trabalho – residência, 10% residência – estudo – residência e 20% outros motivos. Desta forma, a porcentagem de automóveis que necessitam permanecer na ilha por mais de 6 horas, por motivos de trabalho ou estudo, é de pelo menos 80%. Ao mesmo tempo, a porcentagem de automóveis que necessitam permanecer na ilha por pouco tempo é composta pelos 20% restantes. Deste total, a porcentagem de automóveis com acesso a estacionamento privado gratuito, é de apenas 32% (PLAMUS 2015).

Portanto, nas restrições de ocupação das vagas de estacionamentos por hora, o modelo considera três dinâmicas distintas. Existem as vagas de estacionamento no espaço público urbano pago, em um sistema de estacionamento rotativo. O preço do estacionamento público é de R$ 2,00 a hora, com permanência máxima de 2 horas. Existem as vagas de estacionamento privado pago, em parques de estacionamento privados. O preço médio por hora de estacionamento privado varia de R$ 5,00 à R$ 8,00 a hora. Desta forma, para a análise do modelo, foi considerado o valor de R$ 6,50. E por fim, existem os estacionamentos privados gratuitos, tanto nas residências, quanto nos pontos de destino (PMF 2016; PLAMUS 2015).

Para o cálculo do P1, que considera as vagas de estacionamento no espaço público urbano pago, são considerados os veículos que necessitam permanecer na ilha por pouco tempo. Para o cálculo do P2, que considera as vagas de estacionamento privado pago, são considerados os veículos que necessitam permanecer na ilha por mais de 6 horas. Por fim, para o cálculo do P3, que considera as vagas privadas gratuitas, são considerados os veículos que possuem estacionamento privativo grátis no destino, conforme figura 10. Os símbolos apresentados na figura 10 são descritos na seção 4.2 deste capítulo.

Um aspecto importante do modelo a ser destacado, é o comportamento diferente entre os veículos convencionais (f_{ij}^{CV}) e os veículos autônomos privados (f_{ij1}^{AV}) para o modelo. Isso ocorre, pois, para os veículos convencionais, a restrição (P_{i1}) assegura que estes veículos irão ocupar as vagas, uma vez que eles não possuem a possibilidade de realizar uma viagem de retorno ao ponto de origem de forma autônoma.

Já para os veículos autônomos privados, a restrição (P_{i2}) estabelece um limite máximo de ocupação, mas é o modelo que irá definir, em função do preço, como ocorre esta ocupação, uma vez que estes veículos possuem a possibilidade de retornar ao ponto de origem da viagem de forma autônoma. Para estes veículos em retorno, o modelo analisa justamente a possibilidade de estacionar em vagas privadas gratuitas, localizadas no ponto de origem da viagem.

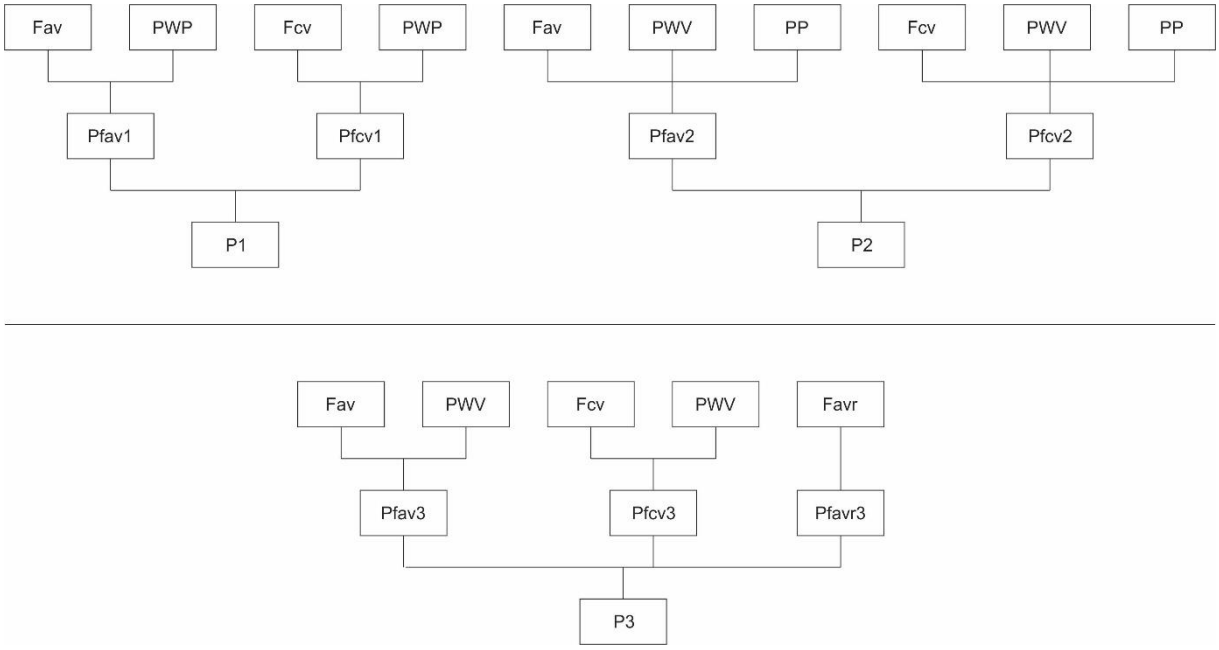

Figura 10 - Organograma de formação da restrição de estacionamento

Assim sendo, a quantidade de veículos, em cada uma das restrições de estacionamento, é calculada pelo modelo através do somatório dos veículos autônomos privados, com os veículos convencionais. Entretanto, para a análise do comportamento dos veículos em retorno, o modelo considera a possibilidade de estacionamento em vagas privadas gratuitas, pois representa o estacionamento residencial no porto de partida da viagem.

4.3.2. PEDÁGIO

Neste modelo, o valor do pedágio é calculado em relação ao número de lugares vazios dos veículos. Portanto, o valor PES, corresponde a cada lugar vazio em um veículo, a medida que há o aumento da taxa de ocupação dos veículos, o valor total do pedágio é reduzindo, chegando a zero, em uma taxa de ocupação máxima.

Para determinar as referências do preço do pedágio, conforme figura 11, houve o cálculo em função do custo de operação dos veículos autônomos, que necessitam permanecer na ilha por mais de 6 horas. Para determinar o custo de um veículo autônomo privado, foram considerados os custos de estacionamento, operação e o tempo de viagem. Os símbolos apresentados na figura 11 são descritos na seção 4.2 deste capítulo.

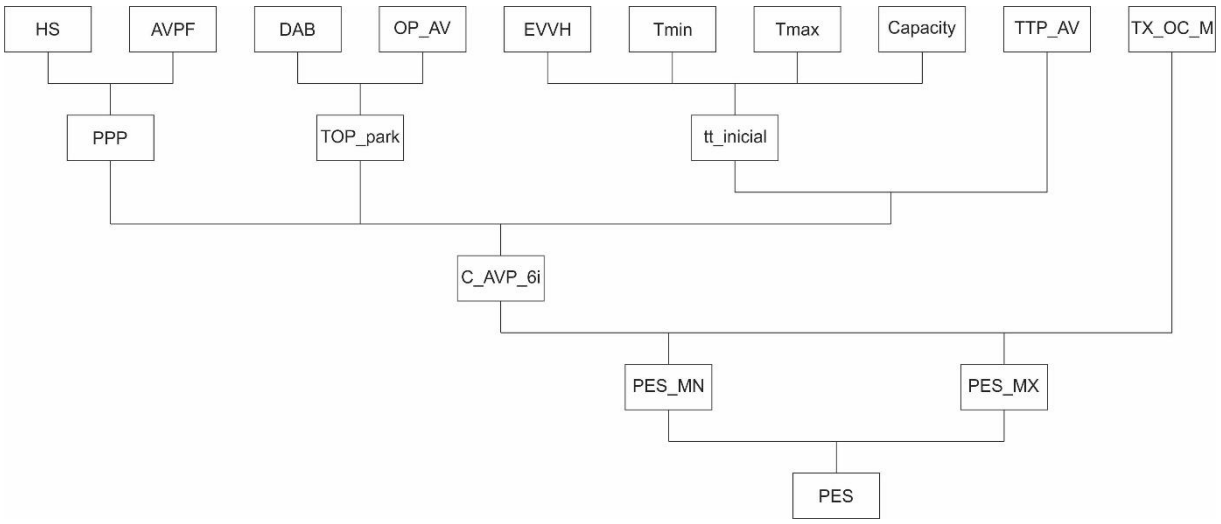

Figura 11 - Organograma de formação do preço de pedágio

Desta forma, o valor mínimo de referência é calculado em relação ao custo de cada assento de um veículo autônomo nas quatro viagens que ele poderia realizar em um dia de operação. Já o valor máximo de referência, é calculado pela relação entre o custo de operação do veículo totalmente vazio com o valor do estacionamento por 6 horas. Assim sendo, o valor médio de referência, entre PES mínimo e o PES máximo, é de aproximadamente 1,50 dólares.

Desta forma, o modelo considera um sistema de cobrança baseado no nível de ocupação, onde a cada lugar ocupado do veículo, o valor do pedágio cai, sendo que em situações de ocupação máxima, o valor é nulo. A cobrança do pedágio ocorre desta forma, para estimular a máxima eficiência do sistema, através da maior taxa de ocupação possível, uma vez que a função objetivo do modelo visa minimizar os custos generalizados de todo o sistema.

4.4. APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO AO CASO DE ESTUDO DE FLORIANÓPOLIS

Para construir a presente análise, o modelo considera um custo específico, para cada tipo de veículo que está em operação, para assim, assegurar que a relação entre os valores de estacionamento e pedágio seja direta na minimização dos custos de operação generalizados de todo o sistema. O modelo assume que ao aumentar a taxa de ocupação, haverá uma redução apenas nos veículos convencionais, em função da maior eficiência dos veículos autônomos.

4.4.1. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS NA REDE

O modelo foi aplicado em uma rede simétrica, composta por 2 nós e 2 arcos. Cada arco é constituído por uma via, com 4 faixas de rolamento. Desta forma, neste modelo as viagens ocorrem entre os 2 nós (1,2). Portanto, o fluxo que parte do nó (1) tem como destino o nó (2), e da mesma forma, o fluxo que parte do nó (2) tem como destino o nó (1). Entretanto, vale destacar que o destino dos veículos em retorno (f_{ij}^{AVR}) é determinado pelo modelo. O aspecto fundamental do modelo é o fato do fluxo de pessoas ser constante. Desta forma, o modelo analisa a quantidade de veículos necessário para transportar o mesmo número de pessoas, considerando diferentes taxas de penetrações de veículos autônomos. Para determinar a quantidade de pessoas que são transportadas por hora no trecho em estudo, foi realizado uma pesquisa de campo, conforme apresentado nos apêndices, que apresentou uma taxa de ocupação média de 1,53 pessoas por veículo. Já a quantidade de veículos que transitam atualmente no trecho em estudo, foi quantificado em função de PLAMUS (2015).

Para determinar a atual dinâmica de estacionamento, que é praticada atualmente na região em estudo, foram utilizados dados de IPUF (2016); PLAMUS (2015); PMF (2016). Assim sendo, percebeu-se que existem três comportamentos em relação ao estacionamento, onde há aproximadamente 20% dos veículos que estão aptos a utilizarem os estacionamentos públicos pagos, por no máximo 2 horas de permanência, 32% que precisam permanecer um logo período no destino e possuem estacionamento privativo gratuito neste destino, e há ainda, 48% dos veículos que precisam permanecer um logo período no destino, em estacionamentos pagos. Neste sentido, um aspecto importante do modelo é a separação das restrições da ocupação das vagas. Isso ocorre, pois na restrição (Pf_{is}^{CV}) os veículos autônomos não possuem possibilidade de retorno. Entretanto, já na restrição (Pf_{is}^{AV}) é estabelecido o limite máximo de ocupação destas vagas pelos veículos autônomos, pois estes, pelas suas características tecnológicas, podem retornar para estacionar no ponto de partida, se transformando em um veículo em retorno (f_{ij}^{AVR}). Desta forma, para a análise do estacionamento dos veículos em retorno, existe a restrição de estacionamento (Pf_{is}^{AVR}).

Outro aspecto importante do modelo é a função do tempo de viagem, que é linear. O tempo mínimo de viagem em cada link é calculado na velocidade de fluxo livre, enquanto o tempo máximo de viagem em cada link ocorre quando a capacidade é atingida e a velocidade gira em torno de 10% da velocidade do fluxo livre (Conceição, Correia e Tavares 2017). Em relação ao fator de eficiência (AEQ) que detalha o efeito dos AVs no tráfego, considerou-se que os AVs beneficiam a capacidade em toda a rede (Calvert, Van den Broek e Van Noort 2011; Conceição, Correia e Tavares 2017). Por fim, para determinar os custos de operação por quilômetros dos veículos, foram utilizados dados de Bösch et al. (2018).

O modelo foi implementado na linguagem *Mosel* e resolvido usando o FICO Xpress 8.5, uma ferramenta de otimização que utiliza *branch-and-bound* para resolver problemas de PI. Deste modo, o algoritmo explora todos os conjuntos, analisando as restrições, em busca da solução ótima, através da função objetiva de minimizar os custos. A interface da ferramenta de otimização FICO Xpress IVE é apresentada na figura 12.

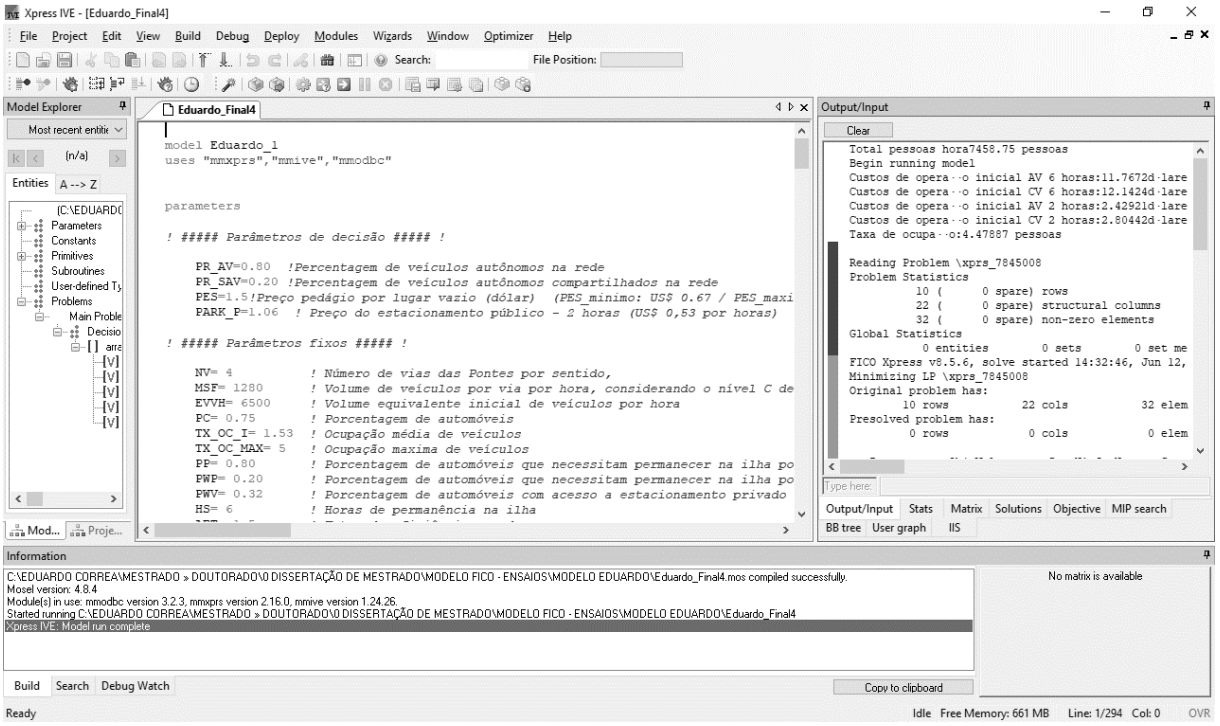

Figura 12 - Interface da ferramenta de otimização FICO Xpress IVE

Cada cenário foi executado em um computador com um processador de 1,44 GHz Intel Atom e 2 GB de RAM. Vale destacar que o modelo é rápido e pode ser resolvido em poucos segundos. Portanto, foram executados 27 cenários diferentes, apresentados na seção posterior, através de uma análise de sensibilidade.

4.4.2. RESULTADOS

No primeiro experimento, o modelo foi executado minimizando os custos generalizados dos veículos na rede, considerando apenas o tráfego de carros, em uma taxa de penetração de veículos autônomos em 20%. Do total de veículos autônomos, foi aplicada uma nova taxa de penetração de 20%, 50% e 80% para os veículos autônomos compartilhados. Os resultados são apresentados na figura 13.

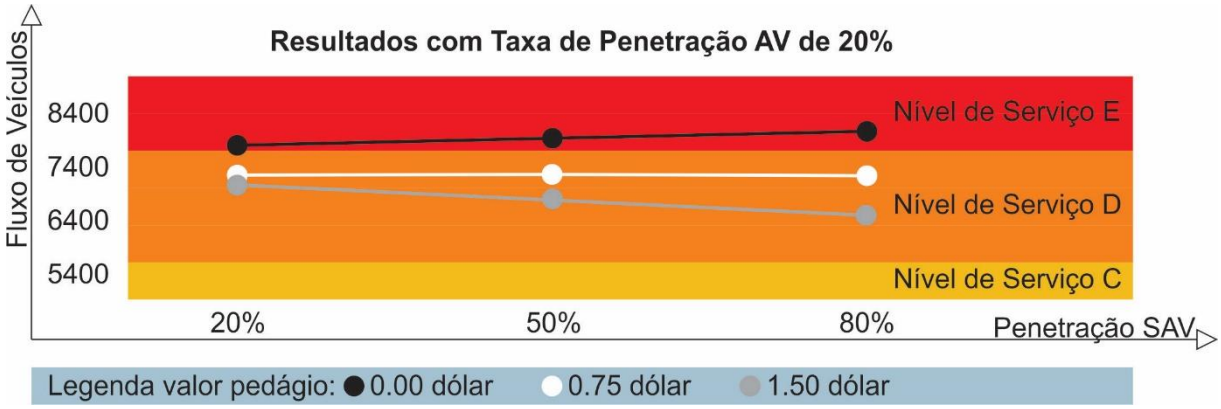

Figura 13 - Resultados do modelo com taxa de penetração AV: 20%

De acordo com os dados da figura 13, para cada faixa de valor de pedágio foi elaborado um quadro com os principais aspectos de cada situação, conforme apresentado nos quadros 5, 6 e 7.

Quadro 5 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.00 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	1.53	3900	596	936	7804	E
50%		3900	721	877	7948	E
80%		3900	874	819	8092	E

Quadro 6 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.75 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	3.00	3712	195	898	7261	D
50%		3430	487	783	7256	D
80%		3148	780	669	7252	D

Quadro 7 - Resultados do modelo com preço do pedágio 1.50 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	4.48	3524	195	861	7073	D
50%		2960	487	689	6787	D
80%		2396	780	518	6501	D

Através das faixas de valor de pedágio que compõe a figura 13, fica evidente que, se houver um aumento na oferta de veículos compartilhados, sem um estimulo na taxa de ocupação destes veículos, pode ocorrer um aumento no volume total de veículos por hora, conforme apresentado no quadro 5.

No segundo experimento, o modelo foi executado com uma taxa de penetração de veículos autônomos de 50%. Do total de veículos autônomos, foi aplicada uma nova taxa de penetração de 20%, 50% e 80% para os veículos autônomos compartilhados. Os resultados são apresentados na figura 14.

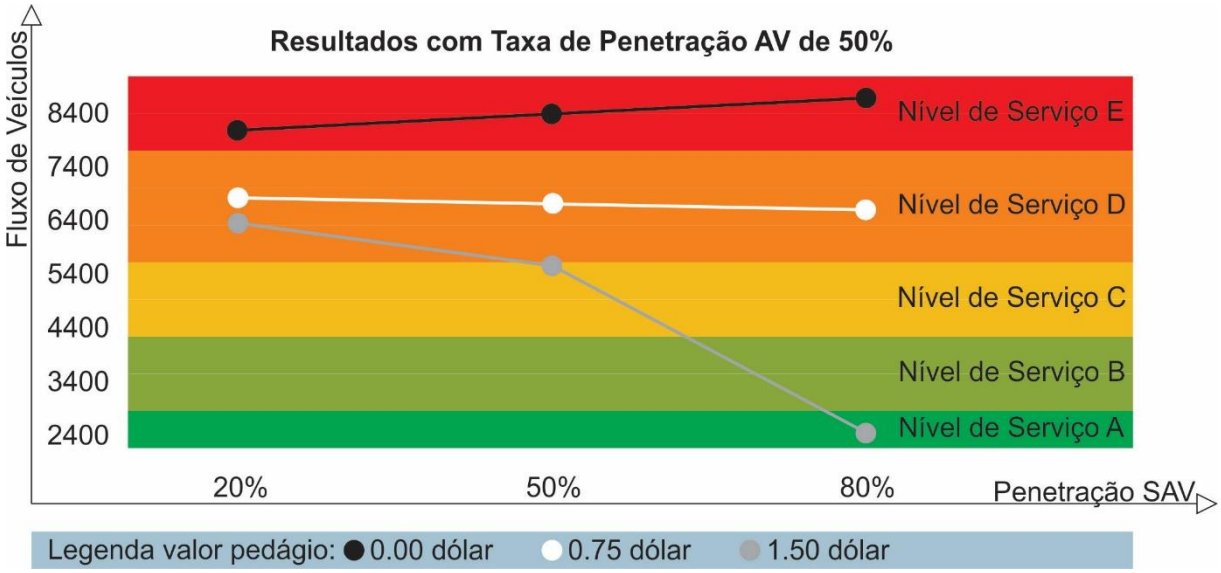

Figura 14 - Resultados do modelo com taxa de penetração AV: 50%

De acordo com os dados da figura 14, para cada faixa de valor de pedágio foi elaborado um quadro com os principais aspectos de cada situação, conforme apresentado nos quadros 8, 9 e 10.

Quadro 8 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.00 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	1.53	2437	1423	877	8069	E
50%		2437	1804	731	8383	E
80%		2437	2184	585	8697	E

Quadro 9 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.75 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	3.00	1968	487	783	6825	D
50%		1263	1219	496	6725	D
80%		558	1950	209	6625	D

Quadro 10 - Resultados do modelo com preço do pedágio 1.50 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	4.48	1498	487	689	6355	D
50%		88	1219	261	5550	C
80%		0	0	0	2437	A

Com os dados da figura 14, é perceptível que com o aumento da porcentagem de veículos autônomos, há um forte impacto em relação aos resultados obtidos. Comparando as figuras 13 e 14, é possível perceber ainda, que com uma maior porcentagem de veículos autônomos compartilhados, parece haver um aumento significativo nos veículos em retorno, o que gera um aumento do volume total de veículos por hora. Isso ocorre, pois, o modelo considera a possibilidade do acréscimo dos deslocamentos que veículos autônomos compartilhados podem realizar em relação aos veículos convencionais. Entretanto, conforme há o aumento do preço do pedágio, há um aumento na ocupação dos veículos compartilhados, resultando em uma diminuição do volume dos veículos convencionais (f_{ij}^{CV}).

Além disso, com o aumento do preço do pedágio, há uma redução dos veículos em retorno (f_{ij}^{AVR}), pois economicamente, se torna mais atrativo estacionar em estacionamento pagos no destino, (P_{i1}) e (P_{i2}). Em relação ao estacionamento público pago, há uma forte redução da necessidade de vagas (P_{i1}), em função da redução da demanda dos veículos convencionais.

No terceiro experimento, o modelo foi executado minimizando os custos generalizados dos veículos na rede, considerando apenas o tráfego de carros, em uma taxa de penetração de veículos autônomos em 80%. Do total de veículos autônomos, foi aplicada uma nova taxa de penetração de 20%, 50% e 80% para os veículos autônomos compartilhados. Os resultados são apresentados na figura 15.

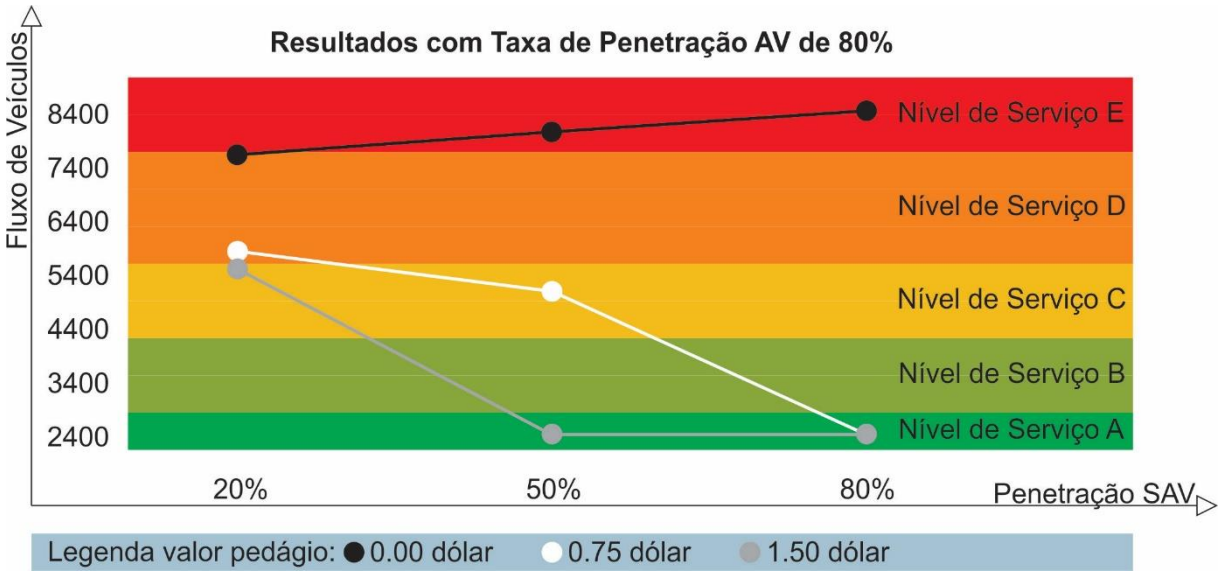

Figura 15 - Resultados do modelo com taxa de penetração AV: 80%

De acordo com os dados da figura 15, para cada faixa de valor de pedágio foi elaborado um quadro com os principais aspectos de cada situação, conforme apresentado nos quadros 11, 12 e 13.

Quadro 11 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.00 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	1.53	975	2277	819	7654	D
50%		975	2886	585	8071	E
80%		975	3494	351	8489	E

Quadro 12 - Resultados do modelo com preço do pedágio 0.75 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	3.00	223	780	669	5874	D
50%		0	1950	209	5105	C
80%		0	0	0	2437	A

Quadro 13 - Resultados do modelo com preço do pedágio 1.50 dólar

Taxa de Penetração SAV	Taxa de Ocupação dos (f_{ij2}^{AV})	Veículos convencionais (f_{ij}^{CV})	Veículos em retorno (f_{ij}^{AVR})	Estacionamento público ocupado por hora (P_{i1})	Volume total de veículos por hora ($TVVH_{ij}$)	Nível de Serviço
20%	4.48	0	780	518	5532	C
50%		0	0	0	2437	A
80%		0	0	0	2437	A

Através dos resultados observados na figura 15, em comparação com as figuras 13 e 14, é perceptível que para a situação específica que o modelo analisa, conforme há o aumento na taxa de penetração de veículos autônomos privados e compartilhados, há um aumento no volume de veículos em retorno. Entretanto, da mesma forma como ocorre nas figuras 13 e 14, através da aplicação de um pedágio, há uma redução no volume total de veículos por hora. Por fim, conforme observado nos quadros 10, 12 e 13, com a aplicação do pedágio, o compartilhamento de viagens se torna financeiramente mais acessível, fazendo com que os veículos autônomos compartilhados atendam sozinhos toda a demanda de passageiros quando há um número suficiente destes veículos em operação.

4.5. OUTRAS APLICAÇÕES DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Os resultados observados no presente capítulo podem ser aplicados na análise de cidades com uma morfologia urbana semelhante ao caso de Florianópolis. Neste sentido, é possível citar o caso do acesso à cidade de São Luís no estado do Maranhão e a ligação rodoviária entre a cidade do Rio de Janeiro e Niterói no estado do Rio de Janeiro.

4.5.1. SÃO LUÍS

O município de São Luís possui a BR 135, rodovia federal, como única via de ligação terrestre entre a Ilha e o território continental. Este eixo rodoviário é também a única porta de entrada e saída para os outros três municípios que compõem a Ilha (São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa).

Figura 16 – Acesso rodoviário pela BR 135 à São Luís no estado do Maranhão

São Luís é o polo atrativo, principalmente devido a maior concentração de oportunidades do mercado de trabalho em seu território. Neste contexto, a BR 135 é a via pela qual se realizam os movimentos pendulares regionais, principalmente para as cidades de Rosário, Santa Rita e Bacabeira, havendo um grande volume diário de pessoas. Além disso, por ser a única ligação, a BR 135 possui fluxo intenso de veículos pesados (PMSL 2016).

Vale destacar ainda que este eixo viário conecta também as regiões centrais e praianas ao Aeroporto Marechal Cunha Machado, localizado nas imediações do Km Zero da BR 135, assim como ao Distrito Industrial (que localiza o Terminal de Integração de passageiros) e à Zona Rural de São Luís.

4.5.2. RIO DE JANEIRO

A Ponte Rio-Niterói é a principal ligação entre as cidades do Rio de Janeiro, Niterói e o interior do Estado, sobretudo a região dos Lagos e o litoral norte fluminense. Com 13,2 quilômetros de extensão, a Ponte Rio- Niterói foi concedida para iniciativa privada com o objetivo de exploração da infraestrutura. O trecho foi leiloado, pela segunda vez, em 18 de março de 2015 (ANTT 2015; Ecoponte 2018).

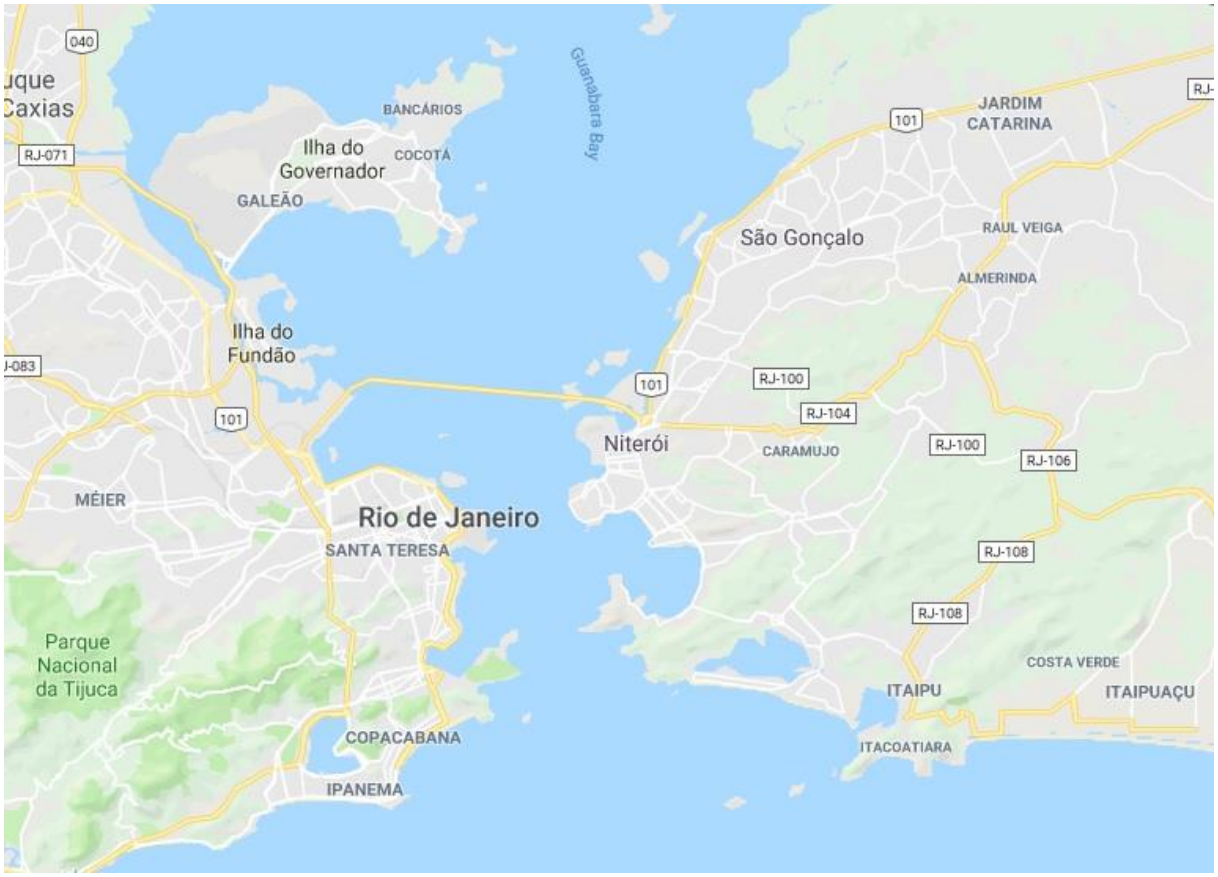

Figura 17 – Ponte entre as cidades de Rio de Janeiro e Niterói

Atualmente, o trecho é administrado pela Ecoponte, empresa do Grupo EcoRodovias, sob o edital de concessão N° 01/2015 - Concessão da rodovia federal BR-101/RJ. A Ponte Rio-Niterói é um marco da engenharia nacional. Inaugurada em 1974, ela ainda detém alguns recordes importantes, como sendo a maior ponte do Hemisfério Sul (Ecoponte 2018).

4.6. REFLEXÕES CRÍTICAS DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO MODELO

No atual cenário de Florianópolis, de acordo com PLAMUS (2015), o volume equivalente inicial de veículos por hora é de 6500 veículos, com um nível de serviço D, e o estacionamento público ocupado por hora, é de 975 vagas. Portanto, através deste modelo, é possível observar algumas implicações que os veículos autônomos podem trazem para o futuro da mobilidade urbana.

Como o nosso modelo matemático é linear, algumas generalizações foram realizadas. A principal desvantagem deste modelo permanece na atribuição de tráfego estático, que é uma limitação em termos do realismo dos resultados.

Outra grande limitação do modelo é considerar apenas a possibilidade de compartilhamento para uma categoria de veículos autônomos, não possibilitando a análise do efeito de um eventual compartilhamento de viagens de veículos convencionais. Além disso, é importante fazer outras considerações, como ao fato de o modelo utilizar um valor médio para o volume total de veículos por hora e pelo fato de o modelo não considerar a operação do atual sistema de transporte público de Florianópolis na análise.

Entretanto, apesar das limitações do modelo, é perceptível que na situação analisada, em cidades com pouca ou nenhuma oferta de transporte público, se não houver uma política de pedágio urbano, haverá um aumento de volume total de veículos por hora, o que ocorre em função, principalmente, dos veículos autônomos que retornam para o ponto de origem da viagem, em busca de uma vaga de estacionamento privada e gratuita. Além disso, é perceptível que nesta mesma situação, sem um pedágio urbano, não há praticamente nenhum incentivo para a partilha das viagens. Uma vez que há o pedágio urbano, começa haver um ganho financeiro na partilha de viagens, o que impacta em uma redução dos veículos convencionais. Já a redução que ocorre no fluxo de veículos em retorno, se deve a uma decisão do modelo em relação as opções de estacionamento que existem no ponto de destino.

Por fim, é importante ressaltar que, em relação à melhora no nível de serviço da infraestrutura rodoviária existente, o modelo pode ser replicável em cidades como São Luís e Rio de Janeiro, onde há importantes conexões rodoviárias limitadas em um único ponto de acesso.

5

OPORTUNIDADES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

5.1. INTRODUÇÃO

A análise dos cenários apresentados no Capítulo 4, juntamente com os dados identificados na revisão bibliográfica do Capítulo 2, fornecem uma forte indicação de que a operação dos veículos autônomos por si só não pode resolver os problemas que o atual sistema de mobilidade de Florianópolis está enfrentando. Desta forma, para que seja possível construir um futuro mais sustentável, é necessário pensar essa nova tecnologia em conjunto com políticas de controle e regulação, como é o caso do pedágio urbano e da gestão dos estacionamentos, por exemplo, que foram consideradas nas análises apresentadas no Capítulo 4.

No contexto destas análises, deve-se pensar o planejamento do ambiente urbano através das mudanças que irão ocorrer na dinâmica de uso e ocupação do espaço. Portanto, com base nos dados obtidos, o presente capitulo é dedicado à análise dos impactos urbanos dos veículos autônomos na cidade de Florianópolis.

Para isso, serão utilizados principalmente os resultados apresentados no quadro 10, com uma taxa de penetração SAV de 50%, considerando um cenário, onde há a implementação de um sistema de pedágio urbano em conjunto com um sistema de estacionamento rotativo pago na área central da cidade. Deste modo, foi constatado que houve de fato uma diminuição no volume total de veículos e na demanda por vagas de estacionamentos.

Através da operação dos veículos autônomos, surge então um conjunto de impactos e oportunidades para se trabalhar políticas públicas e o espaço urbano, principalmente o espaço que é dedicado ao uso de pedestres e de ciclistas, pois, conforme Obelheiro et al. (2016), as cidades que buscam uma maior qualidade em sua mobilidade urbana, tendem a ser aquelas com boas condições para andar a pé e de bicicleta e que oferecem menos espaço aos carros.

Deste modo, na seção 5.2 é apresentado o método utilizado para a coleta de dados que foram acrescentados na análise realizada no presente capítulo. A seção 5.3 identifica os principais impactos e oportunidades em Florianópolis. Na seção 5.4 há a análise dos impactos e oportunidades identificados na seção anterior. Por fim, a seção 5.5 apresenta uma reflexão dos impactos e oportunidades em gerados pelos veículos autônomos em Florianópolis

5.2. MÉTODO DE COLETA DE DADOS

Para o estudo dos impactos causados pelos veículos autônomos em Florianópolis, a estratégia de análise adotada foi a síntese dos dados coletados nos Capítulos 2, 3 e 4. Tento como bases estes dados, houve a construção do Quadro 14, que identifica a seleção dos principais impactos e oportunidades gerados pelos veículos autônomos em Florianópolis.

Na análise de cada um dos pontos apresentados no Quadro 14, houve a realização de uma revisão bibliográfica complementar, trazendo para o debate desta dissertação, dados especificamente relacionados com cada um dos assuntos abordados.

Neste sentido, para a avaliação do espaço urbano impactado pelas mudanças na dinâmica de ocupação do estacionamento rotativo, na região central da cidade de Florianópolis, serão utilizados os dados provenientes do Geoprocessamento corporativo da prefeitura, bem como, dados identificados no Capítulo 3. Os limites da região que foi analisada, são formados pela Avenida Paulo Fontes, ao sul, Avenida Mauro Ramos, à leste, e Avenida Osvaldo Rodrigues Cabral, à noroeste, conforme indicado na figura 18.

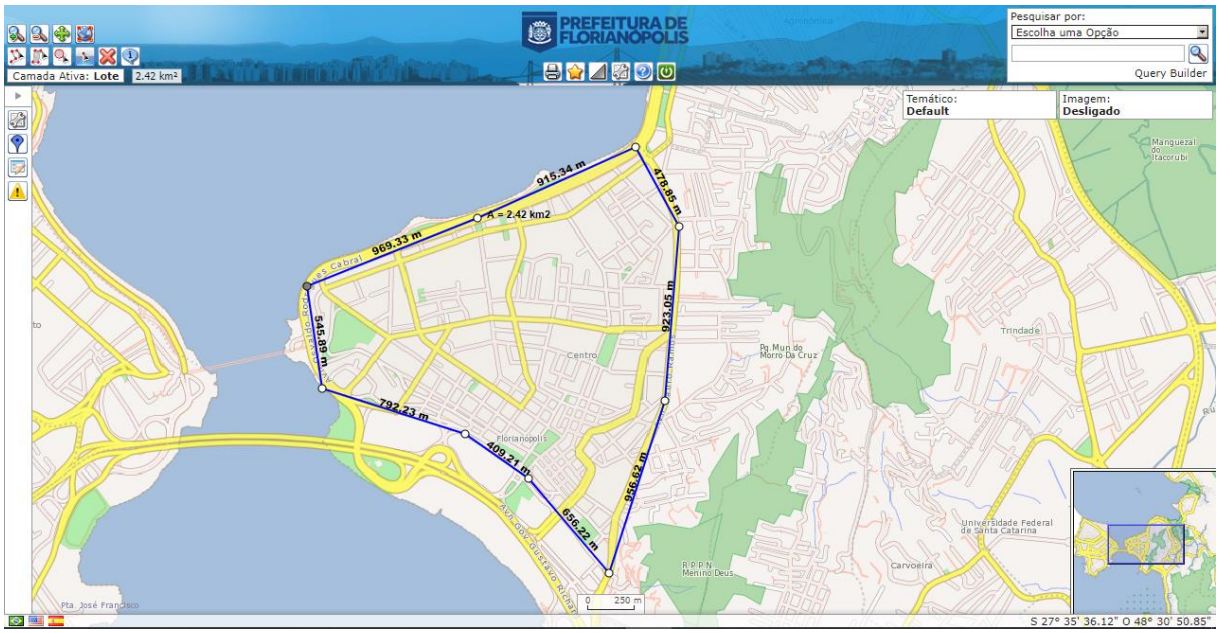

Figura 18 - Imagem Ortofoto 2016 da região de análise (PMF 2016)

Deste modo, o método para a avaliação do impacto dos veículos autônomos no estacionamento público rotativo de Florianópolis, foi realizado através dos dados cadastrais oficiais do poder público municipal. Esta ferramenta permite a uma análise mais aprofundada na morfologia urbana na área central da cidade, com a aplicação de polígonos sobre as áreas de estudo, conforme figura 19.

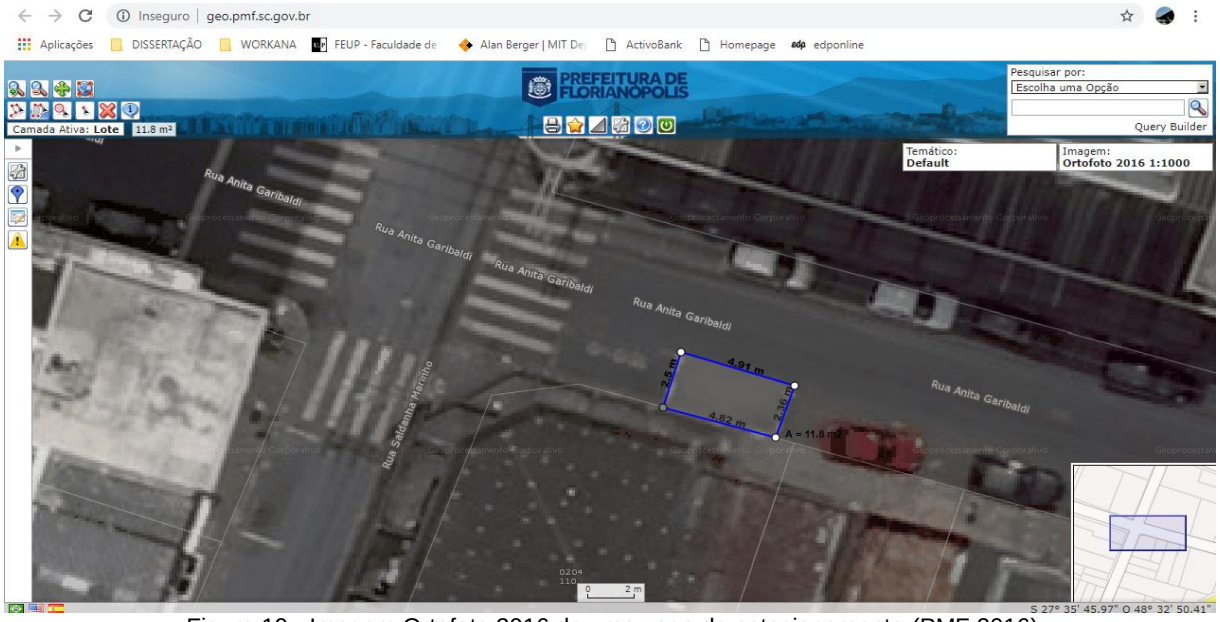

Figura 19 - Imagem Ortofoto 2016 de uma vaga de estacionamento (PMF 2016)

5.3. IMPACTOS E OPORTUNIDADES EM FLORIANÓPOLIS

A operação dos veículos autônomos, principalmente no contexto das regiões metropolitanas brasileira, levantam muitas questões políticas e de planejamento, que precisam ser abordadas para o desenvolvimento desta nova tecnologia de mobilidade urbana. Neste contexto, a maioria dos benefícios externos, como redução de congestionamentos e dos riscos de acidentes, por exemplo, só podem ocorrer quando houver a operação de veículos autônomos de Nível 4 e 5 (Litman 2018). Entretanto, para que as cidades estejam realmente preparadas para esta nova tecnologia de mobilidade urbana, é necessário que haja uma análise dos impactos e oportunidades (Eiró e Martínez 2014; USDOT 2018).

Assim sendo, de acordo com Gehl (2013), existem quatro objetivos chaves para cidades com dimensões humanas, que são: vitalidade, segurança, sustentabilidade e saúde. Entretanto, o ponto central destes quatro objetivos está em um espaço urbano que convida as pessoas a caminhar, pedalar ou permanecer. Por definição, deve-se ter uma estrutura razoavelmente coesa que permita curtas distâncias a pé, espaços públicos atrativos e uma variedade de funções urbanas.

Portanto, através dos impactos dos veículos autônomos, existe a possibilidade de construir uma cidade com espaços urbanos que respeitem a dimensão humana. Pois, conforme mostra DOT (2015), além de seu uso para mover pessoas e bens, as ruas tem o potencial para abrigar uma extensa rede de espaços abertos públicos, que podem promover a dimensão humana, facilitando as interações sociais, cívicas e econômicas. Deste modo, a seguir no Quadro 14, são apresentados os principais impactos e oportunidades em Florianópolis identificados nas análises realizadas nos Capítulos 2, 3 e 4.

Quadro 14 - Impactos e oportunidades em Florianópolis

Impactos identificados no estudo de caso	
Impactos	Oportunidades
Redução em aproximadamente 60% na demanda por vagas de estacionamento público (Quadro 10).	Permite a ampliação de áreas de usos recreativos, principalmente para pedestres e ciclistas.
Melhora do nível de serviço nas pontes de acesso à Florianópolis, de D para C (Quadro 10).	Permite um uso mais eficiente da infraestrutura rodoviária existente.
Aumento na atratividade financeira do compartilhamento de viagens (Quadro 10).	Cria uma nova opção de mobilidade urbana para o contexto de Florianópolis.
O surgimento da necessidade de prover áreas de carga e descarga de passageiros para os veículos autônomos (Quadro 10).	Criar uma rede de estações, que permita ao usuário caminhar uma distância confortável até o destino final.
Impactos identificados na revisão da literatura	
Impactos	Oportunidades
Possível eliminação completa da necessidade de transporte público tradicional.	Transformar a infraestrutura existente das estações de ônibus em uma infraestrutura para carga e descarga de veículos autônomos.
A necessidade de o governo desenvolver uma estrutura legal para permitir o desenvolvimento e a operação da tecnologia.	Promover um debate com a sociedade a fim de estabelecer critérios claros e objetivos, que incentivem os investimentos nesta área
Oferta de maior mobilidade a um custo reduzido, no caso da operação dos veículos autônomos compartilhados.	Maior acesso a mobilidade, para estudantes universitários, idosos, famílias de baixa renda, e até mesmo, menores de idade
Redução do número de acidentes de trânsitos.	O menor risco de acidentes de tráfego possivelmente motivará a prática de caminhada e ciclismo.
A criação de uma vasta rede de sensores, que poderá atuar na geração e coleta de dados.	Uma melhor integração entre governança urbana e Tecnologias de Informação e Comunicação,

5.4. ANÁLISE DOS IMPACTOS E OPORTUNIDADES EM FLORIANÓPOLIS

Por décadas, a dimensão humana tem sido um tópico do planejamento urbano esquecido e tratado a esmo. Ideologias dominantes de planejamento, em especial, o modernismo, deram baixa prioridade ao espaço público, às áreas de pedestres e ao papel do espaço urbano como local de encontro dos moradores da cidade (Gehl 2013).

5.4.1 IMPACTOS IDENTIFICADOS NO ESTUDO DE CASO

5.4.1.1. Estacionamentos

Na região central da cidade, há aproximadamente 5 mil vagas de estacionamento no espaço público urbano, em um sistema de estacionamento rotativo. O preço do estacionamento público é de R$ 2,00 a hora, com permanência máxima de 2 horas. Este sistema de estacionamento rotativo é denominado como Zona Azul, estabelecido pela Lei n° 4.666, de 24 de julho de 1995. Conforme estabelecido no art. 7º, a receita liquida obtida deverá ser aplicada na melhoria das áreas de estacionamento, do sistema viário, de projetos de natureza social e na fiscalização de trânsito e estacionamento. Além destas vagas, existem cerca de 400 parques de estacionamento privados em toda a região central da ilha. O preço médio por hora de estacionamento privado varia de R$ 5,00 à R$ 8,00 a hora. (Luz 2018; PMF 2016; Grando 1995).

Deste modo, as 5 mil vagas, ocupam um espaço de 60000 m², considerando as dimensões mínimas de cada vaga 2,4m x 5,0m, que corresponde à 12m². Desta forma, levando em consideração o preço médio por metro quadrado, de imóveis residenciais (R$ 7661 /m²), em janeiro de 2019, da área central da cidade, é possível estimar um valor aproximado de R$ 459 milhões (ZAP 2019; PMF 2016; PLAMUS 2015). Conforme os dados apresentados no Quadro 10, com a aplicação de uma política de pedágio em um cenário onde há a operação dos veículos autônomos, poderá haver uma redução de aproximadamente 60% na demanda por vagas de estacionamento no espaço público. Isso representa 3000 vagas da área central da cidade de Florianópolis, que somadas totalizam 36000m².

Analisando os dados apresentados nos resultados, poderá haver a redução total na demanda por vagas de estacionamento no espaço público. Vale destacar que com a operação dos veículos autônomos, haverá a mitigação do problema dos estacionamentos informais ou ilegais, uma vez que estes veículos estarão programados para estacionar em conformidade com a normas de trânsitos (Litman 2018; Fagnant e Kockelman 2015). Além disso, mesmo no cenário apresentado no Quadro 10, onde ainda há a operação dos veículos convencionais, uma parte dos valores arrecadados com o pedágio podem ser utilizados para uma maior fiscalização de trânsito, diminuindo o estacionamento em local proibido.

O espaço público ganho com a redução da demanda por estacionamento pode ser utilizado para criar um ambiente urbano que fazem as pessoas se sentirem confortáveis, para caminhadas e ciclismo, por exemplo. Este tipo de espaço tem o potencial para encorajar as pessoas a se moverem e permanecerem, criando uma convivência pública mais vibrante, com segurança, saúde e benefícios econômicos para todos (DOT 2015). Neste sentido, existe uma grande oportunidade para criar um espaço urbano muito mais atrativo do que há atualmente. Como mostra Jacobs (2011), as ruas e suas calçadas, principais locais públicos de uma cidade, são seus órgãos mais vitais. Assim sendo, se as ruas de uma cidade parecem interessantes, a cidade parecerá interessante.

Portanto, os projetos para este novo espaço público urbano de Florianópolis, portanto, podem trabalhar com diversos aspectos, como: A ampliação e melhoria das calçadas; Criar uma rede de ciclovias, com estações de estacionamento para as bicicletas; Criar pequenas praças com espaços de permanência e convivência; Melhorar o paisagismo urbano com o plantio de arvores e jardins; Melhorar as condições de acessibilidade dos pedestres, principalmente para pessoas idosas (Alvez 2003; Burton e Mitchell 2006; DOT 2015; Gehl 2013; Obelheiro et al. 2016).

5.4.1.2. Nível de serviço

Através da análise realizada no Capítulo 4, Quadro 10, é perceptível que em um cenário onde 50% da frota total de carros é composta por veículos autônomos e destes veículos autônomos, 50% realiza o serviço de compartilhamento de viagens, uma política de pedágio pode gerar duas dinâmicas principais:

- Estimular o aumento da taxa de ocupação dos veículos compartilhados, de 1,53 para 4,48 pessoas por veículos.

- Diminui o volume total de veículo que circulam por hora, passando de 6500 para 5550 unidade.

Portanto, a análise mostra que para transportar a mesma quantidade de pessoas, há uma redução de 14,61% no volume total de veículos, melhorando o nível de serviço, que era inicialmente classificado como D, para o nível C.

Esta melhora é fundamental para reduzir os índices de congestionamento nas pontes de acesso a ilha de Florianópolis, que conforme apresentado no Capitulo 3, estão operando de forma continua acima do limite de capacidade. Portanto, a operação dos veículos autônomos, no contexto do Quadro 10, permite um uso mais eficiente da infraestrutura rodoviária existente.

Neste sentido, em alguns pontos da cidade, poderá haver a diminuição da largura das faixas de rolamento. De acordo com Obelheiro et al. (2016), a largura das faixas de rolamento tem grande influência sobre a distância de travessia de pedestres. Além disso, a largura do leito viário potencialmente disponível, poderá ser adequada para outros usos, como ciclofaixas e ampliação da calçada, por exemplo.

5.4.1.3. Compartilhamento de viagens

De acordo com Litman (2018), os veículos autônomos compartilhados tem potencial para reduzir significativamente as viagens de veículos e os custos associados nas viagens, permitindo que as pessoas possam reduzir a propriedade de seus veículos e confiar mais nos serviços de compartilhamento de viagens.

Analisando os dados obtidos no estudo de caso realizado no Capítulo 4, é perceptível que através da aplicação de uma política de pedágio urbano nas pontes de acesso à Florianópolis, haverá um aumento na taxa de ocupação dos veículos.

No caso do Quadro 10, onde 50% da frota total de carros é composta por veículos autônomos e destes veículos autônomos, 50% realiza o serviço de compartilhamento de viagens, a taxa de ocupação passou de 1,53 para 4,48 pessoas por veículos. Já no caso dos quadros 10, 12 e 13 a frota total de carros que realiza o serviço de compartilhamento de viagens, consegue atender sozinha a demanda total de viagens.

Isso ocorre, segundo Fagnant e Kockelman (2015), pois a operação dos veículos autônomos compartilhados gera um serviço de compartilhamento de viagens de maior qualidade e de custo reduzido, permitindo aluguéis próximos, em tempo real, por distância.

Além disso, a constatação dos quadros 10, 12 e 13 da análise, que mostra um cenário onde todas as viagens são realizadas por veículos autônomos compartilhados, é reforçado pelo estudo de Martinez e Viegas (2017), que mostra que os serviços de compartilhamento de viagens em veículos autônomo podem justificar, de forma financeira, a substituição do veículo convencional privado por esse tipo de serviço.

Entretanto, para que seja realmente possível a operação de veículos autônomos compartilhado, será necessário ainda muito desenvolvimento e testes para que a tecnologia possa se expandir, principalmente para cidades onde existem condições meteorológicas extremas ou ruas congestionadas.

Portanto, provavelmente levará vários anos até que os serviços comerciais de veículos autônomos compartilhados estejam amplamente disponíveis no mercado. Porém, se a tecnologia dos veículos autônomos compartilhados continuar a evoluir, tornando-se acessível e confiável, este serviço pode se expandir para atender mais áreas e mais tipos de viagem. (Litman 2018). E desta forma, esta tecnologia permite criar uma nova opção de mobilidade urbana para o contexto de Florianópolis.

5.4.1.4. Áreas de Carga e Descarga

Através da mudança que ocorrerá nos padrões de estacionamento em Florianópolis, que irá liberar uma quantidade significativa de espaço urbano de vagas de estacionamento na área central da cidade, será necessário que esse espaço seja gerenciado a fim de garantir benefícios urbanos em seu novo uso, como áreas de carga e descarga para que os veículos autônomos possam entregar e recolher os passageiros (Fagnant e Kockelman 2015; ITF 2015).

De acordo com PLAMUS (2015) 74,4% das pessoas precisam de até 5 minutos para achar uma vaga, 14% precisam de até 10 minutos, e 11,6% precisam de um tempo superior à 10 minutos. Contudo, após localizar a vaga de estacionamento, 52,5% das pessoas precisam caminhar até 5 minutos para chegar ao destino, 7,2% precisam caminhar até 10 minutos, e 40,3% precisam caminhar acima de 10 minutos. O tempo médio de procura de uma vaga, somado com o tempo médio de caminhada, fica entorno de 11 minutos. Considerando, que o tempo médio de viagem de um automóvel é de 31,2 minutos, é possível constatar que cerca de 30% do tempo de viagem é perdida para o processo de estacionamento do veículo. Além disso, para os usuários de ônibus, o tempo médio de caminhada de acesso e regresso ao ponto de parada de ônibus é de 5,1 minutos, com um tempo de espera médio de 8,2 minutos, assim sendo, um tempo de 18,3 minutos.

Desta forma, uma rede de estações para os veículos autônomos compartilhados, distribuídas pela área central da cidade de Florianópolis, poderá oferecer uma aproximação maior ao destino final, se comparado ao tempo atual usado pelos motoristas para estacionar e caminhar até o destino final. Para isso, o planejamento da operação desta frota de veículos autônomos compartilhados, poderá prever uma rede de estações, com áreas para carga e descarga de passageiros.

De acordo com Brownell e Kornhauser (2014); Martinez e Viegas (2017), as estações podem estar espaçadas em uma grade de 600 m a 800 m de distância. Considerando o planejamento da rede de estações para adultos jovens, como mostra Burton e Mitchell (2006), é recomendável que as estações de transporte público estejam situadas a menos de 800m, que corresponde à 10 minutos a pé. Entretanto, já para pessoas na faixa dos 70 anos, geralmente levam cerca de 10 a 20 minutos para andar de 400 a 500 metros, não podendo andar mais de 10 minutos sem descanso. Portanto, para que desenho urbano seja realmente inclusivo, é recomendável que as estações para embarque e desembarque de passageiros estejam espaçadas a cada 500 metros.

O espaço urbano que é liberado pela operação dos veículos autônomos compartilhadas, principalmente pela diminuição da demanda por vagas de estacionamento, pode ser utilizado para abrigar as estações de carga e descarga de passageiros (Litman 2018; ITF 2015).

Entretanto, de acordo com DOT (2015), em áreas centrais, é recomendável que as estações de carga e descarga de mercadorias e passageiros ocupem o espaço da rua, como uma opção de projeto para restringir o espaço destinado aos carros, principalmente em ruas mais largas. Com isso, o espaço urbano liberado pela diminuição da demanda por vagas de estacionamento pode ser utilizado para outros usos, Vale destacar que esta opção é reforçada pelos dados obtidos nos resultados do capítulo 4, que mostram uma diminuição no volume total de viagens.

5.4.2 IMPACTOS IDENTIFICADOS NA REVISÃO DA LITERATURA

5.4.2.1. Transporte público

Conforme apresentado no Capítulo 3, a oferta de transporte público na região metropolitana de Florianópolis, é precária. No atual cenário da cidade, existem nove empresas que operam as linhas de ônibus, em um sistema que é parcialmente integrado. Além disso, vale destacar que cerca de 87% da população avalia o sistema de transporte público por ônibus de Florianópolis como ruim ou péssimo (IPUF 2016; PLAMUS 2015; PMF 2016).

Portanto, os usuários do atual modo de transporte público de Florianópolis, poderão ser absorvidos pelos serviços dos veículos autônomos compartilhados, eliminado completamente a necessidade do atual sistema de transporte público (Costa e Fernandes 2012; ITF 2015).

Isso ocorre, principalmente pela conveniência, alta qualidade e baixo custo de operação dos veículos autônomos (Bösch et al. 2018; ITF 2015; Litman 2018). Portanto, existe a possibilidade de transformar a infraestrutura existente das estações de ônibus em estações de carga e descarga de passageiros, complementando a infraestrutura destinada a operação dos veículos autônomos.

5.4.2.2. Legislação

Para que possa ser possível o desenvolvimento e a futura operação dos veículos autônomos, existe a necessidade de o governo desenvolver uma estrutura legal, permitindo que está nova forma de mobilidade possa ser integrada de forma segura e eficaz ao sistema de transporte existente, juntamente com veículos convencionais, pedestres, ciclistas, motociclistas e outros usuários do espaço público. Portanto, é preciso promover um debate com a sociedade a fim de estabelecer critérios claros e objetivos, que incentivem os investimentos nesta área (Keeney 2017; Trommer et al. 2016; USDOT 2018).

Entretanto, além disso, é necessário que haja também uma legislação clara e objetiva em relação aos possíveis acidentes de transito, pois, mesmo que as projeções mostrem que haverá uma grande redução no número de acidentes, ainda haverá situações de acidentes inevitáveis que precisarão ser julgadas pelo poder judiciário brasileiro (Awad et al. 2018; BMVI 2017; Bonnefon, Shariff e Rahwan 2016).

5.4.2.3. Acesso a mobilidade

No atual cenário da cidade de Florianópolis, conforme apresentado no Capítulo 3, a parcela mais pobre da população é atendida apenas pelo atual sistema de transporte público, que é estruturado por linhas de ônibus. A renda média dos usuários de automóvel e ônibus é totalmente desigual, sendo a dos usuários de automóvel é de R$ 3.533,00 e a dos usuários de ônibus é de R$ 1.495,00. Além disso, a distância percorrida pelos usuários de transporte coletivo também é maior. Neste contexto, de acordo com, o sistema de transporte público na Grande Florianópolis é o modal com o pior desempenho. Em média, o tempo de viagem é de 57,6 minutos, muito acima dos demais modos de transportes. De todas as viagens realizadas no sistema de transporte público de Florianópolis, 24% são para transporte do domicilio para a escola, e 57% são para transporte do domicilio para o trabalho (PLAMUS 2015).

Portanto, para a situação da atual mobilidade de Florianópolis, o compartilhamento de viagens tem o potencial para fornecer aos consumidores maior mobilidade a um custo reduzido, e assim, criando uma nova opção de mobilidade para a parcela mais pobre da população da cidade. Além disso, a operação dos veículos autônomos compartilhados terá impactos sociais também nos estudantes e idosos, por exemplo, criando um maior acesso a mobilidade urbana (Fagnant e Kockelman 2015; Martinez e Viegas 2017; Shaheen, Cohen e Zohdy 2016). Portanto, com a oferta de maior mobilidade a um custo reduzido, no caso da operação dos veículos autônomos compartilhados, haverá provavelmente um maior acesso a mobilidade, principalmente para famílias de baixa renda, estudantes e idosos.

5.4.2.4. Acidentes

Espaços urbanos socialmente seguros são abertos, convidativos, acolhedores, que todo tipo de cidadão teria vontade de frequentar e compartilhar (Bauman 2009). Entretanto, de acordo com Gehl (2013), nos mais de cinquenta anos que os carros invadiram as cidades, o medo de acidentes de trânsitos cresceu de forma aguda, com um impacto dramático sobre pedestres e ciclistas.

Neste contexto, Florianópolis enfrenta atualmente um grave problema em relação à segurança da mobilidade urbana. De acordo com Obelheiro et al. (2016) a cidade de Florianópolis aparece como uma das cidades com maior taxa de mortalidade do mundo, decorrentes de acidentes de transito, com 22.6 mortes a cada 100.000 habitantes.

Porém, vale destacar que os sistemas de monitoramento de acidentes no Brasil criam uma base de dados confiável. De acordo com Obelheiro et al. (2016), o Brasil possui bons sistemas de notificação de acidentes e dados confiáveis. possuindo altas taxas de mortalidade. Ao mesmo tempo, segundo WHO (2018) o Brasil está entre os países com as melhores práticas legislativas para diminuir o número de acidentes, entre os países mais populosos do mundo.

Neste sentido, a operação de veículos autônomos pode resolver o problema dos acidentes de trânsitos em Florianópolis. As perspectivas em relação a segurança mostram que pode haver uma redução no número de acidentes entre 90% e 99%, quando a frota de veículos é majoritariamente autônoma. Isso ocorre, pois, a grande parte dos acidentes ocorrem por causa de erros humanos na condução dos veículos (Bonnefon, Shariff e Rahwan 2016; Fagnant e Kockelman 2015). Outro aspecto importante, que os veículos autônomos podem impactar de forma positiva, é a operação em velocidade segura em áreas de grande movimentação de pessoas. De acordo com Obelheiro et al. (2016), velocidade veiculares baixas, especialmente as abaixo de 30km/h, reduzem drasticamente o risco de morte em um eventual acidente entre veículos e pedestres.

Portanto, um dos principais esforços de uma cidade deve estar em melhorar a segurança nas ruas, priorizando a segurança de todos os usuários, particularmente grupos mais vulneráveis, como crianças, idosos, pessoas com deficiência. Além disso, ruas mais seguras estimulam os modos de transportes mais vulneráveis, como andar a pé, de bicicleta, por exemplo (DOT 2015).

5.4.2.5. Dados Urbanos

Através da operação dos veículos autônomos, haverá uma rede de comunicação e sensores espalhados pelo ambiente urbano, permitindo a geração e coleta de uma grande quantidade de dados, tanto pelos veículos, quanto pela infraestrutura urbana que precisará ser preparada para a operação dos veículos autônomos (Trommer et al. 2016; USDOT 2018).

Desta forma, estes dados gerados pelos veículos autônomos serão provavelmente muito mais homogêneos e de maior qualidade, permitindo assim, ações mais significativas e melhor compreensão dos processos que ocorrem na cidade de Florianópolis. Neste sentido, os dados gerados pelos veículos autônomos podem ajudar o poder público em diversos aspectos, como congestionamento, pedágios e estacionamentos (Kitchin 2013; Zheng et al. 2014).

5.5. REFLEXÃO DOS IMPACTOS E OPORTUNIDADES EM FLORIANÓPOLIS

Através do trabalho desenvolvido no presente Capítulo, é possível constatar que existem diversos aspectos positivos na operação dos veículos autônomos, quando há uma política de pedágio e de gestão de estacionamentos. Portanto, surgem novas oportunidades para melhorar as condições para os pedestres e ciclistas, que promove essencialmente novos padrões de uso e mais vitalidade no espaço urbano.

Todavia, além das oportunidades, é importante ressaltar que haverá provavelmente uma dependência maior ao uso do automóvel. Deste modo, sem o devido cuidado do poder público, a operação dos veículos autônomos pode agravar diversos problemas urbanos, que existem atualmente em Florianópolis, como por exemplo, o aumento do volume total de veículos, e por consequência, o agravamento dos índices de congestionamento.

Portanto, é dever do poder público tomar o controle da situação e atuar no sentido de promover os impactos positivos da operação dos veículos autônomos, e assim, devolver aos pedestres a devida prioridade de utilização do espaço urbano. Pois como mostra o trabalho de Gehl (2013) e Lynch (1960), para construir cidades vivas, seguras, sustentáveis e saudáveis, o pré-requisito é oferecer boas oportunidades de caminhar. Em essência, caminhar é uma forma especial de comunhão entre pessoas que compartilham o espaço público, sendo que as pessoas observam a cidade a medida que nela se deslocam.

6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

Na análise dos impactos causados pelos veículos autônomos, realizada através da revisão bibliográfica em conjunto com um estudo de caso e uma análise matemática, é possível constatar que as políticas públicas possuem um papel central em relação aos resultados. Mesmo que em parte da literatura seja possível identificar que não existem um consenso em relação aos benefícios de alguns aspectos importantes desta nova tecnologia, é possível afirmar que serão as estratégias de controle e regulação dos veículos autônomos que definirão se os impactos serão positivos ou negativos

Deste modo, com a análise realizada no Capítulo 4, em conjunto com a análise realizada no Capítulo 5, fica evidente que através da aplicação de uma política de pedágios, juntamente com a gestão das vagas de estacionamento, os impactos dos veículos autônomos serão positivos, criando diversas oportunidades e desafios para o planeamento do espaço urbano.

Os resultados foram organizados em duas categorias, havendo impactos identificados especificamente no estudo de caso e impactos identificados especificamente na revisão da literatura. Relativamente aos resultados identificados no estudo de caso, constatam-se as seguintes conclusões, em um cenário onde há aplicação de uma política de pedágios, juntamente com a gestão das vagas de estacionamento:

- Haverá uma redução estimada em 60% na demanda por vagas de estacionamento na região central da cidade, que representa aproximadamente 36000m². Portanto, surgem diversas oportunidades de requalificação deste espaço urbano. Os principais aspectos que podem ser trabalhados são relacionados ao uso de pedestres e ciclistas.

- Considerando o volume de pessoas que acessam a ilha diariamente em viagens de carros privados, os veículos autônomos poderiam transportar o mesmo volume de pessoas, com uma frota 14,61% menor. Isso impacta em uma melhora do nível de serviço, passando de D para C. Assim sendo, surgem oportunidades para a diminuição da largura das faixas de rolamento, havendo a possibilidade de ampliar o espaço destinado à pedestres e ciclistas.

- Em um cenário onde há um pedágio urbano e gestão das vagas de estacionamento, as viagens em veículos autônomos compartilhados serão financeiramente mais atrativas do que viagens em veículos privados. Deste modo, surge uma nova opção de mobilidade urbana, de maior qualidade e custo reduzido.

- Será necessário prever estações de carga e descarga de passageiros espalhas pela cidade. Com isso, surge a oportunidade de criar uma rede que seja acessível e confortável tanto para jovens, quanto para idosos e pessoas com mobilidade reduzida, com estações a cada 500 metros de distância.

Relativamente aos resultados identificados na revisão da literatura, constatam-se as seguintes conclusões:

- No contexto da cidade de Florianópolis, poderá haver a eliminação total da necessidade do atual sistema de transporte público, pois os veículos autônomos compartilhados oferecem um serviço de alta qualidade e de baixo custo. Assim, surge a oportunidade de transformar a infraestrutura existente para atender a operação dos veículos autônomos compartilhados.

- É preciso que o governo desenvolva uma estrutura legal, clara e objetiva, que permita o desenvolvimento da tecnologia dos veículos autônomos.

- Os veículos autônomos compartilhados poderão atender uma parcela da população que atualmente tem um acesso limitado à mobilidade urbana de qualidade. Portanto, esta tecnologia poderá atender muitas pessoas de baixa renda, idosos e estudantes, por exemplo, ampliando o acesso à mobilidade urbana.

- Os altos indicies de acidentes de trânsito criam uma grande sensação de insegurança para as pessoas que se deslocam pela cidade de Florianópolis. Neste aspecto, os veículos autônomos poderão reduzir em mais de 90% o número de acidentes, com a eliminação do erro humano e com um controle em tempo real da velocidade de tráfego. Deste modo, há um estimulo aos modos de transporte mais vulneráveis, como andar a pé ou de bicicleta.

- Os veículos autônomos criam uma ampla rede de sensores, que irão gerar e coletar dados urbanos em tempo real. Portanto, o poder público poderá utilizar estes dados para estudar gerenciar diversos aspectos da vida urbana.

Entretanto, é importante destacar que sem uma estrutura de certificação consistente e um conjunto padronizado de segurança para aceitação, os fabricantes de veículos autônomos podem enfrentar diversas incertezas regulatórias, o que impedirá o desenvolvimento da tecnologia no Brasil. Todavia, mesmo se já houvesse a segurança jurídica necessária, o processo de transição iria levar alguns anos. Isso ocorre, pois, operar um veículo autônomo em vias públicas é complexo devido à frequência de interações com elementos do meio urbano, como pedestres, ciclistas e demais veículos. As previsões apontam que os veículos autônomos de nível 4 e 5 estejam comercialmente disponíveis a partir da década de 2030.

Além disso, sem a aplicação de um pedágio urbano, muito dos impactos positivos indicados no Capítulo 5, não irão acontecer. Conforme está demonstrado nas figuras 13,14 e 15, em todos os cenários onde o preço do pedágio é nulo, há um agravamento nos níveis de congestionamento e um aumento na demanda por vagas de estacionamento público.

Esta tecnologia está em pleno desenvolvimento e em algumas décadas estará presente nas capitais brasileiras. Portanto, há um papel crítico do poder público, que será decisivo em relação aos benefícios potenciais que podem ser alcançados através da operação dos veículos autônomos.

6.2. RECOMENDAÇÕES

Através do desenvolvimento da presente dissertação de mestrado, a análise crítica dos dados mostra que é imprescindível a atuação do poder público municipal, com o intuito de direcionar de forma positiva, os possíveis impactos que estão associados à operação dos veículos autônomos. Neste sentido, muito além do caso de Florianópolis, este tipo de modelo de análise pode ser aplicado em outras cidades, principalmente aquelas com características morfológicas semelhantes ao presente caso de estudo.

Todavia, além do que foi exposto neste trabalho, há ainda outros aspectos que podem ser considerados em estudos futuros sobre este tema, tais como: Incentivo ou não-incentivo à compra dos veículos autônomos, a possibilidade de criação de um sistema de transporte públicos integrado com veículos autônomos, análise dos impactos na poluição do ar, análise dos impactos na poluição sonora, entre outros. Neste sentido, surgem diversas perspectivas para investigações futuras, que não foram analisadas neste trabalho, em função dos objetivos propostos. Entretanto, apresentam-se dois temas de maior relevância.

Inicialmente, é possível destacar um tema relacionado ao modelo de programação linear do capítulo 4, como sugestão para um trabalho futuro. Na análise do comportamento de viagem e escolha do modo de transporte, seria interessante analisar cenários onde houvesse a integração do atual sistema de transporte público de Florianópolis com o serviço de táxis autônomos.

Todavia, é possível ainda destacar outro tema relacionado aos impactos e oportunidades, identificados no capítulo 5, como sugestão para um trabalho futuro. Neste sentido, é possível realizar uma análise mais aprofundada das oportunidades relacionadas ao uso e ocupação do solo, com o objetivo de definir diretrizes de uma estratégia de requalificação urbana.

Por fim, com os avanços tecnológicos que estão ocorrendo na mobilidade urbana, é evidente que haverá transformações profundas no modo como as cidades são estruturadas. Deste modo, este é um tema que ainda demanda muita análise e estudos em investigações futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvez, Fernando M. Brandão. 2003. *Avaliação da Qualidade do Espaço Público Urbano. Proposta Metodológica*. Coimbra: G.C.

ANTT. 2015. Divulgado primeiro balanço da nova concessão da Ponte Rio-Niterói. edição de Ministério da Economia. Brasília. http://www.planejamento.gov.br/assuntos/programa-de-investimento-em-logistica-pil/noticias/divulgado-primeiro-balanco-da-nova-concessao-da-ponte-rio-niteroi.

Awad, E., S. Dsouza, R. Kim, J. Schulz, J. Henrich, A. Shariff, J. F. Bonnefon e I. Rahwan. 2018. "The Moral Machine experiment". *Nature* 563, no. 7729: 59-64. 10.1038/s41586-018-0637-6. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30356211.

Banister, D. 2004. *Transport Planning*. New York: Taylor & Francis e-Library.

Bauman, Zygmunt. 2009. *Confiança e Medo na Cidade*. Traduzido por Eliana Aguiar. Rio de Janeiro: Zahar.

BMVI. 2017. Ethics Commission Automated and Connected Driving. edição de Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure. https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/Documents/G/ethic-commission-report.pdf?__blob=publicationFile.

Bonnefon, J, A Shariff e I. Rahwan. 2016. "The social dilemma of autonomous vehicles". *Science* 352, no. 6293: 1573–76. 10.1126/science.aaf2654. http://science.sciencemag.org.

Bösch, P. M., F. Becker, H. Becker e K. W. Axhausen. 2018. "Cost-based analysis of autonomous mobility services". *Transport Policy* 64, no. 8093: 76-91. 10.1016/j.tranpol.2017.09.005. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.09.005.

Brownell, C e A Kornhauser. 2014. "A Driverless Alternative: Fleet Size and Cost Requirements for a Statewide Autonomous Taxi Network in New Jersey". *Transportation Research Record* 1, no. 2416: 73–81. 10.3141/2416-09. https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2416-09.

Bundesregierung. 2015. Strategy Automated and Connected Driving. Leader remain, lead market, start regular operation. edição de Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. Berlin: BMVI. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile.

Burghout, W, P.J Rigole e I Andréasson. 2015. "Impacts of Shared Autonomous Taxis in a Metropolitan Area". Comunicação apresentada em 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, January. https://www.researchgate.net/publication/298346251.

Burton, Elizabeth e Lynne Mitchell. 2006. *Inclusive Urban Design. Streets for Life*. Oxford: Elsevier.

Calvert, S, T Van den Broek e M Van Noort. 2011. "Modelling Cooperative Driving in Congestion Shockwaves on a Freeway Network". Comunicação apresentada em International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Washington, DC.

Carvalho, C. H. R. 2016. Desafio da Mobilidade Urbana no Brasil. edição de Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília DF. http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2198.pdf.

Cavararo, R. 2017. Classificação e Caracterização dos Espaços Rurais e Urbanos do Brasil. edição de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro RJ. https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100643.pdf

Chu, C. P., C. Y. Wang e S. R. Hu. 2017. "Application of E-Tag in Pricing Road Tolls and Parking Fees for Traffic Congestion Mitigation". *Transportation Research Procedia* 25: 2913-22. 10.1016/j.trpro.2017.05.286.

Ciari, F e K.W. Axhausen. 2012. "Choosing carpooling or carsharing as a mode: Swiss stated choice experiments". Comunicação apresentada em 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, January. http://hdl.handle.net/20.500.11850/91515.

Conceição, L, G Correia e J. P Tavares. 2017. "The deployment of automated vehicles in urban transport systems: a methodology to design dedicated zones". Comunicação apresentada em 20th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2017, Budapest, Hungary. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.025.

Costa, A. G. V, B. M Pegoraro, F Araldi, G. M Oliveira, M Martorelli e P. C Nóbrega. 2013. Política Nacional de Mobilidade Urbana. edição de Ministério das Cidades. Brasília DF: Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana. http://www.portalfederativo.gov.br/noticias/destaques/municipios-devem-implantar-planos-locais-de-mobilidade-urbana/CartilhaLei12587site.pdf

Costa, Álvaro e Ruben Fernandes. 2012. "Urban public transport in Europe: Technology diffusion and market organisation". *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46, no. 2: 269-84. 10.1016/j.tra.2011.09.002. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856411001352?via%3Dihub.

DETRAN/SC. 2018. Frota de veículos. edição de Departamento de Trânsito do Estado de Santa Catarina. Florianópolis SC. http://consultas.detrannet.sc.gov.br/Estatistica/Veiculos/?lst_municipio=8105&lst_ano=2018&lst_mes=0&btn_enviar=.

DOT. 2015. Street Design Manual. edição de Department of Transportation. New York City: DOT. https://www1.nyc.gov/html/dot/html/pedestrians/streetdesignmanual.shtml.

Economist, The. 2018. "A chance to transform urban planning. How autonomous vehicles will reshape cities". *The Economist*. https://www.economist.com/special-report/2018/03/01/a-chance-to-transform-urban-planning.

Ecoponte. 2018. "Ponte Rio-Niterói". https://www.ecoponte.com.br/institucional/a-ecoponte.

Eiró, T. e L M. Martínez. 2014. "Analyzing Impacts of New Shared Transport Alternatives in an Urban Mobility System". Comunicação apresentada em Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington, DC. https://trid.trb.org/view/1288728.

Eisenhammer, Stephen e Brad Haynes. 2017. "Murders, robberies of drivers in Brazil force Uber to rethink cash strategy". *Reuters*. https://www.reuters.com/article/us-uber-tech-brazil-insight-idUSKBN15T0JQ?utm_source=twitter&utm_medium=Social.

Fagnant, D. J. e K. M. Kockelman. 2014. "The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 40: 1-13. 10.1016/j.trc.2013.12.001. http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.001.

———. 2015. "Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations". *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77: 167-81. 10.1016/j.tra.2015.04.003. http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003.

Gehl, Jan. 2013. *Cidades Para Pessoas*. São Paulo: Perspectiva.

Grando, Sérgio José. 1995. Dispõe sobre a utilização de bem público de uso comum do povo, para estacionamento "tipo zona azul" e dá outras providências. Em *4666*. Florianópolis: Câmara de Vereadores. https://leismunicipais.com.br/a/sc/f/florianopolis/lei-ordinaria/1995/466/4666/lei-ordinaria-n-4666-1995-dispoe-sobre-a-utilizacao-de-bem-publico-de-uso-comum-do-povo-para-estacionamento-tipo-zona-azul-e-da-outras-providencias.

Gruel, Wolfgang e Joseph M. Stanford. 2016. "Assessing the Long-term Effects of Autonomous Vehicles: A Speculative Approach". *Transportation Research Procedia* 13: 18-29. 10.1016/j.trpro.2016.05.003.

HCM, National Research Council. 2010. Highway Capacity Manual. edição de Transportation Research Board. Washington, DC.

IBGE. 2018. Panorama Florianópolis. edição de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro RJ. https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/panorama.

IPUF. 2016. Pesquisa de Mobilidade Urbana. edição de Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis. Florianópolis SC. http://observatoriodamobilidadeurbana.ufsc.br/files/2016/05/Pesquisa-PlanMob-Florian%C3%B3polis.pdf.

ITF. 2015. *Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic*. Paris: International Transport Forum. https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf.

Jacobs, Jane. 2011. *The death and life of great American cities*. New York: Random House.

Keeney, T. 2017. *Mobility-as-a-service: Why self-driving cars could change everything*. New York ARK Invest. www.ark-invest.com.

Kitchin, R. 2013. "The real-time city? Big data and smart urbanism". *GeoJournal* 79, no. 1: 1-14. 10.1007/s10708-013-9516-8.

Litman, T. 2018. "Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning". Comunicação apresentada em 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, November. https://www.vtpi.org/avip.pdf.

Luetge, C. 2017. "The German Ethics Code for Automated and Connected Driving". *Philosophy & Technology* 30, no. 4: 547-58. 10.1007/s13347-017-0284-0. https://www.researchgate.net/publication/320011270_The_German_Ethics_Code_for_Automated_and_Connected_Driving.

Luz, Andréa da. 2018. "Com mais de 5 mil vagas na Zona Azul, ainda é difícil estacionar no Centro da Capital". *Notícias do Dia*. https://ndonline.com.br/noticias/com-mais-de-5-mil-vagas-na-zona-azul-ainda-e-dificil-estacionar-no-centro-da-capital/.

Lynch, Kevin. 1960. *The Image of the City*. London: The Mit Press.

Martinez, L. M. e J. M. Viegas. 2017. "Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal". *International Journal of Transportation Science and Technology* 6, no. 1: 13-27. 10.1016/j.ijtst.2017.05.005. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.005.

Meijer, A e M. P. R. Bolívar. 2015. "Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance". *International Review of Administrative Sciences* 82, no. 2: 392-408. 10.1177/0020852314564308.

Melo, Sandra, Patricia Baptista e Álvaro Costa. 2014. "Comparing the Use of Small Sized Electric Vehicles with Diesel Vans on City Logistics". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 111: 350-59. 10.1016/j.sbspro.2014.01.068. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187704281400069X.

Mokhtarian, P e I. Salomon. 2001. "How derived is the demand for travel? Some Conceptual and measurement considerations.". *Transportation Research A* 35, no. 8: 695 – 719 10.1016/S0965-8564(00)00013-6. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00013-6.

Obelheiro, M, B Welle, W Li, C Adriazola, R King, C Sarmiento e Q Liu. 2016. *O Desenho de Cidades Seguras. Diretrizes e exemplos para promover a segurança viária a partir do desenho urbano*. WRI Brasil. https://www.wri.org/sites/default/files/Cities_Safer_By_Design_Portuguese.pdf.

PLAMUS. 2015. Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis. edição de Governo de Santa Cartarina. Florianópolis SC. http://www.spg.sc.gov.br/visualizar-biblioteca/acoes/regiao-metropolitana?limit=10&limitstart=90.

PMF. 2016. Geoprocessamento Corporativo. Florianópolis SC: Prefeitura de Florianópolis. http://geo.pmf.sc.gov.br/.

PMSL. 2016. Avaliação da Infraestrutura Urbana, Viária e da Mobilidade. edição de SMTT. São Luís. https://www.saoluis.ma.gov.br/midias/anexos/2217_etapa_8_plano_de_mobilidade.pdf.

Ramalho, Guilherme. 2018. "Brasil perde R$ 267 bilhões por ano com congestionamentos". *GloboNews*. https://g1.globo.com/globonews/noticia/2018/08/07/brasil-perde-r-267-bi-por-ano-com-congestionamentos.ghtml.

Redação–dc. 2012. "Mapa mostra onde estão as vias ciclísticas de Florianópolis". *Diário Catarinense*. http://dc.clicrbs.com.br/sc/noticias/noticia/2012/10/mapa-mostra-onde-estao-as-vias-ciclisticas-de-florianopolis-3936533.html.

Redação–hsc. 2018. "Calendário escolar em 2019, em Florianópolis, irá até 20 de dezembro". *Hora de Santa Catarina*. http://horadesantacatarina.clicrbs.com.br/sc/geral/noticia/2018/11/calendario-escolar-em-2019-em-florianopolis-ira-ate-20-de-dezembro-10654433.html

SAE. 2018. "Levels of Driving Automation". https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-"levels-of-driving-automation"-standard-for-self-driving-vehicles.

Scaringella, R. 2001. "A crise da mobilidade urbana em São Paulo". *São Paulo em Perspectiva* 15: 55 – 59 10.1590/S0102-88392001000100007 http://dx.doi.org/10.1590/S0102-88392001000100007

Seabra, M. I. C., A. S. M. Pinheiro, C. T. Marcelino, D. A. Santos e J. M. Leitão. 2011. Coleção de Brochuras Técnicas / Temáticas: Contagem e Inquéritos de Tráfego. edição de Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres: Gabinete de Planeamento, Inovação e Avaliação. http://server109.webhostingbuzz.com/~transpor/conferenciamobilidade/pacmob/contagens_trafego/Contagens_e_Inqueritos_de_Trafego_Marco_2011.pdf.

Shaheen, S, A Cohen e I Zohdy. 2016. Shared mobility: current practices and guiding principles. edição de U.S. Department of Transportation. Washington, DC: Federal Highway Administration Office of Operations. https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop16022/fhwahop16022.pdf.

Shaheen, S e M Galczynski. 2014. "Autonomous Carsharing / Taxi Pathways.". https://itspubs.ucdavis.edu/files/carsharing_taxi.pdf.

Shaheen, S, D Sperling e C Wagner. 1998. "Carsharing in Europe and North America: past, present, and future". *Transportation Quarterly* 52, no. 3: 35–52. https://escholarship.org/uc/item/4gx4m05b.

Shaheen, S. A., N. D. Chan e H. Micheaux. 2015. "One-way carsharing's evolution and operator perspectives from the Americas". *Transportation* 42, no. 3: 519-36. 10.1007/s11116-015-9607-0. https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-015-9607-0.

Sivak, M e B Schoettle. 2015. *Influence of Current Nondrivers on the Amount of Travel and Trip Patterns with Self-Driving Vehicles* Sustainable Worldwide Transportation: The University of Michigan. http://umich.edu/~umtriswt/PDF/UMTRI-2015-39.pdf.

Solà-Morales, M. 1987. "La segunda historia del proyecto urbano". *UR* 5. http://hdl.handle.net/2099/3118.

Spieser, K, K Treleaven, R Zhang, E Frazzoli, D Morton e M Pavone. 2014. "Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility-on-Demand Systems - A Case Study in Singapore". *Springer International Publishing*: 1 - 15. http://hdl.handle.net/1721.1/82904.

Teixeira, R, J Said, L Kieling, R. G Osório, P Herculano, G. F Souza, N. C Pirani, et al. 2013. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Brasileiro. edição de IPEA PNUD, FJP. Brasília: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. http://www.atlasbrasil.org.br/2013/data/rawData/publicacao_atlas_municipal_pt.pdf.

Trommer, S, V Kolarova, E Fraedrich, L Kröger, B Kickhöfer, T Kuhnimhof, B Lenz e P Phleps. 2016. *Autonomous Driving - The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour*. Institute for Mobility Research. https://www.researchgate.net/publication/312374304_Autonomous_Driving_-_The_Impact_of_Vehicle_Automation_on_Mobility_Behaviour.

Urmson, Chris, Joshua Anhalt, Drew Bagnell, Christopher Baker, Robert Bittner, M. N. Clark, John Dolan, et al. 2008. "Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge". *Journal of Field Robotics* 25, no. 8: 425-66. 10.1002/rob.20255.

USDOT. 2018. Preparing for the Future of Transportation: Automated Vehicle 3.0. edição de U.S. Department of Transportation. Washington, DC. https://www.transportation.gov/av/3.

Verhoef, E, P Nijkamp e P Rietveld. 1995. "The economics of regulatory parking policies: The (IM)possibilities of parking policies in traffic regulation". *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 29, no. 2: 141-56. 10.1016/0965-8564(94)E0014-Z. https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)E0014-Z.

Vosooghi, R, J Puchinger, M Jankovic e G Sirin. 2017. "A Critical Analysis of Travel Demand Estimation for New One-Way Carsharing Systems". Comunicação apresentada em 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Yokohama, Japan, Oct. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01622293.

WHO. 2018. *Global status report on road safety 2018*. Geneva: World Health Organization. https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo.

Yap, M. D., G. Correia e B. Van Arem. 2015. "Valuation of Travel Attributes for Using Automated Vehicles as Egress Transport of Multimodal Train Trips". *Transportation Research Procedia* 10: 462-71. 10.1016/j.trpro.2015.09.096.

Ye, Yipeng e Hua Wang. 2018. "Optimal Design of Transportation Networks with Automated Vehicle Links and Congestion Pricing". *Journal of Advanced Transportation* 2018: 1-12. 10.1155/2018/3435720.

ZAP. 2019. *Índice FipeZap de Preços de Imóveis Anunciados*. São Paulo: Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. http://fipezap.zapimoveis.com.br/wp-content/uploads/2019/02/fipezap-201901-residencial-venda.pdf.

Zheng, Y, L Capra, O Wolfson e H Yang. 2014. "Urban Computing". *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 5, no. 3: 1-55. 10.1145/2629592.

APÊNDICES

A.1. Levantamento da taxa de ocupação de veículos na Ponte Pedro Ivo Campos

Estudo: Avaliação da taxa de ocupação
Cidade: Florianópolis - SC / Brasil
Secção: Ponte Pedro Ivo Campos
Colaborador: Eduardo Corrêa

Data: 19/12/2018 Seg, Ter, Qua, Qui, Sex, Sab, Dom

Inicio: 06:00 Fim: 22:15

Etapa de contagem: 15 min
Tempo: 16:15
Observações: Contagem direcional em secção.

Período n° 1	Período n° 2	Período n° 3
Veículos ligeiros: 06:00 - 06:15	Veículos ligeiros: 07:00 - 07:15	Veículos ligeiros: 08:00 - 08:15
Taxa de ocupação 1: 83v - 83p	Taxa de ocupação 1: 211v - 211p	Taxa de ocupação 1: 218v - 218p
Taxa de ocupação 2: 53 - 106p	Taxa de ocupação 2: 105v - 210p	Taxa de ocupação 2: 115v - 230p
Taxa de ocupação 3: 9 - 27p	Taxa de ocupação 3: 21v - 63p	Taxa de ocupação 3: 15v - 45p
Taxa de ocupação 4: 4 - 16p	Taxa de ocupação 4: 7v - 28p	Taxa de ocupação 4: 4v - 16p
Taxa de ocupação 5: 2 - 10p	Taxa de ocupação 5: 3v - 15p	Taxa de ocupação 5: 2v - 10p
Ocupação Média: 1,6 pessoas	Ocupação Média: 1,51 pessoas	Ocupação Média: 1,46 pessoas
UVE: 151	UVE: 347	UVE: 354

Período n° 4	Período n° 5	Período n° 6
Veículos ligeiros: 09:00 - 09:15	Veículos ligeiros: 10:00 - 10:15	Veículos ligeiros: 11:00 - 11:15
Taxa de ocupação 1: 159v - 159p	Taxa de ocupação 1: 140v - 140p	Taxa de ocupação 1: 111v - 111p
Taxa de ocupação 2: 81v - 162p	Taxa de ocupação 2: 71v - 142p	Taxa de ocupação 2: 57v - 114p
Taxa de ocupação 3: 19v - 57p	Taxa de ocupação 3: 16v - 48p	Taxa de ocupação 3: 10v - 30p
Taxa de ocupação 4: 8v - 32p	Taxa de ocupação 4: 5v - 20p	Taxa de ocupação 4: 3v - 12p
Taxa de ocupação 5: 4v - 20p	Taxa de ocupação 5: 2v - 10p	Taxa de ocupação 5: 2v - 10p
Ocupação Média: 1,58 pessoas	Ocupação Média: 1,53 pessoas	Ocupação Média: 1,51 pessoas
UVE: 271	UVE: 234	UVE: 183

Período n° 7	Período n° 8	Período n° 9
Veículos ligeiros: 12:00 - 12:15	Veículos ligeiros: 13:00 - 13:15	Veículos ligeiros: 14:00 - 14:15
Taxa de ocupação 1: 125v - 125p	Taxa de ocupação 1: 124v - 124p	Taxa de ocupação 1: 118v - 118p
Taxa de ocupação 2: 55v - 110p	Taxa de ocupação 2: 72v - 144p	Taxa de ocupação 2: 59v - 118p
Taxa de ocupação 3: 14v - 42p	Taxa de ocupação 3: 17v - 51p	Taxa de ocupação 3: 19v - 57p
Taxa de ocupação 4: 3v - 12p	Taxa de ocupação 4: 2v - 8p	Taxa de ocupação 4: 0v - 0p
Taxa de ocupação 5: 0v - 0p	Taxa de ocupação 5: 3v - 15p	Taxa de ocupação 5: 2v - 10p
Ocupação Média: 1,47 pessoas	Ocupação Média: 1,57 pessoas	Ocupação Média: 1,53 pessoas
UVE: 197	UVE: 218	UVE: 198

Período n° 10	Período n° 11	Período n° 12
Veículos ligeiros: 15:00 - 15:15	Veículos ligeiros: 16:00 - 16:15	Veículos ligeiros: 17:00 - 17:15
Taxa de ocupação 1: 107v - 107p	Taxa de ocupação 1: 121v - 121p	Taxa de ocupação 1: 95v - 95p
Taxa de ocupação 2: 58v - 116p	Taxa de ocupação 2: 61v - 122p	Taxa de ocupação 2: 88v - 176p
Taxa de ocupação 3: 5v - 15p	Taxa de ocupação 3: 20v - 60p	Taxa de ocupação 3: 18v - 54p
Taxa de ocupação 4: 4v - 16p	Taxa de ocupação 4: 0v - 0p	Taxa de ocupação 4: 7v - 49p
Taxa de ocupação 5: 2v - 10p	Taxa de ocupação 5: 1v - 5p	Taxa de ocupação 5: 3v - 15p
Ocupação Média: 1,5 pessoas	Ocupação Média: 1,51 pessoas	Ocupação Média: 1,84 pessoas
UVE: 176	UVE: 203	UVE: 211

A.2. Levantamento da taxa de ocupação de veículos na Ponte Pedro Ivo Campos

Estudo: Avaliação da taxa de ocupação
Cidade: Florianópolis - SC / Brasil
Secção: Ponte Pedro Ivo Campos
Colaborador: Eduardo Corrêa

Data: 19/12/2018 Seg, Ter, Qua, Qui, Sex, Sab, Dom

Inicio: 06:00 Fim: 22:15

Etapa de contagem: 15 min
Tempo: 16:15
Observações: Contagem direcional em secção.

Período n° 13	Período n° 14	Período n° 15
Veículos ligeiros: 18:00 - 18:15	Veículos ligeiros: 19:00 - 19:15	Veículos ligeiros: 20:00 - 20:15
Taxa de ocupação 1: 93v - 93p	Taxa de ocupação 1: 105v - 105p	Taxa de ocupação 1: 99v - 99p
Taxa de ocupação 2: 82v - 164p	Taxa de ocupação 2: 53v - 106p	Taxa de ocupação 2: 47v - 94p
Taxa de ocupação 3: 7v - 21p	Taxa de ocupação 3: 14v - 42p	Taxa de ocupação 3: 9v - 27p
Taxa de ocupação 4: 2v - 8p	Taxa de ocupação 4: 3v - 12p	Taxa de ocupação 4: 2v - 8p
Taxa de ocupação 5: 3v - 15p	Taxa de ocupação 5: 0v - 0p	Taxa de ocupação 5: 1v - 5p
Ocupação Média: 1,6 pessoas	Ocupação Média: 1,51 pessoas	Ocupação Média: 1,47 pessoas
UVE: 187	UVE: 175	UVE: 158

Período n° 16	Período n° 17	TOTAL
Veículos ligeiros: 21:00 - 21:15	Veículos ligeiros: 22:00 - 22:15	Veículos ligeiros:
Taxa de ocupação 1: 70v - 70p	Taxa de ocupação 1: 66v - 66p	Taxa de ocupação 1: 2045v - 2045p
Taxa de ocupação 2: 45v - 90p	Taxa de ocupação 2: 68v - 136p	Taxa de ocupação 2: 1170v - 2340p
Taxa de ocupação 3: 5v - 15p	Taxa de ocupação 3: 3v - 9p	Taxa de ocupação 3: 221v - 663p
Taxa de ocupação 4: 2v - 8p	Taxa de ocupação 4: 0v - 0p	Taxa de ocupação 4: 56v - 224p
Taxa de ocupação 5: 0v - 0p	Taxa de ocupação 5: 0v - 0p	Taxa de ocupação 5: 30v - 150p
Ocupação Média: 1,5 pessoas	Ocupação Média: 1,54 pessoas	Ocupação Média: 1,53 pessoas
UVE: 122	UVE: 137	UVE: 3522