

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES
INTERNACIONAIS**

Jéssica Regis Pereira

**DESLOCAMENTO RODOVIÁRIO ILHA-CONTINENTE
NA GRANDE FLORIANÓPOLIS: UM MODELO
COMPUTACIONAL BASEADO EM AGENTES**

Florianópolis

2018

Jéssica Regis Pereira

**DESLOCAMENTO RODOVIÁRIO ILHA-CONTINENTE
NA GRANDE FLORIANÓPOLIS: UM MODELO
COMPUTACIONAL BASEADO EM AGENTES**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Economia para
a obtenção do Grau de Mestrado.
Orientador: Prof. Dr. Jaylson Jair da
Silveira

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Regis Pereira, Jéssica

Deslocamento rodoviário ilha-continente na Grande Florianópolis : um modelo computacional baseado em agentes / Jéssica Regis Pereira ; orientador, Jaylson Jair Silveira, 2018.

72 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Sócio-Econômico, Programa de Pós Graduação em Economia, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Economia. 2. Modelo computacional baseado em agentes. 3. Grande Florianópolis. 4. Deslocamento rodoviário urbano. I. Jair Silveira, Jaylson. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Economia. III. Título.

Jéssica Regis Pereira

**DESLOCAMENTO RODOVIÁRIO ILHA-CONTINENTE
NA GRANDE FLORIANÓPOLIS: UM MODELO
COMPUTACIONAL BASEADO EM AGENTES**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestrado”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Economia.

Florianópolis, 28 de fevereiro 2018.

Prof. Dr. Jaylson Jair da Silveira
Coordenador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaylson Jair da Silveira
Orientador

Prof. Dra. Dinorá Baldo Faveri
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Guilherme Valle de Moura
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Helbert João França Almeida
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

O propósito desta pesquisa é o desenvolvimento de um modelo computacional baseado em agentes por meio do qual se possa analisar o deslocamento de pessoas entre as partes insular e continental da Região da Grande Florianópolis, que, até o momento, pode ser realizado exclusivamente através das pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles. Averiguou-se, através de simulações, se uma das sugestões indicadas pelo Plano de Mobilidade Urbana Sustentável de Florianópolis (PLAMUS) como amenizadora dos problemas de tráfego, a implementação de faixas reversíveis nas pontes, é, de fato, maximizadora de bem-estar social. O modelo demonstrou que esta medida é uma boa alternativa de política de curto prazo na região da Grande Florianópolis, mas somente quando se reverte no máximo uma faixa por horário. Caso haja mais do que uma pista reversível em um dos horários, melhoras na qualidade dos deslocamentos dos moradores do continente implicam ônus para os moradores da ilha, resultando em menor satisfação da população de agentes como um todo.

Palavras-chave: Modelo computacional baseado em agentes. Deslocamento rodoviário urbano. Grande Florianópolis.

ABSTRACT

The purpose of this research is the development of an agent-based computational model to analyze the displacement of people between the island and the continent part of Florianópolis metropolitan area, which still can be done exclusively through the bridges Pedro Ivo Campos and Colombo Salles. It was verified, through simulations, if one of the suggestions indicated by the Sustainable Urban Mobility Plan of Florianópolis (PLAMUS) to ease traffic problems, the implementation of reversible lanes in the bridges, is, indeed, a social welfare maximizer. The model showed that this suggestion is a good short term policy alternative for the region, but only when a maximum of one lane each time is reversed. When more than one lane is reversed, improvements in the quality of the continent residents' displacements imply a disturbance FOR the island residents, resulting in a lower satisfaction of all the agents' population.

Keywords: Agent-based computational model. Urban road displacement. Grande Florianópolis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Os horários disponíveis.	26
Tabela 2	As estratégias possíveis.	27
Tabela 3	Meios de transporte e horários de deslocamento disponíveis para cada tipo de agente	29
Tabela 4	Campo de escolha de cada tipo de agente.....	29
Tabela 5	Tempo de estacionamento	36
Tabela 6	Definindo o número de agentes e de veículos do modelo.	38
Tabela 7	Número de agentes e de veículos considerados no modelo.	39
Tabela 8	Descrição das K variáveis tomadas como referência para o processo de calibração.....	43
Tabela 9	Valores calibrados dos parâmetros	44
Tabela 10	Valores estimados das variáveis centrais, d_k , tomadas como referência	47
Tabela 11	Número de faixas por sentido por horário adotado em cada combinação	69

SUMÁRIO

Introdução	13
1 MOBILIDADE URBANA EM FLORIANÓPOLIS	17
1.1 MODELOS BASEADOS EM AGENTES E COMPLEXI- DADE	21
2 UM MODELO COMPUTACIONAL BASEADO EM AGENTES	25
2.1 ESTRUTURA ANALÍTICA DO MODELO	25
2.2 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E APRESENTAÇÃO DE DADOS	38
3 CALIBRAÇÃO E PROPRIEDADES EMERGEN- TES	43
3.1 UM EXPERIMENTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS	51
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A – As 46 combinações consideradas no experimento de políticas públicas exposto na Seção 3.1.	69

INTRODUÇÃO

A economia gira em torno de relações de troca entre indivíduos, firmas e governo e grande parte dessas relações requer o deslocamento de bens e pessoas. Logo, um bom funcionamento da economia depende cada vez mais de sistemas de transporte e logística eficientes. Entretanto, no Brasil o crescimento das frotas de veículos junto à falta de planejamento tem causado diversos transtornos à sociedade, tais como congestionamentos, maior dispêndio de tempo para realização de trajetos, crescente emissão de poluentes, além de constantes acidentes de trânsito. Devido a todas essas externalidades negativas geradas por um sistema de transporte ineficiente, faz-se necessário promover políticas, regras e condições que visem à melhoria deste quadro. Logo, estudos que caracterizem o setor de transportes e que propiciem informações que possam favorecer a alocação ótima de recursos tornam-se fundamentais.

Considerando isto, na presente dissertação, elabora-se um modelo capaz de caracterizar o deslocamento de pessoas entre ilha e continente na região da Grande Florianópolis, o qual permite, através de simulações computacionais, a avaliação do impacto de políticas públicas no sistema de transporte como um todo.

Para tanto, fez-se uso da modelagem baseada em agentes que, segundo Macal e North (2005), oferece um modo de representar e analisar sistemas sociais compostos por agentes que interagem entre si, influenciam uns aos outros, aprendem com suas experiências e adaptam seus comportamentos para melhor se adequarem ao seu ambiente.

Tomou-se como ponto de partida para o desenvolvimento desta pesquisa a contribuição de Avancini e Silveira (2016), os quais elaboraram um modelo computacional baseado em agentes que visava à análise do transporte de passageiros no deslocamento ilha-continente na cidade de Florianópolis. Neste modelo, os agentes, ao fazerem suas escolhas em relação ao modal de transporte utilizado e ao horário de partida em seus deslocamentos casa-trabalho, podem optar por uma dentre quatro estratégias hipotéticas: (1) deslocar-se de carro no horário 1, (2) deslocar-se de carro no horário 2, (3) deslocar-se de ônibus no horário 1 ou (4) ir de ônibus no horário 2.

Suas escolhas dependem de suas preferências, representadas por suas funções utilidade. As preferências dos agentes levam em conta motivações observáveis (atributos da estratégia em si) e motivações não-observáveis (características idiossincráticas do próprio agente). As

primeiras compõem o termo determinístico da função utilidade; as últimas, o termo aleatório.

O termo determinístico é ainda fracionado em duas componentes: a utilidade determinística social e a utilidade determinística privada. A social representa a inclusão de externalidade de rede ao modelo, a qual introduz a possibilidade de que a escolha de cada agente seja afetada pelas escolhas dos demais. A privada, por sua vez, representa toda utilidade determinística não associada à externalidade de rede.

No referido trabalho, assume-se que a utilidade determinística privada é explicada somente pela variável custo e considera-se que a utilidade determinística social é explicada somente pela variável tempo quando associada às estratégias (1) e (2), alusivas aos deslocamentos feitos através de automóveis, e pelas variáveis tempo e grau de lotação quando relacionada às estratégias (3) e (4), concernentes aos deslocamentos feitos de ônibus.

Embora o modelo de Avancini e Silveira (2016) tenha sido tomado como referência, este foi apenas um ponto de partida, já que há algumas hipóteses restritivas no modelo em questão, as quais foram substituídas por hipóteses alternativas visando a obtenção de um modelo que represente de forma mais adequada a realidade do sistema de transporte na Grande Florianópolis.

Uma dessas hipóteses restritivas assume a existência de faixas exclusivas para ônibus nas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles e, portanto, que o tempo médio de deslocamento dos usuários de transporte público não é afetado por congestionamentos. No entanto, esta faixa exclusiva para transporte coletivo não se consolidou como tal, o que leva a crer que os usuários de ônibus sejam tão afetados pelo congestionamento quanto os usuários de veículo particular. Logo, buscou-se adaptar o modelo a esta realidade.

Ademais, o modelo proposto por Avancini e Silveira (2016) torna impossível a possibilidade de escassez de oferta de transporte público, já que a capacidade do sistema de transporte coletivo é exatamente igual ao número de agentes. Contudo, acredita-se que um modelo que apresente um sistema de transporte coletivo com capacidade limitada seja mais condizente com a realidade e, por conseguinte, o modelo aqui implementado abrange tal possibilidade.

Por fim, além da alteração de hipóteses do modelo tomado como referência, estudou-se com mais afinco o processo de decisão dos usuários de transporte, visando principalmente à identificação de características relevantes, porém, omissas no modelo de Avancini e Silveira (2016).

O desenvolvimento de um modelo computacional baseado em

agentes com parâmetros calibrados a partir de dados publicamente disponíveis sobre certas características estruturais do transporte urbano da Grande Florianópolis permitiu a realização de experimentos, via simulações computacionais, que tornaram possível a avaliação do impacto de políticas públicas na mobilidade urbana da região estudada.

Esta pesquisa tem por objetivo geral analisar a demanda por meios de transportes rodoviários urbanos na Grande Florianópolis, com foco no deslocamento ilha-continente, exclusivo de pessoas, considerando-se a possibilidade única de acesso - pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles - por meio de modelagem computacional baseada em agentes, que leva em consideração não só as características dos agentes, mas também a interação destes entre si e com o ambiente que coevolui com suas escolhas individuais.

Os objetivos específicos são (1) elaborar e implementar um modelo computacional baseado em agentes, a fim de representar adequadamente o processo decisório dos usuários de transportes na região da Grande Florianópolis, frente às alternativas de deslocamento disponíveis; (2) através de simulações computacionais, averiguar que políticas públicas, ou alterações de que variáveis estruturais, afetam de forma benéfica a mobilidade urbana na região estudada e (3) analisar possíveis impactos da implementação de faixas reversíveis nas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles, sendo a análise dos impactos de curto prazo desta proposição de política de mobilidade urbana o foco principal desta dissertação.

No primeiro capítulo desta pesquisa, apresentam-se dados acerca da mobilidade urbana na Região de Florianópolis, tais como: o número de veículos existentes na Região da Grande Florianópolis e em cada município que a compõem, individualmente; a taxa de variação da frota veicular ao longo dos anos; e a evolução da taxa de motorização da Região da Grande Florianópolis na última década. Exibe-se, além disso, a proporção de habitantes que realizam deslocamento pendular e a posição de Florianópolis de acordo com alguns índices de mobilidade urbana. Ainda no Capítulo 1 são retomados certos aspectos teóricos a respeito de modelos computacionais baseados em agentes, relacionando-os com o conceito de complexidade. No Capítulo 2, desenvolve-se, de fato, o modelo proposto, iniciando-se pela descrição da estrutura analítica do mesmo e, na sequência, expondo como se deu sua implementação computacional. Por fim, o Capítulo 3 trata da calibração do modelo, dos resultados por ele retornados, bem como da execução de um experimento computacional de política pública.

1 MOBILIDADE URBANA EM FLORIANÓPOLIS

Este capítulo tem por finalidade a exposição de algumas informações acerca do sistema de transporte rodoviário urbano da região da Grande Florianópolis, a qual, de acordo com o PLAMUS (2014), é composta por 13 municípios, quais sejam: Águas Mornas, Angelina, Anitápolis, Antônio Carlos, Biguaçu, Florianópolis, Governador Celso Ramos, Palhoça, Rancho Queimado, Santo Amaro da Imperatriz, São Bonifácio, São José e São Pedro de Alcântara.

A frota de veículos da região da Grande Florianópolis apresenta-se cada vez maior com o passar dos anos. Analisando-se o período de 2008 a 2017, a variação da frota foi de 158%, o que equivale, em termos absolutos, a um salto de 444.165 para 702.807 veículos, conforme o Departamento de Trânsito de Santa Catarina (DETRAN/SC, 2017).

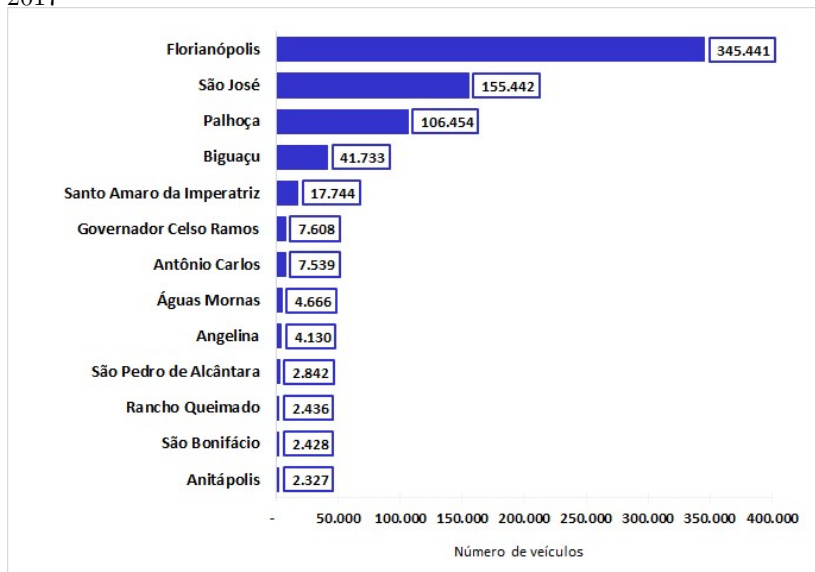
Os municípios que apresentaram maiores aumentos em suas frotas, neste período, foram Florianópolis (+107.449 veículos), São José (+59.581), Palhoça (+52.497) e Biguaçu (+18.496). Individualmente, os municípios da Grande Florianópolis tiveram suas frotas aumentadas em 65%, em média. Entretanto, destaca-se que os município de Palhoça e Biguaçu destoaram da média da região, uma vez que apresentaram crescimento de 97,3% e 79,59% em suas frotas, respectivamente. Isto é, Palhoça teve sua frota veicular quase que dobrada na última década.

Como é de se esperar, a distribuição da frota da Grande Florianópolis entre os municípios que compõem esta região não é uniforme. Segundo o DETRAN/SC (2017), valores referentes a dezembro de 2017, acumulam a maior parte do total da frota da Grande Florianópolis os municípios de Florianópolis, que corresponde a 49,29% da frota da região, São José, com acúmulo de 22,18%, Palhoça, com 15,19% e Biguaçu, com participação de 5,96% da frota. Os demais municípios somados correspondem a 7,38% da frota veicular da região, conforme ilustrado na Figura 1.

Em se tratando da tipificação dos veículos que compõem a frota da Grande Florianópolis, verifica-se uma predominância dos carros que, até dezembro de 2017, somavam 463.295, o que corresponde a 66,1% dos veículos da região. Em segundo lugar aparecem as motos (20,4%), seguidas dos caminhões (7,8%), dos ônibus (0,7%) e, por fim, o grupo “outros” (5,6%), que inclui tipos veiculares como reboques, tratores e triciclos.

A Figura 2, mostra a taxa de motorização referente à região da Grande Florianópolis, bem como a taxa de motorização do município

Figura 1 – Frota veicular de cada município da Grande Florianópolis - 2017

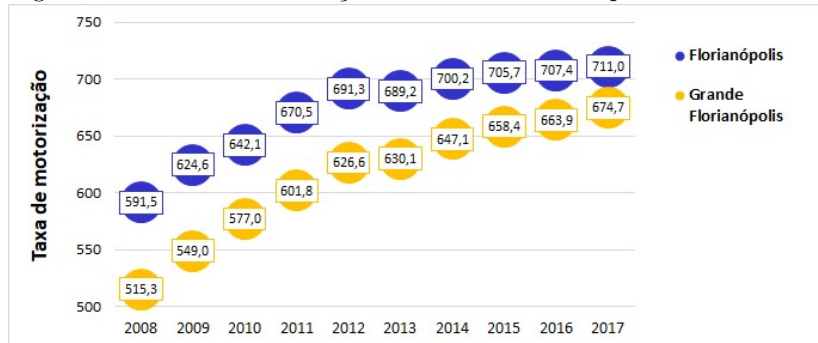


Fonte: Elaboração Própria. **Dados:** DETRAN/SC.

de Florianópolis individualmente. Taxa de motorização é um indicador bastante utilizado para avaliar sistemas de transportes e equivale ao número total de veículos sobre o número total de habitantes de uma determinada região, em um dado período. A fim de facilitar a análise dos dados, costuma-se multiplicar o valor encontrado por 100 ou 1000. Percebendo que mundialmente a multiplicação por 1000 é mais usual, esta foi a metodologia empregada. Assim, uma taxa de motorização igual a 500, por exemplo, significa que a cada mil habitantes, há 500 veículos em uma determinada localidade.

A taxa de motorização da Grande Florianópolis, que em 2008 era equivalente a 515,3, passou a ser, conforme se observa na Figura 2, igual a 674,7 no final de 2017. Ou seja, em menos de uma década, este índice apresentou um crescimento de 30%. O município de Florianópolis tem sua taxa de motorização mais alta que a média da região no decorrer de todo o período em análise, chegando a um total de 711 veículos a cada mil habitantes no ano de 2017. Contudo, nota-se que, ao longo dos anos, a diferença entre as taxas de motorização do município de Florianópolis e da região da Grande Florianópolis têm se reduzido. A

Figura 2 – Taxa de motorização da Grande Florianópolis - 2008 a 2017



Fonte: Elaboração Própria. **Dados:** IBGE e DETRAN/SC

diferença que em 2008 foi de 14%, atualmente corresponde a apenas 5%.

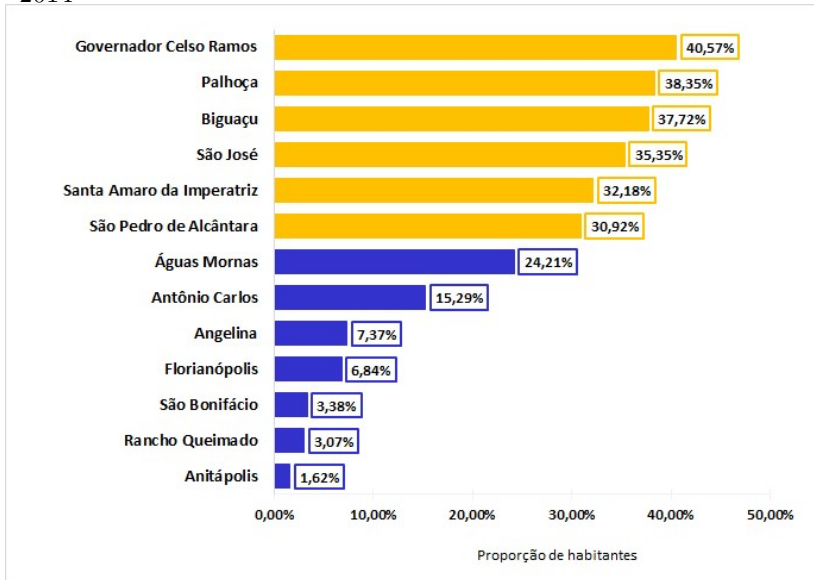
Grande parte dos habitantes da Grande Florianópolis moram em um dos municípios desta região e trabalham em outro - fenômeno que é chamado de deslocamento pendular. É o que mostra uma pesquisa realizada pela FECOMÉRCIO/SC (2014), que reporta a proporção dos habitantes de cada município de Santa Catarina que se comportam desta maneira. A Figura 3, mostra estas proporções no que se refere a cada um dos municípios da Grande Florianópolis.

Conforme se observa na Figura 3, uma expressiva parcela dos trabalhadores dos municípios de Governador Celso Ramos, Palhoça, São José, Santo Amaro da Imperatriz e São Pedro de Alcântara deslocam-se para outros municípios diariamente para exercerem suas atividades laborais. Note que os municípios recém elencados coincidem com as barras em amarelo na Figura 3, que foi elaborada desta forma pois a FECOMÉRCIO/SC (2014) destacou que os trabalhadores destes municípios têm como principal destino o município de Florianópolis.

Ocorre ainda que na Região Metropolitana de Florianópolis há uma utilização de veículo particular bastante acima da média nacional (PLAMUS, 2014). Nesta região, 48% das viagens são feitas através de veículo particular - carro ou motocicleta - enquanto a média nacional é de 32%, em média.

Ainda segundo o PLAMUS (2014), 75% dos veículos que cruzam as pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles por dia são carros e 13% são motocicletas, sendo que estes veículos, que são capazes de transportar 11 mil pessoas, ocupam 90% da capacidade das referidas pontes. Em

Figura 3 – Proporção de habitantes que trabalham em outro município - 2014



Fonte: Elaboração Própria. Dados: FECOMÉRCIO/SC.

contrapartida, 3% dos veículos que as atravessam diariamente são ônibus, os quais transportam também 10 mil pessoas, mas ocupam apenas 1% da capacidade das pontes.

Assim, de acordo com o PLAMUS (2014), a junção das altas proporções de deslocamento pendular com a dominante preferência por uso de veículo particular são fatores chave para o agravamento dos congestionamentos nas pontes que ligam continente e ilha em Florianópolis.

Não é à toa que comumente a cidade de Florianópolis é apontada como a pior ou aparece entre as piores cidades do país e do mundo no tocante à mobilidade urbana. Um dos índices que demonstram tais resultados é o *Driver Satisfaction Index Score*, desenvolvido pelo aplicativo de tráfego, *Waze*. Este índice se baseia em 23 critérios agrupados em 6 categorias: tráfego (frequência e intensidade dos congestionamentos), segurança (número de acidentes), qualidade das vias, serviços para os motoristas (postos de gasolina e estacionamentos), economia social (acesso a carros e valor de itens relacionados) e “*Wazeyness*” (quão colaborativa a comunidade do *Waze* é naquela região). Seu valor pode variar de 1 a 10, sendo atribuído o valor máximo para as localidades

em que os motoristas estejam mais satisfeitos. O índice foi calculado para 38 países e 186 cidades do mundo, tendo o Brasil ficado em 20^o lugar no *ranking* dos países, com índice de 5,4. No *ranking* das cidades analisadas, Florianópolis ficou na 158^a posição, com índice de 4,18 e São José, ainda pior, ficou com o 162^o lugar, cabendo-lhe o índice de 3,96.

O índice reportado pelo *Waze* é bastante subjetivo, já que considera a avaliação apenas dos motoristas que usam o referido aplicativo. Portanto, expõe-se ainda um outro índice, desenvolvido por Medeiros (2006), o qual analisa 21 das capitais brasileiras fazendo um estudo bastante técnico que considera primordialmente fatores topográficos, acessibilidade e grau de integração da malha viária. Neste estudo Florianópolis foi apontada como a pior cidade do Brasil e a 2^a pior do mundo no quesito mobilidade urbana.

Segundo o PLAMUS (2014), se nenhuma atitude for tomada a fim de proporcionar melhorias reais na mobilidade urbana da região da Grande Florianópolis, haverá um colapso nas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles até o ano de 2019. A fim de amenizar os problemas de tráfego desta região, o PLAMUS (2014) apresentou algumas sugestões de ações imediatas. Entre elas está a implementação de faixas reversíveis nas pontes Pedro Ivo e Colombo Salles. A análise da eficácia desta ação de curto prazo, é o foco central deste trabalho.

1.1 MODELOS BASEADOS EM AGENTES E COMPLEXIDADE

De acordo com Freitas (2003), um sistema pode ser considerado complexo quando apresentar três características: (1) o sistema deve ser composto por diversos agentes, com capacidade de se adaptar à mudanças no ambiente em que estejam inseridos, (2) os agentes do sistema devem interagir entre si de maneira direta, sendo a decisão de cada um deles afetada pelas dos demais e (3) o sistema deve gerar padrões agregados que emergem da interação destes agentes.

Assim, pode se dizer que o tema desta pesquisa, o deslocamento urbano de pessoas na Grande Florianópolis, é um fenômeno complexo, uma vez que envolve a escolha individual de inúmeros tomadores de decisão - os usuários de transportes - os quais tomam seu histórico de deslocamentos, suas experiências passadas, como embasamento para decisões futuras, ou seja, adaptam-se. Além disso, a decisão de cada agente afeta a dos demais, já que quando um agente escolhe deslocar-se em um tempo e espaço, ele muda as condições do ambiente, aumentando o fluxo de usuários, por exemplo.

A fim de viabilizar a análise da eficácia da implementação de faixas reversíveis nas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles será empregado um modelo computacional baseado em agentes, que é uma metodologia tipicamente utilizada para estudar sistemas complexos.

Modelos baseados em agentes, conforme Macal e North (2005), é um modo de representar formalmente sistemas sociais que são compostos por agentes que interagem e influenciam uns aos outros, que aprendem com suas experiências e que adaptam seus comportamentos a fim de melhor adequar-se aos seus respectivos ambientes.

Bonabeau (2002) explica que um sistema é modelado a partir de um conjunto de entidades tomadoras de decisão chamadas de agentes. Cada um dos agentes analisa a situação em que se encontra e toma decisões com base em um conjunto de regras. Os agentes comportam-se de acordo com o sistema que representam. Interações repetitivas entre os agentes são uma característica da modelagem baseada em agentes, que usa da capacidade de simulação computacional para explorar dinâmicas que estão fora do alcance de outros métodos formais de análise.

Ainda segundo Bonabeau (2002), mesmo os modelos computacionais baseados em agentes mais simples podem exibir padrões de comportamento complexos e proporcionar informações valiosas sobre a dinâmica do sistema do mundo real que o modelo se propôs a simular. Ademais, o autor elenca como principais vantagens da modelagem computacional baseada em agentes a capacidade de capturar fenômenos emergentes e a flexibilidade.

Modelos computacionais baseados em agentes, conforme Macal e North (2005), possuem três elementos típicos: (1) um conjunto de agentes, seus atributos e comportamentos; (2) um conjunto de relacionamento entre os agentes e métodos de interação; e (3) o ambiente dos agentes, já que os agentes interagem não só entre si como também com o ambiente em que são inseridos.

A característica mais importante de um agente, segundo Macal e North (2005), é sua capacidade de agir de forma autônoma. Os agentes são dotados de comportamentos que permitem que ele tome decisões independentes. Além disso, os agentes são tipicamente ativos, o que faz com que eles tomem ações visando ao alcance de objetivos próprios, e não meramente passivos, caso em que apenas reagiriam às ações de outros agentes e do ambiente. Os agentes são também sociais e adaptativos. Ou seja, ocorrem interações dinâmicas entre agentes, as quais influenciam seus comportamentos e, além disso, os agentes possuem a habilidade de aprender e adaptar seus comportamentos de acordo com a acumulação de suas próprias experiências.

Modelos computacionais baseados em agentes, conforme a própria definição, devem apresentar mecanismos de interação dos agentes entre si. Segundo Macal e North (2005), os agentes interagem entre si, mas, assim como no mundo real, isso não significa que todos os agentes interagem diretamente com todos os outros agentes em todos os períodos analisados. Ao contrário, agentes normalmente interagem apenas com um subconjunto de outros agentes, denominado vizinhança. Os agentes obtêm informações a partir de interações com outros agentes que pertençam a sua vizinhança (e não de todo e qualquer agente) e do ambiente em que está localizado (e não necessariamente do ambiente como um todo). Geralmente a vizinhança dos agentes muda rapidamente conforme o desenrolar do processo de interação e a movimentação dos agentes no espaço.

2 UM MODELO COMPUTACIONAL BASEADO EM AGENTES

Este capítulo tem como escopo a exposição do modelo computacional baseado em agentes a ser utilizado para analisar o deslocamento de pessoas entre as partes insular e continental da região da Grande Florianópolis, que, até o momento, pode ser realizado exclusivamente através das pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles.

Inicia-se tal exposição pela descrição da estrutura analítica do modelo e, posteriormente, trata-se da implementação computacional deste. Em seguida, apresentam-se o método e os resultados da calibração do modelo.

2.1 ESTRUTURA ANALÍTICA DO MODELO

Dentre os veículos que atravessam, diariamente, as pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles, cerca de 95% realiza deslocamento pendular (PLAMUS, 2014). Isto é, a cada dia, 95% dos veículos que atravessam uma das pontes, fazem o deslocamento inverso, regressando à sua origem através da outra.

O modelo aqui proposto será construído sob a hipótese de que todos os agentes deslocam-se pendularmente, devendo cada um deles, diariamente, sair de sua residência, atravessar uma das pontes, realizar uma determinada atividade e voltar para casa.

A cada dia, os agentes devem determinar de que maneira irão se deslocar, escolhendo uma, dentre as estratégias a eles disponíveis. Cada estratégia carrega três informações referentes ao modo de deslocamento dos agentes: (1) meio de transporte, (2) horário de ida e (3) horário de volta.

Os agentes podem atravessar as pontes através de carro ou ônibus, de forma que a escolha entre um ou outro é feita uma única vez ao dia. Ou seja, admite-se que, a cada dia, cada um dos agentes realiza tanto o trajeto de ida quanto o de volta, necessariamente, através do mesmo meio de transporte, só podendo optar por outro no dia seguinte.

Sete alternativas de horários estão à disposição dos agentes, quais sejam: $\{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6 \text{ e } h_7\}$. Os intervalos de tempo associados a cada um desses horários podem ser encontrados na Tabela 1.

Note, na Tabela 1, que os deslocamentos foram limitados ao intervalo compreendido entre às 06h e às 22h, por ser, este, o mesmo

Tabela 1 – Os horários disponíveis.

Horário	Intervalo de tempo	Nº de horas no intervalo
h_1	06h - 07h	1h
h_2	07h - 08h	1h
h_3	08h - 12h	4h
h_4	12h - 13h	1h
h_5	13h - 18h	5h
h_6	18h - 19h	1h
h_7	19h - 22h	3h

Fonte: Elaboração própria.

entremeio considerado nos estudos apresentados no Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis, PLAMUS (2014), cujos dados serão amplamente utilizados.

Cabe ressaltar que nenhum dos agentes pode escolher h_7 para realizar o trajeto de ida. Se pudessem, o agente que escolhesse h_7 não disporia de qualquer opção de horário para fazer o trajeto de volta, o que acabaria por violar a hipótese de deslocamento pendular. Da mesma forma, o horário h_1 não pode ser escolhido por nenhum dos agentes como horário de volta, haja vista a inexistência da possibilidade de que qualquer um deles tenha realizado seu movimento de ida antes de h_1 , ou seja, se ainda não foram, não é cabível que estejam voltando.

Dadas as considerações preliminares, exibem-se, na Tabela 2, as 42 estratégias exequíveis do modelo desenvolvido, além dos atributos concernentes a cada uma delas. De acordo com a referida tabela, as estratégias identificadas com a numeração de 1 à 21, são associadas ao meio de transporte “carro”, enquanto as demais se relacionam ao meio de transporte “ônibus”. Em se tratando dos horários, cada estratégia representa uma combinação de horário de ida e de volta, dadas as hipóteses supracitadas.

Uma vez discernidas as estratégias, instaura-se a caracterização dos agentes que, neste modelo, não são idênticos entre si no tocante aos seus campos de escolha. Aponta-se que 56% dos usuários das pontes são residentes do continente que, diariamente, deslocam-se para a ilha, e que os 44% restantes são residentes da ilha que fazem o deslocamento contrário (PLAMUS, 2014)¹. Logo, classificam-se os agentes como: (1)

¹A contagem do volume de veículos e volume de passageiros de transporte coletivo que resultou na proporção apresentada (56% residentes do continente e 44% residentes

Tabela 2 – As estratégias possíveis.

Id	Modo	Ida	Volta	Id	Modo	Ida	Volta
1	carro	h1	h2	22	ônibus	h1	h2
2	carro	h1	h3	23	ônibus	h1	h3
3	carro	h1	h4	24	ônibus	h1	h4
4	carro	h1	h5	25	ônibus	h1	h5
5	carro	h1	h6	26	ônibus	h1	h6
6	carro	h1	h7	27	ônibus	h1	h7
7	carro	h2	h3	28	ônibus	h2	h3
8	carro	h2	h4	29	ônibus	h2	h4
9	carro	h2	h5	30	ônibus	h2	h5
10	carro	h2	h6	31	ônibus	h2	h6
11	carro	h2	h7	32	ônibus	h2	h7
12	carro	h3	h4	33	ônibus	h3	h4
13	carro	h3	h5	34	ônibus	h3	h5
14	carro	h3	h6	35	ônibus	h3	h6
15	carro	h3	h7	36	ônibus	h3	h7
16	carro	h4	h5	37	ônibus	h4	h5
17	carro	h4	h6	38	ônibus	h4	h6
18	carro	h4	h7	39	ônibus	h4	h7
19	carro	h5	h6	40	ônibus	h5	h6
20	carro	h5	h7	41	ônibus	h5	h7
21	carro	h6	h7	42	ônibus	h6	h7

Fonte: Elaboração própria.

moradores do continente e (2) moradores da ilha.

A relevância acerca da classificação dos agentes quanto a sua origem é explicada pelo fato de que os moradores do continente fazem uso da Ponte Pedro Ivo Campos no trajeto de ida e da Ponte Colombo Salles no de volta, enquanto os moradores da ilha fazem o inverso. Como visa-se a analisar o fluxo de agentes e de veículos em cada uma das pontes por horário, é essencial que esta distinção seja feita, o que será melhor evidenciado no decorrer deste capítulo.

Além disso, os agentes são também discriminados por tipos, os quais são relacionados à finalidade de seus deslocamentos. Neste modelo será considerado que cada agente faz parte de um dos seguintes grupos: (1) estudantes do período matutino, (2) estudantes do período vespertino,

da ilha) foi realizada nas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles por um período de 16 horas (das 06h às 22h) no dia 30/05/2014.

(3) trabalhadores, ou ainda (4) agentes livres, grupo que compreende os agentes que não possuem compromisso em um horário específico e, portanto, são os detentores de maior flexibilidade em suas escolhas no que se refere aos horários de deslocamento.

Inicialmente, supõe-se que todos os estudantes do modelo são alunos de ensino fundamental e médio, os quais não apresentam a idade mínima permitida para dirigir e, portanto, não podem, em nenhuma circunstância, optar pelo meio de transporte “carro”, tendo que, obrigatoriamente, realizar seus deslocamentos através de ônibus.

Já os agentes classificados como trabalhadores e agentes livres, por simplificação, são todos considerados adultos munidos de veículo próprio e de documento de habilitação e, portanto, não possuem limitações quanto aos meios de transporte disponíveis.

Quanto às restrições de horários impostas a cada tipo de agente, supõem-se que a jornada dos trabalhadores compreende o período das 08h às 18h, as aulas dos estudantes do período matutino ocupam seus dias entre as 07h e às 12h e as dos estudantes do período vespertino se estendem das 13h às 18h.

Logo, para chegarem a tempo, tanto os trabalhadores, quanto os estudantes do período matutino têm como alternativas de horários de ida somente h_1 e h_2 e, pela mesma razão, apenas os horários h_3 e h_4 estão disponíveis aos estudantes do período vespertino. Enquanto isso, os agentes livres podem optar pelo horário de ida que desejarem.

O trajeto de volta deve ocorrer após os agentes cumprirem com suas tarefas diárias. Assim, temos que os trabalhadores e os estudantes do período vespertino podem regressar as suas casas nos horários h_6 e h_7 e os estudantes do período matutino em h_4 ou h_5 . Mais uma vez, os agentes livres dispõem de todos os horários de volta disponíveis no modelo, a saber, de h_2 a h_7 .

A fim de melhor expor as restrições aplicadas a cada tipo de agente, sumarizam-se tais informações na Tabela 3.

As restrições impostas a cada tipo de agente implicam a obtenção do campo de escolha associado a cada um deles. Campo de escolha é o conjunto de todas as estratégias que podem ser escolhidas por um determinado tipo de agente. No contexto deste trabalho, todos os agentes de um determinado tipo possuem um campo de escolha em comum. Em contrapartida, os campos de escolha relacionados a cada tipo de agente são distintos entre si e dependem das restrições verificadas na Tabela 3.

Tais campos de escolha podem ser observados na Tabela 4, a qual pode ser melhor compreendida com o auxílio da Tabela 2, devido

Tabela 3 – Meios de transporte e horários de deslocamento disponíveis para cada tipo de agente

Tipo	Meio	Ida	Volta
Estudante matutino	Ônibus	h_1 e h_2	h_4 e h_5
Estudante vespertino	Ônibus	h_3 e h_4	h_6 e h_7
Trabalhador	Carro e ônibus	h_1 e h_2	h_6 e h_7
Agente livre	Carro e ônibus	h_1, \dots, h_6	h_2, \dots, h_7

Fonte: Elaboração própria.

à adoção de identificação numérica das estratégias.

Tabela 4 – Campo de escolha de cada tipo de agente

Tipo	Campo de escolha	Nº de estratégias
Est. matutino	24, 25, 29 e 30	4
Est. vespertino	35, 36, 38 e 39	4
Trabalhador	5, 6, 10, 11, 26, 27, 31 e 32	8
Agente livre	1, 2, ..., 42	42

Fonte: Elaboração própria.

Formalmente, em um determinado período (dia), cada agente i do tipo ℓ escolhe uma entre as J_ℓ alternativas mutuamente excludentes contidas no seu campo de escolha, denotado por S_ℓ . A utilidade que o i -ésimo agente do tipo ℓ adquire da alternativa $s_i \in S_\ell$ depende também do local onde reside (ilha ou continente). Por exemplo, um trabalhador residente na ilha que escolhe a estratégia 5 atravessará por ônibus a ponte Colombo Salles no horário h_1 e a ponte Pedro Ivo Campos no horário h_6 , enquanto um trabalhador que reside no continente que escolhe a mesma estratégia 5 fará o inverso, ou seja, atravessará por ônibus a ponte Pedro Ivo Campos no horário h_1 e a ponte Colombo Salles no horário h_6 . Portanto, estes dois trabalhadores enfrentarão, possivelmente, tráfegos distintos. Em suma, o campo de escolha do i -ésimo agente é condicionado ao seu tipo ℓ (estudante matutino, estudante vespertino, trabalhador ou agente livre), enquanto a *utilidade total* obtida por este agente em um dado período associada à estratégia $s_i \in S_\ell$ depende também de sua origem o (ilha ou continente).

Seguindo a literatura de modelos de escolha discreta, (TRAIN, 2009), a utilidade total do i -ésimo agente do tipo ℓ , cuja origem é o ,

que escolheu a estratégia $s_i \in S_\ell$ será decomposta como segue:

$$U_{\ell,o}(s_i) = U_o^d(s_i) + \varepsilon(s_i), \quad (2.1)$$

na qual $U_o^d(s_i)$ diz respeito ao componente determinístico da utilidade (*utilidade desteterminística*) e refere-se às motivações observáveis e $\varepsilon(s_i)$ é o componente aleatório (*utilidade aleatória*) associado às motivações não observáveis do agente.

Admitindo-se que os agentes são maximizadores de utilidade, a alternativa $s_i \in S_\ell$ será ótima quando

$$U_{\ell,o}(s_i) \geq U_{\ell,o}(s'_i), \quad \forall s'_i \in S_\ell. \quad (2.2)$$

Inserindo (2.1) em (2.2), a condição de otimalidade (2.2) pode ser reexpressa como segue:

$$U_o^d(s_i) - U_o^d(s'_i) \geq \varepsilon(s'_i) - \varepsilon(s_i), \quad \forall s'_i \in S_\ell. \quad (2.3)$$

Nota-se que a estratégia s_i será uma escolha ótima para o i -ésimo agente do tipo ℓ e origem o caso o benefício líquido da parcela observável desta escolha, dado por $U_o^d(s_i) - U_o^d(s'_i)$, não seja inferior aos ganhos líquidos não observáveis que o agente associa às demais escolhas $s'_i \in S_\ell$.

Considerando o componente aleatório na escolha do i -ésimo agente do tipo ℓ e origem o , torna-se possível, apenas, estabelecer a propensão à escolha com que este agente escolherá a estratégia $s_i \in S_\ell$, dada pela seguinte probabilidade:

$$\begin{aligned} Prob_{\ell,o}(s_i) &= Prob\left(U_{\ell,o}(s_i) \geq U_{\ell,o}(s'_i), \forall s'_i \in S_\ell\right) \\ &= Prob\left(\varepsilon(s'_i) - \varepsilon(s_i) \leq U_o^d(s_i) - U_o^d(s'_i), \forall s'_i \in S_\ell\right) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} I[\varepsilon(s'_i) - \varepsilon(s_i) \leq U_o^d(s_i) - U_o^d(s'_i), \forall s'_i \in S_\ell] f(\vec{\varepsilon}_i) d\vec{\varepsilon}_i, \end{aligned} \quad (2.4)$$

sendo $I[\cdot]$ a função indicadora, cuja imagem será igual a 1 quando a expressão entre colchetes for verdadeira e zero caso contrário, e $f(\vec{\varepsilon}_i)$ a função densidade de probabilidade conjunta do vetor de variáveis aleatórias $\vec{\varepsilon}_i$, cujos elementos são as variáveis aleatórias $\varepsilon(s_i)$, com $s_i \in S_\ell$.

Conforme Train (2009), diferentes especificações de $f(\cdot)$ resultam em diferentes modelos de escolha discreta, sendo alguns deles convenientes por levarem a uma forma fechada para a integral (2.4). Um deles é o modelo logit, o qual assume que os componentes aleatórios das funções utilidade dos agentes são independentes e com a mesma distribuição de probabilidade de valores extremos, cuja função densidade de probabilidade Gumbel (ou de valor extremo do Tipo I) é dada por:

$$f(\varepsilon(s_i)) = \beta e^{-\beta\varepsilon(s_i)} e^{-e^{-\beta\varepsilon(s_i)}}, \quad (2.5)$$

cuja a respectiva função de distribuição acumulada é dada por:

$$F(\varepsilon(s_i)) = e^{-e^{-\beta\varepsilon(s_i)}}. \quad (2.6)$$

Com base em (2.5) e (2.6), pode-se resolver a integral (2.4) e obter a propensão à escolha do i -ésimo agente do tipo ℓ dada pela função de distribuição logística:²

$$\begin{aligned} Prob_{\ell,o}(s_i) &= \frac{e^{\beta U_o^d(s_i)}}{\sum_{\forall s'_i \in S_\ell} e^{\beta U_o^d(s'_i)}} \\ &= \frac{1}{1 + \sum_{\forall s'_i \in S_\ell, s'_i \neq s_i} e^{-\beta[U_o^d(s_i) - U_o^d(s'_i)]}}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

em que $\beta > 0$ é conhecido na literatura como *intensidade de escolha* (HOMMES, 2013). Quando esta intensidade assume valores extremamente elevados, isto é, quando $\beta \rightarrow \infty$, a escolha da alternativa s_i pelo agente é estabelecida quase que exclusivamente pela utilidade determinística. Por sua vez, caso a intensidade de escolha assuma valores extremamente baixos, ou seja, se $\beta \rightarrow 0^+$, o agente acaba escolhendo qualquer alternativa do seu campo de escolha com a mesma probabilidade. Em suma, *ceteris paribus*, um aumento da intensidade de escolha aumenta a influência do diferencial de benefícios observados entre as estratégias sobre as escolhas dos agentes. A fim de reforçar as últimas explanações referentes ao processo de decisão dos agentes, apresenta-se o seguinte exemplo.

Exemplo 1. *Considere um agente i , morador do continente e estudante de período matutino, cujo campo de escolha é dado por $S_\ell = \{24, 25, 29, 30\}$, com $J_\ell = 4$, conforme a Tabela 4. Então, a propensão deste agente escolher a estratégia 25 é dada por:*

$$Prob_{\ell,o}(25) = \frac{1}{1 + \sum_{\forall s'_i \in S_\ell, s'_i \neq 25} e^{-\beta[U_o^d(25) - U_o^d(s'_i)]}} = \quad (2.8)$$

²No capítulo 3 de Train (2003) o detalhamento destes cálculos são apresentados, supondo $\beta = 1$.

$$= \frac{1}{1 + e^{-\beta[U_o^d(25) - U_o^d(24)]} + e^{-\beta[U_o^d(25) - U_o^d(29)]} + e^{-\beta[U_o^d(25) - U_o^d(30)]}}$$

Note que, em um situação hipotética em que $\beta = 0$, $Prob_{\ell,o}(25)$, bem como todas as outras probabilidades associadas às outras $(J_\ell - 1)$ alternativas em S_ℓ - a saber, $Prob_{\ell,o}(24)$, $Prob_{\ell,o}(29)$ e $Prob_{\ell,o}(30)$ - são iguais a $1/4$.

De acordo com Gilbert (2008), uma característica fundamental de modelos baseados em agentes é a existência de interação entre os agentes, os quais passam mensagens informativas uns aos outros e agem com base no que aprendem com essas mensagens, estabelecendo uma forma de adaptação ao ambiente em que se encontram. O autor explica que a troca de mensagens pode se dar tanto através de um diálogo, como também, de forma mais indireta, por meio da observação de outros agentes ou ainda pela percepção dos efeitos das ações de outros agentes.

A interação entre os agentes é conhecida como efeito de vizinhança, já que a escolha de cada um dos agentes é afetada, de alguma forma, pela escolha dos demais. O efeito de vizinhança pode ser global - quando a escolha do i -ésimo agente é afetada pelas escolhas de toda a população de agentes do sistema - ou local, caso em que apenas as escolhas de um subconjunto de agentes são capazes de influenciar a escolha de cada agente i .

Posto isso, representa-se a função da utilidade determinística, $U_o^d(s_i)$, por

$$U_o^d(s_i) = \alpha U^P(s_i) + U_o^s(s_i), \quad (2.9)$$

em que $U^P(s_i)$ é a utilidade determinística privada, $U_o^s(s_i)$ é a utilidade determinística social e $\alpha > 0$ é o peso relativo da utilidade determinística privada.

A utilidade determinística social, $U_o^s(s_i)$, é responsável por captar as interações entre os agentes, isto é, o efeito de vizinhança, que nesta pesquisa será tida como global. Enquanto a utilidade determinística privada, $U^P(s_i)$, engloba qualquer característica da utilidade determinística total, $U_o^d(s_i)$, que não implica este tipo de efeito.

Uma vez que cada uma das 42 estratégias possíveis do modelo é composta por dois deslocamentos, os quais acontecem em horários e pontes diferentes, há de se considerar ainda que $U_o^d(s_i)$ é, na verdade, a soma de duas utilidades determinísticas privadas e sociais, como segue:

$$U_o^d(s_i) = [\alpha U^{p1}(s_i) + U_o^{s1}(s_i)] + [\alpha U^{p2}(s_i) + U_o^{s2}(s_i)] \quad (2.10)$$

em que o índice 1 representa os deslocamentos de ida e o índice 2, os de volta.

A utilidade total determinística, $U_o^d(s_i)$, de cada alternativa s_i pode estar relacionada a atributos da própria alternativa s_i , como também de algumas características vinculadas ao agente i , o tomador de decisão (BEN-AKIVA; BIERLAIRE, 1999). No contexto de deslocamento rodoviário, aponta-se como exemplos de atributos das alternativas custo da gasolina, tarifa de ônibus, outros custos secundários como pedágio, manutenção de veículos e estacionamento, tempo despendido nos deslocamentos, qualidade e lotação do sistema de transporte público, entre outros; como características dos agentes, restrição orçamentária, a posse ou não de veículos, etc..

Nesta pesquisa, a utilidade determinística privada, $U^p(s_i)$, retrata, basicamente, os custos atribuídos a cada estratégia. Para as estratégias associadas a deslocamentos feitos de ônibus, a utilidade determinística privada depende unicamente do custo da tarifa, que é o mesmo tanto para deslocamentos de ida quanto para os de volta, ou seja, $U^{p1}(s_i) = U^{p2}(s_i) \forall s_i \in \{22, \dots, 42\}$.

No entanto, $U^{p1}(s_i) \neq U^{p2}(s_i) \forall s_i \in \{1, \dots, 21\}$. Isto porque, neste caso, $U^{p1}(s_i)$ é calculada de forma a considerar os custos gerais inerentes à posse e ao uso de automóveis e, além disso, o custo de estacionamento, enquanto $U^{p2}(s_i)$ depende apenas dos custos gerais, mas não do custo de estacionamento, sob o argumento de que os agentes não têm custo para estacionar em suas casas.

Ainda no que tange $U^{p1}(s_i) \forall s_i \in \{1, \dots, 21\}$, ressalta-se que nem sempre os agentes que utilizam carro pagam para estacionar. Supõe-se, ao invés disso, que em alguns momentos os agentes conseguem se abster do referido custo, estacionando na rua por exemplo, mas que, em outros, podem não conseguir vaga, sendo, assim, obrigados a estacionar em local privado. Os agentes não sabem, a priori, se vão conseguir ou não estacionar na rua e, por conseguinte, se precisarão ou não desembolsar certa quantia para este fim, mas sabem que existe uma chance de terem este custo extra. Posto isto, $U^{p1}(s_i)$ é dada por:

$$U^{p1}(s_i) = \begin{cases} \sigma e^{-\gamma(C_1+C_3)} + (1-\sigma)e^{-\gamma C_1}, & \forall s_i \in \{1, \dots, 21\} \\ e^{-\gamma C_2}, & \forall s_i \in \{22, \dots, 42\}. \end{cases} \quad (2.11)$$

em que σ é a probabilidade do agente i precisar pagar o estacionamento de seu carro, C_1 representa os custos gerais associados a deslocamentos feitos de carro, C_2 é o custo da tarifa de ônibus, C_3 é o custo médio de estacionamento e o parâmetro $\gamma > 0$ é a sensibilidade da utilidade

determinística privada com relação ao custo total da alternativa s_i . Note que a utilidade determinística privada das estratégias ligadas a deslocamentos de ida feitos de carro, dada a presença do parâmetro σ , é estabelecida como utilidade esperada.

A utilidade determinística privada do deslocamento de volta, $U^{p2}(s_i)$, por sua vez, é calculada como segue:

$$U^{p2}(s_i) = \begin{cases} e^{-\gamma C_1}, & \forall s_i \in \{1, \dots, 21\} \\ e^{-\gamma C_2}, & \forall s_i \in \{22, \dots, 42\}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Considera-se que C_1 , C_2 , C_3 , γ e σ são todos constantes, logo, tanto $U^{p1}(s_i)$ quanto $U^{p2}(s_i)$, $\forall s_i \in \{1, \dots, 42\}$, independem da ponte ou do horário em que os deslocamentos estão sendo efetuados, logo, também não dependem da origem ou do tipo dos agentes, mas, tão somente, do meio de deslocamento utilizado (carro ou ônibus).

Lembra-se que a utilidade determinística social tem a finalidade de captar a interação entre os agentes, isto é, de inserir ao modelo atributos que fazem com que a escolha de cada agente seja afetada de alguma forma pela escolha dos demais. No tocante às estratégias associadas ao meio de transporte “carro”, foram inseridos os seguintes atributos: (1) tempo de deslocamento e (2) tempo de estacionamento. Quanto às estratégias associadas ao meio de transporte “ônibus”, são considerados: (1) tempo de deslocamento, (2) tempo de caminhada da residência ao ponto de ônibus e deste até o destino final, (3) tempo de espera no ponto de ônibus e (4) grau de lotação do sistema de transporte público.

Observe que quanto mais agentes atravessarem uma das pontes em um determinado horário, maior será o tempo para que cada um deles realize a travessia, ou seja, cada agente adicional que opta por esta forma de deslocamento gera um ônus tanto a ele próprio quanto a todos os demais agentes que escolheram realizar a travessia desta ponte neste horário. Da mesma forma, quanto mais agentes optarem por atravessar de ônibus uma determinada ponte em um dado horário, tanto maior será o grau de lotação do sistema de transporte público (nesta ponte e neste horário), o que implica mais desconforto para todos os agentes que tiveram esta mesma escolha.

Em virtude deste modelo ser composto por duas pontes, dois meios de transporte e sete horários, devem ser calculados 28 tempos de travessia distintos. Para o cálculo do tempo das travessias realizadas através de carro, emprega-se a função fluxo de demora, originalmente *Volume-Delay Function*, desenvolvida por *Bureau of Public Roads (BPR)*,

a qual se baseia na lotação das faixas disponíveis em uma determinada via e é dada por

$$\tau_a(\rho, h) = \tau_f \left[1 + \mu \left(\frac{v(\rho, h)}{\lambda \Theta} \right)^\delta \right]. \quad (2.13)$$

Na referida equação, $\tau_a(\rho, h)$ é o tempo despendido na travessia da ponte $\rho \in \{\text{Pedro Ivo Campos, Colombo Salles}\}$, no horário $h \in \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7\}$ através de carro e τ_f é o tempo de fluxo livre, ou seja, o tempo necessário para atravessar as pontes sem que haja influência do trânsito. O termo entre parênteses representa o volume ocupado *versus* a capacidade das faixas disponíveis. Logo, $v(\rho, h)$ é o número de veículos equivalentes que atravessam a ponte ρ , por hora, no horário h , λ é o número de faixas disponíveis em cada ponte, dado, neste momento, como constante e igual a 4, Θ é a capacidade de veículos equivalentes por faixa, por hora, que também é constante e igual a 2100, conforme o PLAMUS (2014) e, por fim, $\mu \in \mathbb{R}^+$ e $\delta \in \mathbb{R}^+$ são constantes paramétricas.

Cabe esclarecer que cada carro equivale a um veículo equivalente, enquanto cada ônibus corresponde a dois. E, ainda, que τ_f iguala-se à divisão da extensão das pontes pela velocidade máxima nelas permitida.

De acordo com o PLAMUS (2014), existe uma relação entre as velocidades de ônibus e automóveis. Aponta-se que há uma tendência da velocidade dos ônibus ser menor que a dos automóveis, mesmo que seja desconsiderado o tempo de demora dos ônibus em pontos de parada. Em uma via multifaixas - como as pontes, as quais são compostas por 4 faixas cada uma - a relação entre as velocidades de ônibus e automóveis é de 0,95 (PLAMUS, 2014). Isto é, o tempo de travessia de agentes que optam por se deslocar de ônibus é pelo menos 5% maior em relação aos que escolhem utilizar carros. Posto isto, considera-se a seguinte relação:

$$\tau_b(\rho, h) = (1/0,95) \tau_a(\rho, h) \quad (2.14)$$

em que $\tau_b(\rho, h)$ representa o tempo necessário para atravessar a ponte ρ no horário h através de ônibus.

Segundo o PLAMUS (2014), o tempo médio de caminhada - de acesso e regresso - ao ponto de ônibus é de 5,14 minutos, e o tempo médio de espera pelo ônibus no ponto de parada é de 8,19 minutos. Assim, considera-se que os usuários de ônibus levam $\tau_b(\rho, h)$ mais, em média, 13,33 minutos para chegarem ao seu destino final.

O grau de lotação dos ônibus, por sua vez, está associado ao

número de agentes que utilizam este meio de transporte e à capacidade máxima do sistema de transporte público. Assim,

$$L(\rho, h) = \frac{\omega(\rho, h)}{O(\rho, h)P} \quad (2.15)$$

em que $L(\rho, h)$ é a lotação da ponte ρ no horário h e $\omega(\rho, h)$ é o número de agentes que utilizam ônibus por hora na ponte ρ e no horário h . No denominador, tem-se que $O(\rho, h)$ é o número de ônibus disponíveis por hora na ponte ρ no horário h e P é a capacidade máxima de passageiros, sentados e em pé, permitida em cada ônibus.

Nos relatórios do PLAMUS (2014) também foram expostos alguns dados referentes ao tempo de estacionamento, os quais podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tempo de estacionamento

Tempo em busca de uma vaga para estacionamento	Frequência relativa
Até 5 min	$\phi_1 = 74,4\%$
Entre 5 e 10 min	$\phi_2 = 14,0\%$
Acima de 10 min	$\phi_3 = (1 - \phi_1 - \phi_2) = 11,6\%$

Fonte: Elaboração própria.

Por simplificação, em vez dos intervalos de tempo elencados na Tabela 5, foi considerado que 74,4% dos agentes que usam carro dependem exatamente 5 min para buscarem estacionamento, que 14% dependem 10 min e que os demais demoram 15 minutos para estacionar.

Mais uma vez, supõe-se que os agentes não sabem, a priori, quanto tempo levarão para buscar uma vaga de estacionamento a cada dia, mas sabem que podem levar de 5 a 15 minutos para tal. Posto isto, chega-se às funções representativas das utilidades determinísticas sociais, $U_o^{s1}(s_i)$ e $U_o^{s2}(s_i)$:

$$U_o^{s1}(s_i) = \begin{cases} \phi_1 e^{-(\tau a(\rho, h)+5)} + \phi_2 e^{-(\tau a(\rho, h)+10)} + \phi_3 e^{-(\tau a(\rho, h)+15)} & \forall s_i = \{1, \dots, 21\} \\ e^{-[\theta(\tau_b(\rho, h)+13,3)+(1-\theta)L(\rho, h)]} & \forall s_i = \{22, \dots, 42\} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$U_o^{s2}(s_i) = \begin{cases} e^{-\tau\alpha(\rho,h)} & \forall s_i \in \{1, \dots, 21\} \\ e^{-[\theta(\tau_b(\rho,h)+13,3)+(1-\theta)L(\rho,h)]} & \forall s_i \in \{22, \dots, 42\} \end{cases} \quad (2.17)$$

em que $0 > \theta > 1$ é uma constante, a qual representa o peso relativo dado por cada agente i ao tempo total de deslocamento - e, por conseguinte, $(1 - \theta)$ é o peso dado à lotação dos ônibus.

Note que o primeiro caso de $U_o^{s1}(s_i)$ se trata de uma utilidade esperada, que leva em consideração as proporções ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 apontadas na Tabela 5. E que $U_o^{s1}(s_i) = U^{s2}o(s_i) \forall s_i \in \{22, \dots, 42\}$, porém $U_o^{s1} \neq U_o^{s2}(s_i) \forall s_i \in \{1, \dots, 21\}$, já que o tempo de estacionamento é contado apenas no deslocamento de ida.

Frisa-se que, ao contrário das utilidades determinísticas privadas, as utilidades determinísticas sociais estão vinculadas à ponte e ao horário em que os deslocamentos estão sendo efetuados e, por conseguinte, dependem da origem dos agentes. Contudo, também não são discriminadas para cada tipo de agente.

Assim sendo, chega-se à fórmula geral da utilidade determinística, $U_o^d(s_i)$:

$$\begin{aligned} U_o^d(s_i) &= [\alpha U^{p1}(s_i) + U_o^{s1}(s_i)] + [\alpha U^{p2}(s_i) + U_o^{s2}(s_i)] \\ &= \{\alpha [\sigma e^{-\gamma(C_1+C_3)} + (1-\sigma)e^{-\gamma C_1}] + \\ &\quad + [\phi_1 e^{-\tau\alpha(\rho,h)+5} + \phi_2 e^{-\tau\alpha(\rho,h)+10} + \phi_3 e^{-\tau\alpha(\rho,h)+15}]\} + \\ &\quad + \{\alpha [e^{-\gamma C_1}] + [e^{-\tau\alpha(\rho',h')}] \} \quad \forall s_i \in \{1, \dots, 21\} \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} U_o^d(s_i) &= [\alpha U^{p1}(s_i) + U_o^{s1}(s_i)] + [\alpha U^{p2}(s_i) + U_o^{s2}(s_i)] \\ &= \{\alpha [e^{-\gamma C_2}] + [e^{-[\theta(\tau_b(\rho,h)+13,3)+(1-\theta)L(\rho,h)]}]\} + \\ &\quad + \{\alpha [e^{-\gamma C_2}] + [e^{-[\theta(\tau_b(\rho',h')+13,3)+(1-\theta)L(\rho',h')]}]\} \quad \forall s_i \in \{22, \dots, 42\}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

em que a equação (2.18) representa a utilidade determinística das estratégias associadas ao meio de transporte “carro” e a equação (2.19), a das estratégias relativas ao meio de transporte “ônibus”.

Retomando-se a questão da origem dos agentes, tem-se que para os moradores do continente $\rho = Pedro Ivo Campos$ e $\rho' = Colombo Salles$; e para os moradores da ilha, o inverso. Por conseguinte, há no total 42 utilidades determinísticas associadas aos moradores do continente e 42 associadas aos moradores da ilha.

2.2 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E APRESENTAÇÃO DE DADOS

Esta seção tem como propósito descrever como foi realizada a implementação computacional - através do software *Matlab*³ - do modelo exposto na seção anterior e ainda, no decorrer das explicações, expor os dados necessários a sua execução.

Conforme o PLAMUS (2014), dos 90.000 veículos equivalentes que, em média, atravessam cada uma das pontes por dia, 75% deles são carros, 3% são ônibus e os 22% restantes compreendem outros tipos veiculares como táxi, caminhões, vans e motocicletas.

A partir destes dados, foram feitos alguns cálculos com o intuito de se definir o número de agentes, bem como o número de veículos associados a cada meio de transporte incluído no modelo. Tais cálculos são exibidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Definindo o número de agentes e de veículos do modelo.

Meio	Plamus	Nova proporção	Nº de veículos (equivalentes)	Nº de veículos
Carro	75,00%	96,15%	86538,5	86538,5
Ônibus	3,00%	3,85%	3461,5	1730,8
Total	78,00%	100,00%	90000,0	88269,2

Fonte: Elaboração própria.

Esta pesquisa considera, por simplificação, a existência de apenas dois meios de transporte, a saber, carro e ônibus. Logo, admite-se que os 78% dos veículos equivalentes relacionados a estes meios de transporte pelo PLAMUS (2014), na verdade, igualam-se a 100% dos veículos equivalentes admitidos neste modelo. Desta forma, através do uso de regra de três simples, foi obtida uma nova proporção para cada meio de transporte, conforme a terceira coluna da Tabela 6.

Dado o número total de 90.000 veículos equivalentes que atravessam cada ponte por dia e dada a nova proporção por meio de transporte apresentada, obtém-se o número de veículos equivalentes por meio de transporte, que pode ser observado na penúltima coluna da Tabela 6. Reitera-se que cada carro corresponde a um veículo equivalente e cada ônibus, a dois. Logo, chega-se ao número de veículos por meio

³Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

de transporte, os quais foram exibidos na última coluna da Tabela 6 e arredondados conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Número de agentes e de veículos considerados no modelo.

Meio	Nº de veículos (após arredondamento)	Nº de agentes (N)
Carro	86500	131480
Ônibus	1750	56000
Total	88250	187480

Fonte: Elaboração própria.

Os estudos de Soares (2003) revelam que o índice de ocupação média dos automóveis, em Florianópolis, é de 1,52 ocupantes por carro. Segundo o PLAMUS (2014), cada ônibus é, em média, ocupado por 32 passageiros. Assim, multiplicando o número de carros por 1,52, e o número de ônibus por 32, encontra-se o número aproximado de agentes por meio de transporte que, somados, resultam no número total de agentes considerados no modelo, conforme Tabela 7.

Lembra-se que a cada período t (cada dia), cada agente i escolhe uma das J_ℓ estratégias em seu campo de escolha, S_ℓ , baseando-se na utilidade determinística adquirida de cada estratégia $s_i \in S_\ell$, a qual é decomposta em utilidade determinística privada e utilidade determinística social.

Conforme as equação (2.11) e (2.12), a utilidade determinística privada é constante em cada período t e não depende da origem, o , ou do tipo, ℓ , dos agentes, mas tão somente do parâmetro γ - cujo valor foi obtido através de um método de calibração, o qual será exposto na próxima seção - bem como do vetor de custos, $C = [C_1, C_2, C_3]$.

Segundo a Prefeitura Municipal de Florianópolis PMF (2018), o valor da tarifa de ônibus cobrado em Florianópolis é de R\$3,99 quando pago através de cartão “passe rápido” e R\$4,20 se pago em dinheiro. Uma vez que os agentes deste modelo se deslocam diariamente, é plausível considerar que utilizem o cartão “passe rápido” e, portanto, assume-se que a tarifa de ônibus, C_1 equivale a R\$4,00, por travessia.

O valor dos custos gerais inerentes ao uso de automóveis, C_2 , foi obtido por meio da Calculadora da Mobilidade Urbana, disponibilizada no site ESTADÃO (2017). Dados o tipo de carro utilizado, a distância média percorrida e o número de pessoas por carro, a referida Calculadora aponta o custo total do trajeto por pessoa, baseando-se no custo por quilômetro rodado. Segundo a metodologia apresentada pelo

ESTADÃO (2017), o cálculo do custo por quilômetro rodado, considera os seguintes itens: depreciação, pneu, óleo, filtros, seguro, DPVAT, IPVA e combustível, sendo que os valores destes itens correspondem aos atualmente vigentes na cidade de São Paulo. Posto isto, configurou-se a Calculadora da seguinte forma:

- carro utilizado: Gol;
- número de pessoas no carro: 1;
- distância percorrida: 14km, posto que, segundo o PLAMUS (2014), a distância média de deslocamentos bairro-centro realizados por modo motorizado é de 13,69km.

A partir desta configuração, a Calculadora declarou que o custo total do trajeto é de R\$8,57. Por fim, dividindo-se este valor por 1,52 - índice de ocupação por carro em Florianópolis, exposto anteriormente - obteve-se $C_2 = R\$5,50$.

O custo de estacionamento, C_3 , por sua vez, é de R\$6,31, que é o custo médio de estacionamento revelado pelo PLAMUS (2014), o qual também mostrou que apenas 25,5% dos usuários costumam pagar por estacionamento, ou seja, $\sigma = 0,255$.

Em contrapartida, a utilidade determinística social depende da origem dos agentes. Logo, concentra-se agora na identificação da origem, e também do tipo de cada um dos agentes do sistema. Quanto à origem, conforme a seção 2.1, tem-se que 56% dos agentes são moradores do continente e os 44% restantes são moradores da ilha. Em se tratando do tipo, 21% deles são estudantes, 59,2% são trabalhadores e os demais são agentes livres (PLAMUS, 2014). Assume-se ainda, por simplificação, que metade dos estudantes frequentam às aulas no período matutino e a outra metade no período vespertino. Dadas estas proporções, a cada agente i foi atribuído, aleatoriamente, um tipo e uma origem, características que foram registradas na matriz set_agent , $N \times 2$, cuja primeira coluna contém a origem de cada agente i e a segunda, o seu respectivo tipo.

A utilidade determinística social associada a cada estratégia depende ainda do número de agentes que escolhem cada estratégia a cada período. Como forma de definir as condições iniciais do modelo, para o período $t = 1$, distribuiu-se uniformemente os agentes, de origem o e tipo ℓ , entre as estratégias em S_ℓ , até que cada uma delas fosse adotada por $1/J_\ell$ dos agentes deste tipo e origem.

Após o estabelecimento desta distribuição inicial, foi realizado um processo de contagem do número de agentes que atravessam cada

ponte, em cada horário, através de cada meio de transporte. A partir destas informações, pôde ser calculado o tempo de deslocamento de cada estratégia vinculada ao meio de transporte “carro”, τ_a , com base na equação (2.13), a qual demanda os valores de μ e δ - calibrados pelo PLAMUS (2014), que reportou os valores de 2,8 e 1,5, respectivamente, para estas constantes paramétricas. Relembra-se que os valores de λ e Θ já foram devidamente expostos na seção 2.1. Como o tempo de deslocamento das estratégias associadas ao meio de transporte “ônibus”, τ_b , é, segundo a equação (2.14), uma fração de τ_a , a obtenção desta implica a daquela.

A partir dos dados auferidos do processo de contagem, pôde-se calcular também o grau de lotação do sistema de transporte público, dado pela equação (2.15). Admitiu-se para tanto o número máximo de passageiros por ônibus, $P = 70$, conforme à norma ABNT NBR 15570/2011 e, além disso, supôs-se, conforme Tabela 7, que 1750 ônibus atravessam cada ponte a cada dia, e que eles são distribuídos uniformemente entre as 16 horas consideradas no modelo. Desta forma, conclui-se que 109 ônibus atravessam cada ponte a cada hora. Contudo, uma vez que h_3 , h_5 e h_7 correspondem a intervalos de 4, 5 e 3 horas, respectivamente, realizou-se a multiplicação de tais valores por 109, a fim de que o número de ônibus por ponte por horário seja obtido.

Os dados supracitados permitiram que fossem encontradas as utilidades determinísticas sociais, $U_o^{s1}(s_i)$ e $U_o^{s2}(s_i)$, que unidas às utilidade determinísticas privadas $U^{p1}(s_i)$ e $U^{p2}(s_i)$ resultaram, de acordo com a equação (2.10), na utilidade determinística total, $U_o^d(s_i)$, de cada estratégia s_i . Tais informações foram registradas nas matrizes $U_d_continent$ e U_d_island , ambas $42 \times T$, em que a primeira coluna de $U_d_continent$ contém a utilidade que os moradores do continente adquiriram de cada estratégia s_i no período $t = 1$ e, por analogia, U_d_island contém as utilidades adquiridas pelos moradores da ilha neste mesmo período.

A partir da utilidade determinística total, e dado o campo de escolha S_ℓ de cada agente i do tipo ℓ , recorreu-se à equação (2.4), para a o alcance das propensões à escolha de cada estratégia $s_i \in S_\ell$, $Prob_{\ell,o}(s_i)$. Uma vez alcançadas as propensões à escolha do i -ésimo agente, admitiu-se que a escolha efetivamente feita por este agente em $t = 2$ fosse implementada computacionalmente como segue.

Considere um vetor, $\mathbf{Prob}_{\ell,o} = [Prob_{\ell,o}(1), \dots, Prob_{\ell,o}(J_\ell)]$, $J_\ell \times 1$, em que cada elemento represente a propensão do agente i , do tipo ℓ e origem o , escolher a j -ésima, das J_ℓ estratégias contidas em seu campo de escolha, S_ℓ , tal que cada elemento $Prob_{\ell,o}(j)$ deste

vetor pertença ao intervalo $[0, 1] \subset \mathbb{R}$, com $\sum_{j=1}^J \text{Prob}_{\ell,o}(j) = 1$.

Associa-se ao vetor $\mathbf{Prob}_{\ell,o}$, um outro vetor, $\mathbf{p}_{\ell,o}$, dado por $\mathbf{p}_{\ell,o} = [p_{\ell,o}(1), \dots, p_{\ell,o}(J_\ell)]$, também $J_\ell \times 1$, tal que cada elemento $p_{\ell,o}(j)$ seja dado por $p_{\ell,o}(j) = \sum_{m=1}^{J_\ell} \text{Prob}_{\ell,o}(m)$. Dispondo cada um dos elementos do vetor $\mathbf{p}_{\ell,o}$, sequencialmente, em um segmento de reta $[0, 1] \subset \mathbb{R}$, obtém-se a reta de propensões a ele associada.

A reta de propensões associada ao vetor $\mathbf{Prob}_{\ell,o}$, é dividida em J_ℓ intervalos, sendo o primeiro deles delimitado por $[0, p_{\ell,o}(1)]$, o segundo, por $]p_{\ell,o}(1), p_{\ell,o}(2)]$, e assim por diante, até $]p_{\ell,o}(J_\ell - 1), p_{\ell,o}(J_\ell) = 1]$.

Exemplo 2. *Considere um agente i , morador do continente e estudante do período matutino, cujo vetor de propensões é dado por $\mathbf{Prob}_{\ell,o} = [0.30, 0.20, 0.15, 0.35]$. Ou seja, a propensão à escolha da estratégia 24 é igual a 0.30, a da estratégia 25 é igual a 0.20, e assim sucessivamente. Ao vetor $\mathbf{Prob}_{\ell,o}$, associa-se o vetor $\mathbf{p}_{\ell,o} = [0.30, 0.50, 0.65, 1]$, que leva à reta de propensões composta por $J_\ell = 4$ intervalos, quais sejam: $[0, 0.30]$, $]0.30, 0.50]$, $]0.50, 0.65]$ e $]0.65, 1]$.*

Uma vez obtida a reta de propensões associada ao período $t = 1$, inicia-se o período $t = 2$, em que é realizado o sorteio de um número $r3 \in [0, 1] \subset \mathbb{R}$ para cada agente i , o qual, dado seu tipo e sua origem, escolherá a estratégia associada ao intervalo da reta de propensões a que $r3$ pertença. Se o agente i for morador do continente, sua escolha será registrada na matriz *continent*, $N \times T$; se for morador da ilha, na matriz *island*, também $N \times T$. A partir destas matrizes, um novo processo de contagem é executado a fim de se obter os dados necessários à determinação da utilidade determinística total de cada estratégia neste novo período - tanto para os moradores do continente, quanto para os moradores da ilha. Tais utilidades, dada a equação (2.4), permitem a obtenção de um novo vetor de propensões para cada combinação tipo-origem dos agentes, que dá origem a novas retas de propensões, divididas em intervalos diferentes dos do período anterior. Findo o período $t = 2$, inicia-se o período $t = 3$ e repete-se o mesmo processo até $t = T = 200$.

3 CALIBRAÇÃO E PROPRIEDADES EMERGENTES

O modelo apresentado na seção 2.1 contém quatro parâmetros que precisam ser calibrados: α , β , γ e θ . A calibração consiste em encontrar uma combinação destes parâmetros tal que se obtenha o melhor grau de ajuste para algumas variáveis centrais do modelo. Nesta pesquisa, a calibração dos parâmetros é realizada através de um processo de minimização da seguinte função-objetivo:

$$Z = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (d_k^o - d_{k,t}^s)^2. \quad (3.1)$$

A equação (3.1) representa a soma dos quadrados dos erros de previsão de cada variável central, $k = 1, \dots, K$, tomada como referência, em que $d_{k,t}^s$ corresponde ao valor simulado da variável k no período t ; e d_k^o , ao valor empiricamente observado desta mesma variável. Foram consideradas $K = 5$ variáveis centrais para a realização da calibração, as quais são descritas na Tabela 8.

Tabela 8 – Descrição das K variáveis tomadas como referência para o processo de calibração

d_k	Valores observados	Descrição
d_1	22,80%	Proporção de veículos equivalentes que atravessam a Ponte Pedro Ivo Campos no horário de pico da manhã, h_2
d_2	20,10%	Proporção de veículos equivalentes que atravessam a Ponte Pedro Ivo Campos no horário de pico da tarde, h_6
d_3	18,50%	Proporção de veículos equivalentes que atravessam a Ponte Colombo Salles no horário de pico da manhã, h_2
d_4	25,70%	Proporção de veículos equivalentes que atravessam a Ponte Colombo Salles no horário de pico da tarde, h_6
d_5	75,00%	Proporção de agentes que utilizam carro para realizar a travessia das pontes

Fonte: Elaboração própria.

A fim de minimizar a equação (3.1), recorreu-se ao algoritmo *fminsearchbnd*¹, que tem como propósito encontrar a combinação de parâmetros α , β , γ e θ que minimiza os erros de previsão, dados os limites de cada parâmetro e uma combinação inicial de parâmetros. Posto isto, definiram-se como limites $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\gamma > 0$ e $0 < \theta < 1$, e como condição inicial estabeleceu-se $\alpha = 0,9$, $\beta = 6,6$, $\gamma = 0,8$ e $\theta = 0,97$, que correspondem aos valores dos parâmetros quando calibrados por Avancini e Silveira (2016). Como resultado do processo de calibração realizado foram obtidos os parâmetros do modelo, os quais são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores calibrados dos parâmetros

Parâmetro	Valor calibrado
α	0,6860
β	8,9051
γ	1,1798
θ	0,9902

Fonte: Elaboração própria.

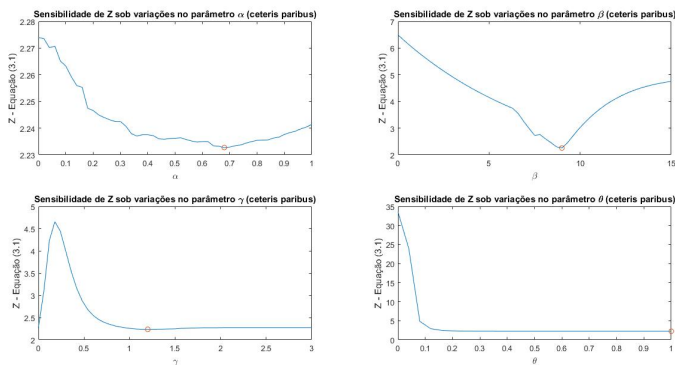
Os parâmetros encontrados permitem que sejam tiradas algumas conclusões a respeito do comportamento dos agentes, as quais são aqui brevemente esclarecidas. Um $\alpha = 0,6860$ indica que o peso dado pelos agentes à utilidade determinística privada, relacionada ao custo de deslocamento, é menor que o dado à utilidade determinística social, associada à tempo de deslocamento e lotação do transporte público. Em se tratando do parâmetro β , seu alto valor significa que as escolhas dos agentes são estabelecidas em grande parte pela utilidade determinística. Além disso, uma vez que o parâmetro θ reflete o peso que os usuários de ônibus dão ao tempo de deslocamento e $(1 - \theta)$ o peso dado ao grau de lotação, $\theta = 0,9902$ sugere que os agentes usuários de ônibus não dão tanto importância à superlotação, desde que, simultaneamente, sejam recompensados por um deslocamento mais rápido.

Visando à análise da sensibilidade do modelo aos parâmetros calibrados, verificou-se a resposta da equação (3.1) quando esta era submetida a variações em cada um dos parâmetros, individualmente, *ceteris paribus*. Os resultados desta análise são exibidos na Figura 4. Observa-se que a soma do quadrado dos erros de previsão, Z , é bastante sensível ao parâmetro β , cujo ponto mínimo é bem marcado. Em se

¹Disponível em <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8277-fminsearchbnd-fminsearchcon>

tratando das demais variáveis, nota-se alta sensibilidade da equação (3.1) a baixos valores de α , γ e θ . Entretanto, quando $0,4 < \alpha < 0,8$, $\gamma > 1$ ou $\theta > 0,15$, a sensibilidade de Z a estes parâmetros é quase nula. Ou seja, dentro destes intervalos, alterações em α , γ e θ devem causar pouco impacto sobre as variáveis centrais do modelo.

Figura 4 – Sensibilidade de Z sob variações nos parâmetros α , β , γ e θ , respectivamente, *ceteris paribus*

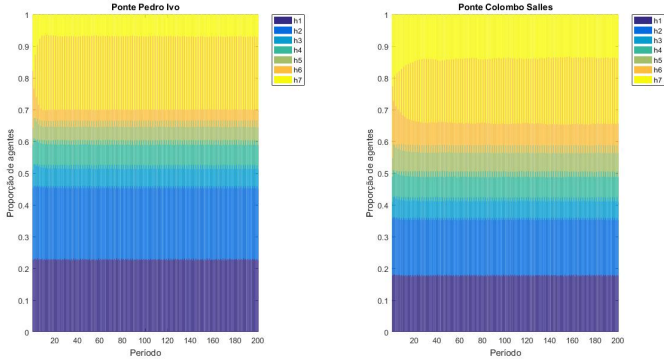


Fonte: Elaboração Própria.

Uma vez obtidos os valores dos parâmetros calibrados, é possível analisar a trajetória de ajustamento do modelo, a qual é apresentada nas Figuras 5 e 6. A primeira exibe a proporção de agentes que atravessam cada uma das pontes por horário (h_1, \dots, h_7) em cada um dos 200 períodos analisados; a segunda, a proporção de agentes que atravessam cada uma das pontes por meio de transporte (carro ou ônibus) em cada período. Em ambas as figuras é possível perceber que a estabilidade do modelo é rapidamente atingida, haja vista a constância dos resultados relativos aos períodos posteriores ao 30º período. Note, porém, na Figura 5, que esta estabilidade é caracterizada por oscilações em torno de médias constantes para cada horário, as quais se mostram mais acentuadas nos horários h_6 e h_7 . Cabe enfatizar que é mantido um padrão tal que, em um determinado período, 5,6% dos agentes atravessam a Ponte Pedro Ivo no horário h_6 enquanto 30% atravessam esta mesma ponte no horário h_7 e, no período imediatamente seguinte, há uma reversão desta proporções, ou seja, 26,5% dos agentes atravessam a Ponte Pedro Ivo Campos no horário h_6 , ao mesmo tempo em que 6,8% atravessam esta ponte no horário h_7 . Tratando-se da Ponte Colombo Salles, as proporções oscilam entre 9,5% no horário h_6 e 34,04% no h_7 em um

determinado período, e nas proporções 27% no horário h_6 e 14% no h_7 no período subsequente.

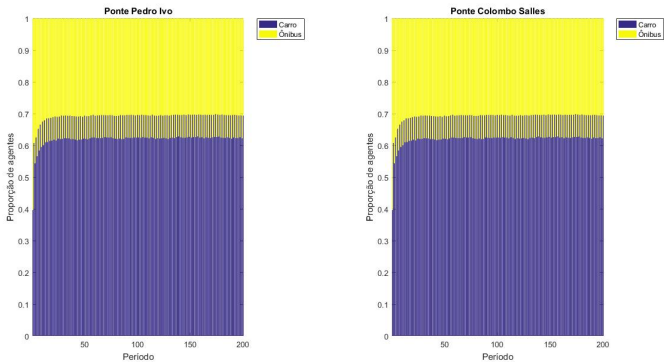
Figura 5 – Proporção de agentes por horário em cada período



Fonte: Elaboração Própria.

Ademais, a Figura 5 demonstra que há maior fluxo de agentes nos horários h_1 e h_2 no Ponte Pedro Ivo Campos em relação à Ponte Colombo Salles, bem como apresenta em maior proporção os agentes que utilizam a Ponte Colombo Salles nos horários h_6 e h_7 , o que vai ao encontro do que é empiricamente observado atualmente na região.

Figura 6 – Proporção de agentes por horário nos 50 últimos períodos



Fonte: Elaboração Própria.

Conforme a Figura 6, a proporção de agentes que atravessam a

Ponte Pedro Ivo Campos de carro é idêntica à proporção de agentes que atravessam a Colombo Salles por este mesmo meio. Este comportamento já era esperado, devido à presença da hipótese de deslocamento pendular em conjunto com a restrição simplificadora que impede os agentes de usarem dois meios de transporte num mesmo período. Além disso, nota-se que há uma proporção de agentes que sempre usa carro, outra que sempre usa ônibus, mas destaca-se a existência de uma pequena parcela, acerca de 7% dos agente, que varia entre um meio de transporte e outro no decorrer dos períodos.

O resultado do processo de calibração permitiu ainda o cálculo dos valores estimados das variáveis centrais do modelo, d_k , que são expostos na Tabela 10, a qual possibilita a comparação destes com os valores empiricamente observados de tais variáveis.

Tabela 10 – Valores estimados das variáveis centrais, d_k , tomadas como referência

d_k	Valores Observados	Valores Estimados - Média	Valores Estimados - Desvio Padrão
d_1	22,80%	21,57%	0,0149
d_2	20,10%	16,33%	0,1379
d_3	18,50%	18,90%	0,0047
d_4	25,70%	15,66%	0,1104
d_5	75,00%	66,02%	0,0361

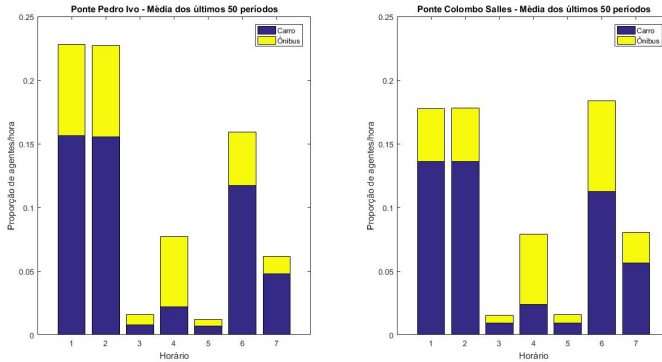
Fonte: Elaboração própria.

Os valores contidos na terceira coluna da Tabela 10 referem-se à média dos valores de d_k nos últimos 50 períodos, enquanto os exibidos na quarta coluna estão associados ao desvio padrão dos valores de d_k nestes mesmos períodos. Conforme se observa, os valores estimados de d_1 e d_3 foram os que mais se aproximaram dos valores empiricamente observados destas variáveis. Em contrapartida, nota-se um destoamento acentuado no tocante à variável d_4 , a qual, simultaneamente, apresenta um alto desvio padrão. Tal fenômeno tem ligação direta com a característica oscilatória no que tange à proporção de agentes entre os horários h_6 e h_7 , a que se deu destaque no decurso das explicações referentes à Figura 5.

Foca-se agora na exibição de alguns resultados que despontam do modelo calibrado, iniciando-se pela observação da Figura 7, que reflete a proporção de agentes que atravessam cada ponte por hora, a

cada horário, através de cada meio de transporte. Condizente com as estatísticas apresentadas no capítulo 1, observa-se que nos horários de pico da manhã, h_1 e h_2 , há maior fluxo de agentes na Ponte Pedro Ivo Campos e nos horários de pico da tarde, h_6 e h_7 , o fluxo é maior na Ponte Colombo Salles.

Figura 7 – Proporção de agentes por hora a cada horário



Fonte: Elaboração Própria.

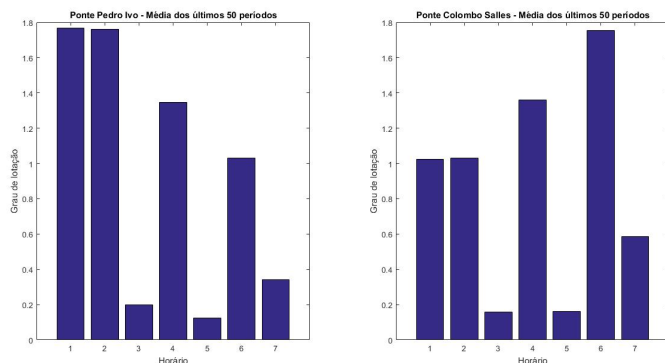
A Figura 7 mostra ainda uma diferença comportamental entre os agentes moradores da ilha e os agentes moradores do continente: estes deslocam-se mais através de transporte público do que aqueles. Este comportamento pode ser percebido através da observação de que, dentre os agentes que atravessam a Ponte Pedro Ivo Campos no horário h_1 ou no horário h_2 - agentes moradores do continente - 31,52%, em média, utilizam ônibus. Em contrapartida, apenas 23,50%, em média, dos agentes que atravessam a Ponte Colombo Salles nestes mesmos horários - agentes moradores da ilha - deslocam-se através de transporte público.

Mais um ponto a ser destacado é que o único horário em que a proporção de agentes que utilizam ônibus é maior que a proporção daqueles que usam carro é o horário h_4 , em ambas as pontes. Isto se deve à hipótese de que os estudantes do modelo utilizam exclusivamente ônibus para se deslocarem, como também ao fato de que o horário h_4 , entre às 12h e às 13h, está entre as opções limitadas de horários disponíveis para que os estudantes do período matutino voltem das aulas e para que os estudantes do período vespertino se direcionem à instituição de ensino. Assim, na Ponte Pedro Ivo Campos, horário h_4 , o fluxo de agentes é dado, em sua maioria, pela soma de dois grupos de agentes: (1) os estudantes do período vespertino, residentes

do continente, indo às aulas e (2) os estudantes do período matutino, residentes da ilha, voltando para suas casas, após as aulas. Da mesma forma, no horário h_4 , o fluxo de agentes na Ponte Colombo Salles é, majoritariamente determinado pelos grupos de (1) estudantes do período vespertino, residentes da ilha, indo às aulas e (2) os estudantes do período matutino, residentes do continente, voltando para suas casas, após as aulas.

Através da Figura 8, que expõe o grau de lotação do sistema de transporte público em cada horário, reiteram-se as conclusões acima declaradas. Note que, nos horários h_1 e h_2 , o grau de lotação na Ponte Pedro Ivo Campos é superior àquele observado na Ponte Colombo Salles, isto é, novamente temos demonstrado que os agentes que residem no continente utilizam mais transporte coletivo do que os agentes moradores da ilha. Observa-se, além disso, um alto grau de lotação no horário h_4 em ambas as pontes, devido a este horário ser caracterizado por um alto fluxo de estudantes.

Figura 8 – Grau de lotação dos ônibus em cada horário



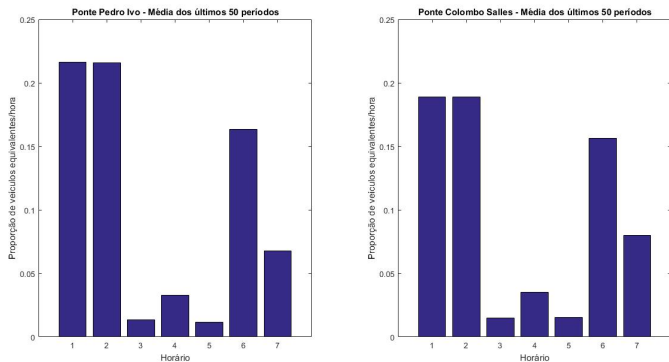
Fonte: Elaboração Própria.

Ainda sobre a Figura 8, adverte-se que, nesta pesquisa, o grau de lotação dos ônibus representa apenas uma medida de excesso de demanda e não a lotação de fato observada. Ou seja, o grau de lotação da Ponte Pedro Ivo Campos no horário h_1 , que corresponde a um valor aproximado de 1,8, não significa que os ônibus estejam transportando 80% de passageiros além do permitido, mas tão somente que todos os agentes que escolheram atravessar esta ponte, neste horário, através de ônibus, observaram grande desutilidade em seu deslocamento.

A fim de analisar características do fluxo de trânsito própria-

mente dito, utilizou-se do índice de passageiros por veículo particular, do número médio de passageiros por ônibus e, ainda, do conceito de veículos equivalentes para elaborar os resultados que são apresentados nas Figuras 9 e 10. A Figura 9 exibe a proporção de veículos equivalentes que atravessam cada uma das pontes por hora a cada período. A referida figura mostra, de acordo com o esperado, que nos horários h_1 e h_2 há maior fluxo de veículos equivalentes na Ponte Pedro Ivo Campos em relação à Ponte Colombo Salles. É demonstrado um baixo nível de veículos equivalentes circulando nos horários h_3 , h_4 e h_5 , situação que cessa no horário h_6 , que junto ao horário h_7 marcam o regressar dos agentes trabalhadores e estudantes do período vespertino às suas residências.

Figura 9 – Proporção de veículos equivalentes por hora a cada horário



Fonte: Elaboração Própria.

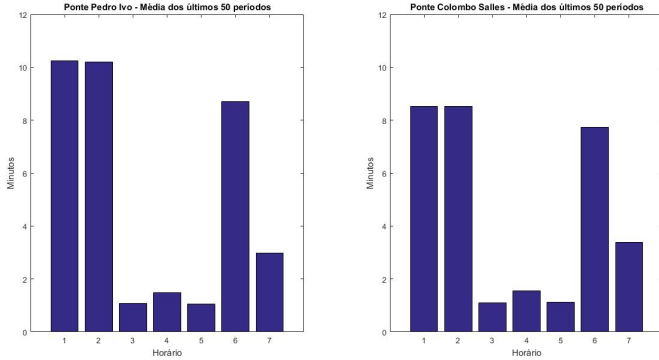
Entretanto, nota-se também na Figura 9, um resultado que vai de encontro ao que se observa empiricamente: no horário h_6 , o modelo retornou uma maior proporção de veículos equivalentes atravessando a Ponte Pedro Ivo Campos, e não a Ponte Colombo Salles. Mesmo que o modelo tenha sido construído de forma a haver mais agentes moradores do continente do que agentes moradores da ilha, e ainda que a calibração tenha sido realizada a partir de referências tais que visassem a um maior tráfego na Ponte Colombo Salles no horário h_6 , ainda assim, o modelo resultou no inverso.

Esta particularidade do modelo, por consequência, foi também retratada na Figura 10, que visa à apuração do tempo necessário para realizar a travessia de cada ponte em cada um dos horários disponíveis. Conforme se observa, o tempo de travessia da Ponte Pedro Ivo Campos

no horário h_6 é ligeiramente maior que o tempo de travessia da Ponte Colombo Salles neste mesmo horário - acerca de um minuto.

0

Figura 10 – Tempo despendido por travessia em cada horário



Fonte: Elaboração Própria.

Além disso, no que tange à Figura 10, os agentes levam em média, 10,2 minutos para realizarem a travessia da Ponte Pedro Ivo Campos nos horários h_1 e h_2 , enquanto a travessia da Ponte Colombo Salles nestes mesmo horários leva em torno de 8,5 minutos. Frisa-se, portanto, que, não importa a hora que os agentes saiam de casa pela manhã, estes levarão aproximadamente o mesmo tempo para atravessarem as pontes. Contudo, em se tratando do deslocamento de volta, os agentes que decidirem por não voltar para suas residências imediatamente após o término da jornada de trabalho, em h_6 , mas, ao contrário, resolverem esperar pelo menos uma hora e realizarem o deslocamento de volta no h_7 , serão recompensados por uma travessia mais rápida. Isto porque a travessia da Ponte Pedro Ivo Campos no horário h_7 é 5,72 minutos mais rápida em comparação a travessia desta ponte em h_6 . Da mesma forma, é possível realizar a travessia da Ponte Colombo Salles 4,36 minutos mais rapidamente em h_7 em relação ao horário h_6 .

3.1 UM EXPERIMENTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Com o intuito de amenizar os transtornos decorrentes dos frequentes congestionamentos nas pontes que ligam ilha e continente na cidade de Florianópolis, o PLAMUS (2014) apontou como sugestão

de política pública imediata, de curto prazo, a implantação de faixas reversíveis nas referidas pontes nos horários de pico. Mas fica a pergunta: esta é uma boa estratégia? Se sim, qual seria a melhor combinação de faixas disponíveis em cada sentido, por horário, a fim de maximizar o bem-estar social dos usuários de transporte da Grande Florianópolis?

Visando a responder tais perguntas, desenvolveu-se um experimento no qual foram aferidas 46 combinações diferentes de número de faixas disponíveis em cada sentido, por horário. Cada combinação recebeu uma identificação numérica, conforme a Tabela 11 do Apêndice A. Nesta tabela, os valores indicados nas colunas PI devem ser entendidos como o número de faixas disponíveis no sentido usual da Ponte Pedro Ivo Campos (continente-ilha). Analogamente, os valores contidos em colunas cujo cabeçalho é denotado por CS correspondem ao número de faixas disponíveis no sentido usual da Ponte Colombo Salles (ilha-continente).

Atualmente, em todos os horários do dia, há 4 faixas disponíveis em cada sentido (combinação 1). Todas as demais combinações analisadas mantêm 4 faixas por sentido nos horários h_3 , h_4 , e h_5 , e distinguem-se entre si no tocante ao número de faixas disponíveis nos horários de pico h_1 , h_2 , h_6 e/ou h_7 . Preserva-se, em todos os horários, um mínimo de 1 e um máximo de 7 faixas em cada sentido. Ressalta-se ainda que foram alvo de análise apenas combinações que aumentavam o número de faixas disponíveis na ponte Pedro Ivo Campos nos horários h_1 , e h_2 e/ou que aumentavam o número de faixas disponíveis na ponte Colombo Salles nos horários h_6 e/ou h_7 .

O bem-estar social gerado por cada uma das combinações se baseia na média das utilidades de todos os agentes nos últimos 50 períodos, dentre os 200 considerados nas simulações. Assim, o bem-estar de uma determinada combinação é definido como segue

$$Bem - estar(\lambda) = \sum_{j=1}^{42} \left[\frac{\sum_{t=151}^{T=200} A_{j,t}(\lambda) * U_{j,t}^d(\lambda)}{50} \right], \quad (3.2)$$

em que λ representa uma das combinações elencadas na Tabela 11 do Apêndice A, $A_{j,t}$ é o número de agentes que escolheram a estratégia j no período t e $U_{j,t}^d$ é a utilidade determinística total gerada pela estratégia j no período t .

Uma vez obtido o bem-estar gerado por cada combinação de faixas disponíveis por sentido a cada horário, constituiu-se um *ranking* com o intuito de apurar as combinações acusadas pelo modelo como aquelas que acarretam maior benefício aos usuários de transporte, cinco

das quais são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 – As combinações que retornaram maior bem-estar social

h	h1		h2		h3		h4		h5		h6		h7		Bem-estar	
P	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS		
5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	2,2478	
13	5	3	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	2,2478	
8	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	2,2478	
10	4	4	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	2,2478	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	4	4	2,2338

Fonte: Elaboração Própria.

Como é mostrado na Figura 11, 4 combinações empataram em primeiro lugar como as que promovem maior bem-estar social. Nota-se que, dentre estas 4 combinações, todas são caracterizadas pela reversão de no máximo uma faixa por horário e, em particular, pela reversão de uma faixa no horário h_7 , distinguindo-se entre si pela reversão ou não de faixas nos horários h_1 e h_2 . Ou seja, de acordo com o modelo apresentado, contanto que haja uma pista extra no sentido ilha-continente entre às 19h e às 22h, a reversão ou não de faixas nos horários de pico da manhã não causaria qualquer impacto sobre o bem-estar dos usuários das pontes.

Cabe ainda expor as combinações apontadas pelo modelo como aquelas que implicam menor bem-estar social. Tais combinações são exibidas na Figura 12, na qual se observa que medidas extremista seriam socialmente prejudiciais. Isto porque as combinações julgadas como as piores, dentre as analisadas, são aquelas caracterizadas pela implementação do máximo possível de pistas reversíveis em alguns dos horários de pico. Efetivar alguma das combinações exibidas na Figura 12, acabaria por gerar maior bem-estar para os moradores do continente às custas de desutilidade nos deslocamentos dos moradores da ilha, os quais teriam apenas uma faixa à disposição em determinados horários. O benefício auferido por uma parcela dos usuários de transporte não superaria o ônus causado à outra, implicando piora da qualidade dos deslocamentos da população como um todo.

Ainda de acordo com o *ranking* constituído, ocorreu que o bem-estar social adquirido da atual combinação de faixas disponíveis por sentido a cada horário, isto é, 4 faixas disponíveis por sentido em todos

Figura 12 – As combinações que retornaram menor bem-estar social

h	h1		h2		h3		h4		h5		h6		h7		Bem-estar
	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	
43	7	1	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7	2,0085
35	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	7	2,0087
38	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7	2,0087
40	4	4	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7	2,0087
25	4	4	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6	2,0913

Fonte: Elaboração Própria.

os horários, ficou na 24^a colocação, mostrando que há pelo menos 23 combinações mais eficientes.

O PLAMUS (2014) recomendou, como solução aos problemas de tráfego nas pontes, a implementação de uma faixa extra no sentido da ponte Pedro Ivo Campos no intervalo das 06h30 às 08h e também de uma faixa extra no sentido da ponte Colombo Salles das 17h às 19h. Embora os horários adotados nesta pesquisa não sejam perfeitamente compatíveis com os horários indicados pelo PLAMUS (2014), adota-se a combinação 12 como à que mais se assemelha a eles. A combinação 12 é definida pela admissão de uma faixa reversível nos horários h_1 e h_2 , no sentido continente-ilha, e uma faixa reversível no horário h_6 , no sentido ilha-continente, e afigurou na 8^a posição do *ranking* de combinações que geram maior bem-estar social. Destaca-se que a combinação 13, que está entre as combinações empatadas em primeiro lugar, é similar à combinação sugerida pelo PLAMUS (2014), didtinguindo-se apenas por esta implementar uma faixa reversível na Ponte Colombo Salles no horário h_6 ; e aquela, no horário h_7 .

Posto isto, instaura-se uma análise comparativa entre a atual combinação de número de faixas por sentido por horário (combinação 1), a combinação sugerida pelo PLAMUS (2014) (combinação 12) e uma das combinações apontadas por esta pesquisa como as que trazem maior bem-estar social. Tais combinações encontram-se resumidas na Figura 13.

As Figuras a seguir - 14, 15 e 16 - exibem graficamente os principais resultados da análise comparativa proposta. Nestas figuras, as imagens à esquerda refletem a média das condições de trânsito da Ponte Pedro Ivo Campos nos últimos 50 períodos, dentre os 200 considerados

Figura 13 – As combinações alvo de análise comparativa

	h	h1		h2		h3		h4		h5		h6		h7		Bem-estar
	P	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	
Atual (24º)	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2,1674
Plamus (8º)	12	5	3	5	3	4	4	4	4	4	4	3	5	4	4	2,2336
Modelo (1º)	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	2,2338

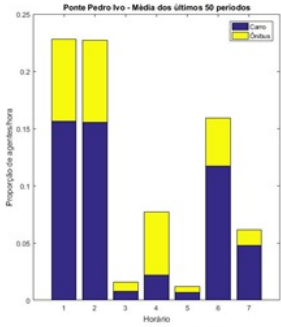
Fonte: Elaboração Própria.

e, por analogia, as imagens à direita se referem ao cenário de tráfego na Ponte Colombo Salles, também nos últimos 50 períodos.

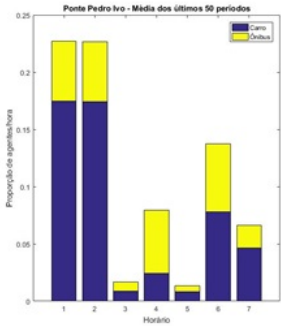
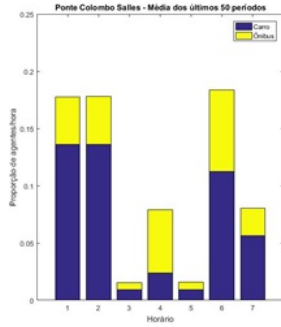
Analisa-se, através da Figura 14, a proporção de agentes que atravessam cada uma das pontes por hora em cada um dos 7 horários disponíveis. Comparando os resultados da combinação atual (1) com a combinação sugerida pelo PLAMUS (2014) (12), nota-se que a inserção de uma faixa reversível em ambos os horários de pico da manhã, h_1 e h_2 , na Ponte Pedro Ivo Campos, e de uma faixa reversível no horário h_6 na Ponte Colombo Salles, acabaria por estimular os moradores do continente a se deslocarem através de carro. Em contrapartida, os agentes moradores da ilha, que teriam menos faixas a sua disposição em quase todos os horários de pico, aumentariam o uso de transporte coletivo.

Em termos percentuais, de acordo com o modelo, em média 31,5% dos agentes que atravessam por hora a Ponte Pedro Ivo nos horários h_1 ou h_2 , o fazem através de ônibus, dada a combinação atual de número de faixas por sentido por horário. A combinação sugerida pelo PLAMUS (2014), por sua vez, gera uma redução desta proporção para 23%, em média. Em compensação, a proporção de agentes que atravessam a Ponte Colombo Salles nos horários de pico da manhã através de ônibus, dada a combinação 1, é de, em média, 23,4%; enquanto para uma configuração de número de faixas conforme a combinação 12 esta proporção chega a uma média de 33%.

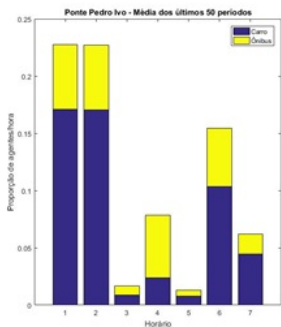
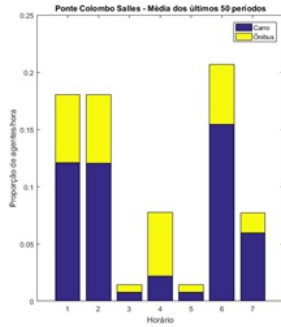
Figura 14 – Análise Comparativa - Proporção de agentes por hora em cada horário



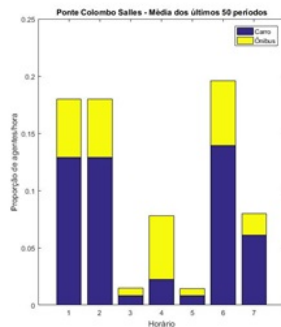
a) Combinação 1 (Atual - 24°)



b) Combinação 12 (Plamus, 8°)



c) Combinação 5 (Modelo, 1°)



Fonte: Elaboração Própria.

Ainda sobre a Figura 14, percebe-se que os resultados advindos da combinação 12 são bastante semelhantes àqueles oriundos da combinação 5, a qual foi apontada pelo modelo como uma das que trazem maior bem-estar social. Note, porém, que a combinação 5 faz com que, em média, 25% dos agentes que atravessam a Ponte Pedro Ivo nos horários h_1 e h_2 utilizem ônibus, e 28% atravessam a Ponte Comlombo Salles nestes mesmos horário, através deste meio de deslocamento. Isto é, diante de uma política de reversão consoante à combinação 5, a utilização de ônibus pelos moradores da ilha e do continente é mais simétrica se comparada à combinação apontada pelo PLAMUS (2014).

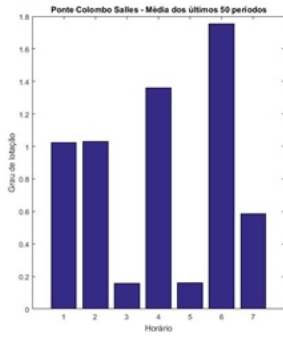
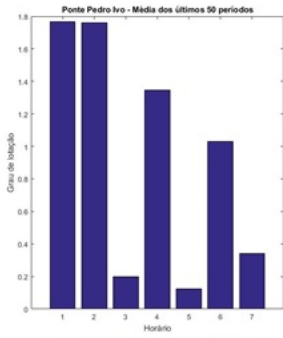
Cabe ressaltar, que estes mesmos gráficos foram gerados para as demais combinações que empataram em primeiro lugar com a combinação 5 - combinações 13, 8 e 10 - mostrando resultados demasiadamente parecidos, não sendo aqui apresentados por esta razão.

Os aspectos citados acima são ratificados na Figura 15, que mostra o grau de lotação do sistema de transporte público para cada uma das combinações em análise. Contrapondo as combinações 1 e 12, fica bastante evidente a melhora nas condições de deslocamento dos moradores do continente que utilizam ônibus, já que o grau de lotação nos horários h_1 e h_2 baixando de quase 1,76 (combinação 1) para 1,28 (combinação 12). Porém esta melhora para os moradores do continente, conforme previamente exposto, é marcada por uma diminuição na qualidade de deslocamento dos agentes moradores da ilha que utilizam ônibus, haja vista o grau de lotação nos horários de pico da manhã para esses agentes, os quais utilizam a Ponte Colombo Salles nos referidos horários, passe de 1,02 (combinação 1) para 1,45 (combinação 12).

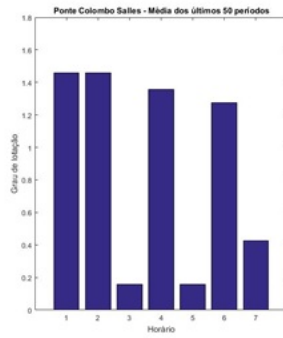
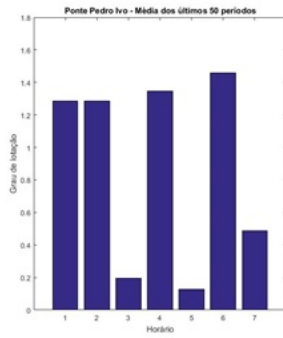
Apesar de a combinação 12 gerar um maior bem-estar do sistema como um todo quando comparada à combinação 1, observa-se que a combinação 5 reflete ainda mais qualidade de deslocamento para a população, haja vista melhora as condições dos moradores do continente sem piorar tanta às dos moradores da ilha. É o que pode ser visto na Figura 15, em que os gráficos referentes à combinação 5 são os que possuem barras mais uniformes se comparadas as demais combinações apresentadas.

Reitera-se novamente o fato de que os mesmo gráficos foram gerados para as demais combinações empatadas em primeiro lugar em conjunto com a combinação 5 e que não houve diferenças relevantes a ponto de serem aqui expostas.

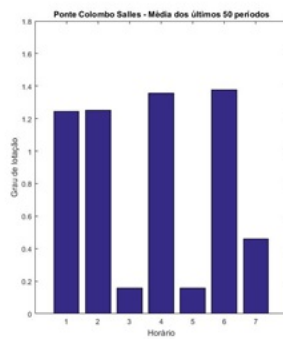
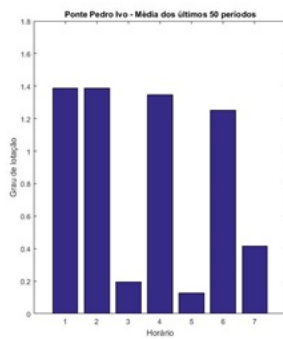
Figura 15 – Análise Comparativa - Grau de lotação por hora em cada horário



a) Combinação 1 (Atual - 24°)



b) Combinação 12 (Plamus, 8°)

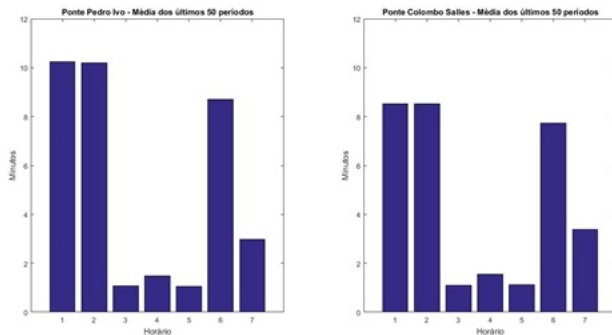


c) Combinação 5 (Modelo, 1°)

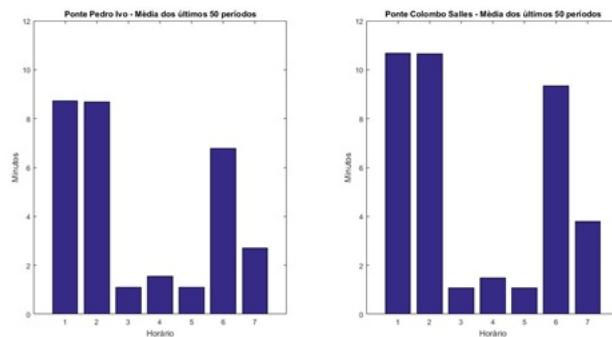
Fonte: Elaboração Própria.

Parte-se agora para a análise comparativa do tempo despendido pelos agentes para realizar a travessia das pontes da cidade de Florianópolis. Diferente das figuras anteriores, por hora, contrapõem-se apenas as combinações 1 e 12, como é exibido na Figura 16.

Figura 16 – Análise Comparativa - Tempo de travessia das pontes em cada horário



a) Combinação 1 (Atual - 24°)



b) Combinação 12 (Plamus, 8°)

Fonte: Elaboração Própria.

Da Figura 16, conclui-se que ao adicionar uma faixa reversível nos horários h_1 , h_2 e h_6 , reduz, em média, 15% o tempo de travessia dos moradores do continente no deslocamento de ida e aumenta 17%, em média, o tempo destes agentes regressarem as suas residências. Ao mesmo tempo, aumenta-se o tempo de deslocamento de ida dos moradores da ilha em torno de 25% e reduz-se o tempo de seus deslocamentos

de volta em aproximadamente 16%. Ou seja, a adoção da combinação 12, de acordo com o modelo, melhoraria as condições de trânsito na Ponte Pedro Ivo, causando uma redução no tempo de travessia em todos os horários de pico, o que seria benéfico para os moradores do continente no período da manhã e vantajoso para os moradores da ilha no final de tarde. Em contrapartida, aumentaria o tempo de travessia da Ponte Colombo Salles em todos os horários, em maiores proporções.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da pesquisa desenvolvida foi possível averiguar alguns aspectos referentes à mobilidade urbana da Região da Grande Florianópolis. Destacou-se um alto crescimento da frota de veículos desta região, principalmente as dos municípios de Palhoça e Biguaçu. Verificou-se ainda um constante aumento da taxa de motorização (número de veículos a cada 1000 habitantes) na última década. Foi colocado em evidência que a combinação de uma grande parcela da população da Região da Grande Florianópolis realizando deslocamento pendular com uma imperante preferência por uso de veículos particulares seria um fator chave para os frequentes problemas de tráfego nas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles. Foi assinalado ainda que a cidade Florianópolis está muito comumente nas piores colocações em *rankings* que tem por propósito medir e comparar a qualidade da mobilidade urbana entre determinadas localidades.

Desenvolveu-se, então, o modelo computacional baseado em agentes inicialmente proposto com base, essencialmente, nos dados do Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis, PLAMUS (2014) e tomando como referência o trabalho desenvolvido por Avancini e Silveira (2016).

O modelo construído foi capaz de refletir algumas características do atual cenário da mobilidade urbana da região, como: um maior volume de tráfego nos horários de pico da manhã na Ponte Pedro Ivo Campos em relação à Ponte Colombo Salles; um baixo fluxo de agentes no meio da tarde; um alto grau de lotação dos ônibus enfrentado principalmente pelos moradores do continente. Destacou-se, porém, que o modelo não conseguiu traduzir alguns aspectos que são empiricamente observados, em especial, o modelo trouxe como resultado que o tempo de travessia da Ponte Colombo Salles no horário de pico da tarde (horário h_6) é menor que o tempo de travessia da Ponte Pedro Ivo Campos neste mesmo horário, quando é sabido da ocorrência do contrário.

O modelo possibilitou ainda o desenvolvimento de um experimento de políticas públicas fundamentado em uma das soluções apontadas pelo PLAMUS (2014) para amenizar os problemas com congestionamentos na região: a implementação de faixas reversíveis nas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles. Foram simulados os resultados advindos de diversas combinações diferentes de número de faixas por sentido e por horário.

A partir de um *ranking*, gerado para fins de comparação entre as

combinações consideradas, baseado no bem-estar produzido por cada uma delas, identificou-se que a implantação de faixas reversíveis nas ponte Pedro Ivo Campos e Colombo Salles são boas alternativas de políticas de curto prazo na região da Grande Florianópolis, mas somente quando se reverte no máximo uma faixa por horário. No outro extremo, as piores políticas possíveis, de acordo com o modelo, são aquelas que inserem 3 faixas em algum dos horários disponíveis, mantendo apenas uma faixa no sentido inverso. Apontou-se também que, de acordo com o modelo, a combinação atualmente vigente em Florianópolis encontra-se em 24^o lugar e que a combinação sugerida pelo (PLAMUS, 2014) ficou na 8^a colocação, entre as 46 diferentes combinações de número de faixas disponíveis em cada sentido, por horário.

Por uma questão de limitação de tempo, não foi possível implementar determinados experimentos que podem trazer resultados relevantes para a análise da mobilidade urbana da Região da Grande Florianópolis, sendo alguns dos quais elencados a seguir. Considerou-se neste modelo que os ônibus são divididos uniformemente a cada hora, mantendo-se assim imutáveis no decorrer dos períodos avaliados. Porém, sugere-se que, ao invés disso, as empresas de ônibus possam, assim como os agentes, observar os períodos anteriores e adaptarem-se, de forma que sejam capazes de distribuir a frota de ônibus visando à minimização de custos. Por exemplo, possibilitar às empresas, a transferência de ônibus que estejam alocados em horários em que há baixo grau de lotação para horários em que há superlotação.

Nas funções utilidade consideradas no modelo exposto, apenas atributos das estratégias foram levados em conta (custo, tempo despendido, lotação), entretanto, acredita-se que a inserção de variáveis que tornem os agentes mais heterogêneos entre si, como especificar suas restrições orçamentárias e se possuem ou não automóvel, pode acarretar resultados relevantes.

Sugere-se ainda que, em vez da divisão do dia em 7 horários, sejam considerados 16 horários, cada um correspondendo a uma hora. Esta mudança, embora aumentasse o número de estratégias disponíveis e, por consequência, a complexidade do modelo, facilitaria bastante a análise dos resultados.

Há ainda diversos experimentos que podem ser feitos no tocante a variações de preço dos deslocamentos continente-ilha, como a implantação de pedágios em horários de pico, a diminuição do valor da passagem de ônibus, implementação de tarifa zero para os estudantes, e diversas outras ações que frequentemente são apontadas como possíveis soluções para o problema de tráfego nas pontes.

Ademais, como medida de retificação do resultado inesperado, o qual apontou que a travessia da Ponte Pedro Ivo Campos no horário h_6 é mais lenta que a travessia da Ponte Colombo Salles neste mesmo horário, recomenda-se a alteração da forma com que o modelo foi calibrado. Para isso, propõe-se que seja adicionado à função-objetivo utilizada como referência para a calibração do modelo computacional - equação (3.1) - fatores que restrinjam o valor do desvio padrão das variáveis centrais d_k , com o intuito de evitar que sejam tão altos quanto se apresentaram para algumas destas variáveis. Isto faria com que os valores estimados e observados as variáveis d_k fossem mais assemelhados.

REFERÊNCIAS

- AVANCINI, D.; SILVEIRA, J. Demanda por transporte rodoviário urbano: um modelo computacional baseado em agentes. 2016.
- BEN-AKIVA, M.; BIERLAIRE, M. Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. In: **Handbook of transportation science**. [S.l.]: Springer, 1999. p. 5–33.
- BONABEAU, E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 99, n. suppl 3, p. 7280–7287, 2002.
- DETRAN/SC. **Frota de veículos**. 2017. Disponível em: <<http://consultas.detrannet.sc.gov.br/Estatistica/Veiculos/>>. Acesso em: 14 ago. 2016.
- ESTADÃO, O. **Calculadora da mobilidade urbana**. 2017. Disponível em: <<http://infograficos.estadao.com.br/economia/custo-transporte/>>. Acesso em: 12 jul. 2017.
- FECOMÉRCIO/SC. **Pesquisa de Mobilidade Urbana em Santa Catarina**. 2014. Disponível em: <<http://www.fecomercio-sc.com.br/?s=pesquisa+de+mobilidade+urbana>>. Acesso em: 17 set. 2017.
- FREITAS, G. G. d. Economia e sistemas complexos: interações sociais, dinâmicas emergentes e uma análise da difusão da internet na cidade de são paulo. **Economia e sistemas complexos: interações sociais, dinâmicas emergentes e uma análise da difusão da internet na cidade de São Paulo**, 2003.
- GILBERT, N. **Agent-based models**. [S.l.]: Sage, 2008.
- HOMMES, C. **Behavioral rationality and heterogeneous expectations in complex economic systems**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.
- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. **Proceedings of the 37th conference on Winter simulation**. [S.l.], 2005. p. 2–15.

MEDEIROS, V. A. S. d. *Urbis brasiliae ou sobre cidades do brasil: inserindo assentamentos urbanos do país em investigações configuracionais comparativas*. 2006.

PLAMUS. Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis. 2014. Disponível em: <<http://www.plamus.com.br/index.php>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

PMF. Secretaria Municipal de Transportes e Mobilidade Urbana. Dados da Secretaria. 2018. Disponível em: <<http://www.pmf.sc.gov.br/entidades/transporte/index.php>>. Acesso em: 8 jan. 2018.

SOARES, A. G. *Notas sobre a ocupação automobilística e a crise do transporte social urbano da cidade de florianópolis*. 2003.

TRAIN, K. E. Discrete choice methods with simulation. [S.l.]: Cambridge university press, 2009.

APÊNDICE A – As 46 combinações consideradas no experimento de políticas públicas exposto na Seção 3.1.

Tabela 11 – Número de faixas por sentido por horário adotado em cada combinação

h	h_1		h_2		h_3		h_4		h_5		h_6		h_7	
ρ	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS
1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	4	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	4	4
5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5
6	5	3	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
7	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	4	4
8	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5
9	4	4	5	3	4	4	4	4	4	4	3	5	4	4
10	4	4	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5
11	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	3	5
12	5	3	5	3	4	4	4	4	4	4	3	5	4	4
13	5	3	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5
14	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	5	3	5
15	4	4	5	3	4	4	4	4	4	4	3	5	3	5
16	5	3	5	3	4	4	4	4	4	4	3	5	3	5
17	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
18	4	4	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
19	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6	4	4
20	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6
21	6	2	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
22	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6	4	4
23	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6
24	4	4	6	2	4	4	4	4	4	4	2	6	4	4
25	4	4	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6
26	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6	2	6
27	6	2	6	2	4	4	4	4	4	4	2	6	4	4
28	6	2	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6
29	6	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2	6	2	6
30	4	4	6	2	4	4	4	4	4	4	2	6	2	6
31	6	2	6	2	4	4	4	4	4	4	2	6	2	6
32	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
33	4	4	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
34	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7	4	4

h	h_1		h_2		h_3		h_4		h_5		h_6		h_7	
ρ	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS	PI	CS
35	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7
36	7	1	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
37	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7	4	4
38	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7
39	4	4	7	1	4	4	4	4	4	4	1	7	4	4
40	4	4	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7
41	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7	1	7
42	7	1	7	1	4	4	4	4	4	4	1	7	4	4
43	7	1	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7
44	7	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	7	1	7
45	4	4	7	1	4	4	4	4	4	4	1	7	1	7
46	7	1	7	1	4	4	4	4	4	4	1	7	1	7

Fonte: Elaboração própria.