ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

RELATÓRIO FINAL

IMPACTO DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA *MULTI-LANE FREE FLOW* NA PONTE RIO-NITERÓI ACOMPANHADO DE TARIFA DINÂMICA E FAIXA REVERSÍVEL

Ecovias Ponte

21/07/2025

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS 5

LISTA DE TABELAS 9

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO 10

2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS 14

3. ETAPA 1: INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E ADAPTAÇÃO DO PÓRTICO 15

1.1. laudo instalação do equipamentos 17

1.2. Laudo do pórtico 18

4. ETAPA 2: AQUISIÇÃO DE LICENÇA DE SOFTWARE 19

5. ETAPA 3: TESTES NO LABORATÓRIO MLFF 19

1.1. Plano de manutenção e intervenções no pórtico. 21

6. ETAPA 4: PESQUISAS 26

6.1. Estado da prática 26

6.1.1. Sistemas de Cobrança com Livre Passagem 26

6.1.2. Medidas Complementares Utilizadas para Aumentar a Eficiência Operacional de Rodovias 36

6.2. Análise de Demanda 43

6.2.1. Evolução do Volume Mensal 44

6.2.2. Evolução da Proporção de veículos que usam cobrança automática 46

6.2.3. VMDm por Categoria Veicular 46

6.3. Pesquisa Origem-Destino 48

6.3.1. Metodologia 48

6.3.2. Dados Obtidos 49

6.3.3. Fatores de Expansão 50

6.4. Pesquisa de Preferência Declarada 53

6.4.1. Especificação do modelo 53

6.4.2. Projeto experimental 56

6.4.3. Questionário da PD 58

6.4.4. Modelagem 60

7. ETAPA 5: ESTUDOS E RELATÓRIOS 67

7.1. Dashboard Análise da Demanda 67

7.2. Resultados da Pesquisa OD 68

7.2.1. Veículos Leves 70

7.2.2. Caminhões com 2 Eixos 79

7.2.3. Caminhões com mais de 2 Eixos 88

7.2.4. Distâncias e tempos das viagens 93

7.3. Resultados da Pesquisa PD 98

7.3.1. Niterói-Rio de Janeiro 98

7.3.2. Rio de Janeiro-Niterói 113

7.4. Simulação de Tráfego 124
7.4.1. Modelo de microssimulação VISSIM 124
7.4.2. Construção dos cenários para a simulação 125
7.4.3. Cenários modelados 131
7.4.4. Limitações dos cenários simulados 135
7.4.5. Resultados das simulações 136
7.5. Sinistros na Ponte Rio-Niterói 151
7.6. Análise de Assertividade do Sistema Multi-Lane Freeflow 157
8. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS *161*
8.1. Análise dos Dados de Tráfego da Praça de Pedágio da Ecovias Ponte 161
8.2. Pesquisa de Origem e Destino 162
8.3. Pesquisa de Preferência declarada 163
8.4. Simulação de Tráfego 165
8.5. Sinistros na Ponte Rio-Niterói 166
8.6. Análise de Assertividade Do Sistema Multi-Lane Free Flow 166
8.7. Recomendações 167
8.8. Memorial Descritivo 167
8.9. Minuta De Revisão Normativa 167
8.9.1. Proposta de revisão da Normativa: previsão de compensação da concessionária em função da perda de receita devido à Inadimplência. 170
9. BIBLIOGRAFIA *172*
APÊNDICE 1 – Questionário PD *179*
APÊNDICE 2 – Questionário OD *200*
APÊNDICE 3 – Projeto de Instalação de Sistema Multi-Lane Free Flow *202*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Implantação dos equipamentos *16*
Figura 2 – Disposição dos equipamentos *16*
Figura 3 – Laudo de instalação *17*
Figura 4 – Laudo Pórtico *18*
Figura 2 – Esquemático da arquitetura de funcionamento do pórtico *20*
Figura 7 – Sistema gerenciamento de manutenção *22*
Figura 8 – Suporte Antena-A3 ..... *23*
Figura 9 – Suporte Câmera-A3 ..... *24*
Figura 10 – Suporte Ecovias Ponte IR-A3 ..... *25*
Figura 3 – Pórtico do sistema MLFF no Equador *28*
Figura 4 – Pórtico de testes na EcoPistas *34*
Figura 5 – Câmeras do pórtico de testes na EcoPistas *35*
Figura 6 – Faixas reversíveis no Wilshire Boulevard, Los Angeles, Califórnia, EUA *36*
Figura 7 – Sinal estático na Av. Beira Rio, Recife, PE *39*
Figura 8 – Sinalização dinâmica com marcação amarela do pavimento *39*
Figura 9 – Ilustração do sistema de faixa reversível com barreira móvel *40*
Figura 10 – Praça de Pedágio Ecovias Ponte *43*
Figura 11 – Evolução do Volume Mensal (2015-2023) *44*
Figura 12 – Variação do Volume Total Mensal (%) (2015-2023) *45*
Figura 13 – Variação do Volume Médio Diário Mensal (%) (2015-2023) *45*
Figura 14 – Variação da Proporção de Veículos com Pagamento Automático (2015-2023) *46*
Figura 15 – Variação do Volume Médio Diário Mensal por Categoria de Veículo (Praça Ecovias Ponte - Manual) *47*
Figura 16 – Variação do Volume Médio Diário Mensal por Categoria de Veículo (Praça Ecovias Ponte - AVI) *47*
Figura 17 – Praça de Pedágio Ecovias Ponte *49*
Figura 18 – Número de entrevistados por categoria de veículo *50*
Figura 19 – Contextualização da pesquisa PD *59*
Figura 20 – Situação de escolha 1 ..... *59*
Figura 21 – Situação de escolha 2 ..... *60*
Figura 22 – Dashboard *67*
Figura 23 – Zonas OD *69*
Figura 24 – Tipo de local de origem e destino *70*
Figura 25 – Frequência de viagem *71*
Figura 26 – Uso de cobrança automática *71*
Figura 27 – Locais de origem e destino *74*
Figura 28 – Linhas de desejo das viagens internas (bairros RJ - bairros Niterói) para veículos leves *75*

Figura 29 – Linhas de desejo das viagens de bairros do RJ para municípios da RM para veículos leves 76
Figura 30 – Linhas de desejo das viagens de municípios da RM para bairros de Niterói para veículos leves 77
Figura 31 – Viagens por bairros de origem (destino a municípios da região Leste do RJ) .. 78
Figura 32 – Viagens por município de destino na região Leste do RJ 79
Figura 33 – Tipo de origem e destino das viagens dos caminhões de 2 eixos 80
Figura 34 – Tipo de carga transportada 80
Figura 35 – Uso de cobrança automática 81
Figura 36 – Locais de origem e destino para caminhões com 2 eixos 83
Figura 37 – Linhas de desejo das viagens internas (bairros RJ - bairros Niterói) para caminhões com 2 eixos 84
Figura 38 – Linhas de desejo das viagens de bairros do RJ para municípios da RM para caminhões com 2 eixos 85
Figura 39 – Linhas de desejo das viagens entre municípios da RM para caminhões com 2 eixos 86
Figura 40 – Linhas de desejo das viagens entre municípios da RM e bairros de Niterói para caminhões com 2 eixos 87
Figura 41 – Tipo de origem e destino para caminhões com mais de 2 eixos 88
Figura 42 – Tipo de carga transportada para caminhões com mais de 2 eixos 88
Figura 43 – Tipo de carga transportada para caminhões com mais de 2 eixos 89
Figura 44 – Locais de origem e destino para caminhões com mais de 2 eixos 91
Figura 45 – Linhas de desejo das viagens para caminhões com mais de 2 eixos 92
Figura 46 – Exemplo de rota entre os centroides de um par origem--destino 94
Figura 47 – Distribuição das distâncias de viagem dos veículos leves 95
Figura 48 – Distribuição dos tempos de viagem dos veículos leves 95
Figura 49 – Distribuição das distâncias de viagem dos caminhões com 2 eixos 96
Figura 50 – Distribuição dos tempos de viagem dos caminhões com 2 eixos 96
Figura 51 – Distribuição das distâncias de viagem dos caminhões com mais de 2 eixos 97
Figura 52 – Distribuição dos tempos de viagem dos caminhões com mais de 2 eixos 97
Figura 53 – Distribuição de respondentes - Manhã 98
Figura 54 – Distribuição de respondentes em relação ao horário de passagem pela ponte - Manhã 99
Figura 55 – Frequência de passagem pela ponte 99
Figura 56 – Frequência de passagem pela ponte agrupado 100
Figura 57 – Flexibilidade para chegar e sair 101
Figura 58 – Distribuição de escolhas de horário de passagem 101
Figura 59 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% do total horário) 102
Figura 60 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% de cada frequência) ... 103
Figura 61 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% de flexibilidade) 103
Figura 62 – Variando o custo do pedágio fora do pico 108
Figura 63 – Variando o custo do pedágio no pico 108

Figura 64 – Variando tempo de viagem no pico (expresso como % em relação ao horário fora do pico) *109*
Figura 65 – Variando SDE, ou seja, o tempo antes em relação ao horário preferido *110*
Figura 66 – Variando SDL, ou seja, o tempo depois em relação ao horário preferido *111*
Figura 67 – Distribuição de respondentes -Tarde *113*
Figura 68 – Distribuição de respondentes em relação ao horário de passagem pela ponte - Tarde *114*
Figura 69 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% do total horário) *114*
Figura 70 – Frequência de passagem pela ponte *115*
Figura 71 – Frequência de passagem pela ponte agrupado *116*
Figura 72 – Flexibilidade para chegar e sair *116*
Figura 73 – Variando o custo do pedágio fora do pico *120*
Figura 74 – Variando o custo do pedágio no pico *120*
Figura 75 – Variando tempo de viagem no pico (expresso como % em relação ao horário fora do pico) *121*
Figura 76 – Variando SDE, ou seja o tempo antes em relação ao horário preferido *122*
Figura 77 – Variando SDL, ou seja, o tempo depois em relação ao horário preferido *123*
Figura 78 – Demanda horária em cada rampa de entrada *128*
Figura 79 – Demada horária desagregada em intervalos de 15 minutos *128*
Figura 80 – Início da medição - km 322,97 ..... *130*
Figura 81 – Fim da medição - km 333,72 ..... *130*
Figura 82 – Segmento considerado na análise *130*
Figura 83 – Demanda do tráfego no cenário base – picos destacados *132*
Figura 84 – Cenário 1 com a praça *132*
Figura 85 – Cenário 2 sem a praça *132*
Figura 86 – Transição da faixa reversível no lado Rio (período da manhã) *133*
Figura 87 – Transição da faixa reversível no lado Niterói (período da manhã) *133*
Figura 88 – Transição da faixa reversível no lado Rio (período da tarde) *133*
Figura 89 – Transição da faixa reversível no lado Niterói (período da tarde) *133*
Figura 90 – Comparação entre a demanda atual e a demanda estimada antecipando 15 minutos a saída *134*
Figura 91 – Comparação entre a demanda atual e a demanda estimada antecipando 30 minutos a saída *135*
Figura 92 – Variação nos tempos de viagem observados em diferentes simulações (1 a 10) de um mesmo cenário *136*
Figura 93 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Niterói-Rio – pico da manhã *138*
Figura 94 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Niterói-Rio – pico da manhã *139*
Figura 95 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Rio-Niterói – pico da manhã *141*
Figura 96 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Rio-Niterói – pico da manhã *142*

Figura 97 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Rio-Niterói – pico da tarde *143*
Figura 98 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Rio-Niterói – pico da tarde *144*
Figura 99 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Niterói-Rio – pico da tarde *145*
Figura 100 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Niterói-Rio – pico da tarde *146*
Figura 101 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – cenários com variação de demanda *148*
Figura 102 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – cenários com variação de demanda *149*
Figura 103 - Evolução dos sinistros registrados *151*
Figura 104 – Gravidade dos sinistros *152*
Figura 105 – Tipo dos sinistros *153*
Figura 106 – Localização dos sinistros no entorno do pedágio *154*
Figura 107 – Quantidade de sinistros por hora *155*
Figura 108 – Tipo de sinistro por localização *155*
Figura 109 – Localização do pórtico teste MLFF *157*
Figura 110 – Pórtico teste MLFF *157*
Figura 111 – Cadeia de responsabilidade e marcos para liberação dos valores arrecadados. *171*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de Material *13*
Tabela 2 – Plano de Manutenção *22*
Tabela 3 – Síntese dos exemplos de aplicação apresentados no relatório *29*
Tabela 4 – Volume médio diário por dia da semana para veículos leves *50*
Tabela 5 – Volume médio diário por dia da semana para caminhões 2 eixos *51*
Tabela 6 – Volume médio diário por dia da semana para caminhões com mais de 2 eixos *52*
Tabela 7 – Fatores de expansão *52*
Tabela 8 – Atributos e níveis - sentido Niterói-Rio de Janeiro *54*
Tabela 9 – Atributos e níveis - sentido Rio de Janeiro-Niterói *55*
Tabela 10 – Valores iniciais dos parâmetros *56*
Tabela 11 – Desenho PD Niterói-Rio de Janeiro *57*
Tabela 12 – Desenho PD Rio de Janeiro-Niterói *58*
Tabela 13 – Viagens por tipo de deslocamento entre zonas para veículos leves *72*
Tabela 14 – Viagens por tipo de deslocamento entre zonas para caminhões com 2 eixos .. *81*
Tabela 15 – Viagens por tipo de deslocamento entre zonas para caminhões com 2 eixos .. *89*
Tabela 16 - Modelo estimado para o sentido Niterói-Rio de Janeiro *104*
Tabela 17 – Elasticidades Niterói-Rio de Janeiro *105*
Tabela 18 – Antecipação de 15 minutos *112*
Tabela 19 – Antecipação de 30 minutos *112*
Tabela 20 – Modelo estimado para o sentido Rio de Janeiro-Niterói *117*
Tabela 21 – Elasticidades sentido Rio de Janeiro-Niterói *118*
Tabela 22 – Rampas de acesso à Ponte Rio-Niterói *127*
Tabela 23 – Comparação entre os tempos médios de viagem conhecidos e os resultantes da simulação *131*
Tabela 24 – Descrição dos cenários desenvolvidos *131*
Tabela 25 – Análises comparativas realizadas *137*
Tabela 26 – Impacto na segurança viária nos estudos encontrados. *156*
Tabela 27 – Percentual de veículos que possuem número de eixos compatível com a categoria (MLFF Ecovias Ponte - março/2025) *158*
Tabela 28 – Composição de tráfego (março/2025) *159*
Tabela 29 – Percentual de placa consolidada igual à placa dianteira ou traseira *160*

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1. Título do projeto: Sistemas *Multi-lane Freeflow* em rodovias sob Concessão ANTT.

1.2. Resumo

Este documento relata um dos subprojetos desenvolvidos com recursos RDT que tem por objetivo geral estudar os impactos da implantação do sistema MLFF e a assertividade do conjunto de classificação em laboratório "pré-montado" na Ponte Rio-Niterói, com a aquisição de equipamentos, licenças, desenvolvimento do software e testes de assertividade do conjunto de classificação.

São objetivos deste subprojeto, que aborda o ambiente da Concessão Ecovias Ponte: (i) avaliação das condições atuais de operação da Ponte Rio-Niterói e elaboração de cenários de evolução da demanda; (ii) análise dos impactos da solução MLFF nas condições operacionais presente e futura; (iii) análise dos impactos nas condições operacionais da via decorrentes da introdução das seguintes medidas complementares ao MLFF: sistema de tarifa variável e implantação de faixas reversíveis; (iv) análise da assertividade do conjunto de classificação em laboratório "pré-montado" na Ponte Rio-Niterói.

Para avaliação das condições atuais de operação da rodovia e evolução da demanda foram realizados os seguintes estudos: análise do tráfego de veículos pagantes nas praças de pedágio e pesquisa origem-destino. A pesquisa foi realizada na praça de pedágio da Ponte Rio-Niterói, de forma a obter dados sobre os deslocamentos realizados pelos motoristas que cruzam o local.

Em relação ao segundo e terceiro objetivo, foi realizada uma pesquisa de preferência declarada para avaliar a disposição dos usuários a mudar seu horário de travessia para fora do horário de pico, mediante diferentes estratégias de tarifação, permitindo a estimação de modelos econométricos que viabilizaram avaliar o comportamento dos usuários e determinar a elasticidade da demanda frente a essas mudanças propostas. As análises dos impactos das diversas medidas nas condições operacionais da Ponte Rio-Niterói foram realizadas através de modelagem de tráfego. Para este fim, foi utilizado o modelo de micro simulação de tráfego VISSIM. A partir de simulação de tráfego foram realizadas análises comparativas de diferentes cenários, tanto para o período de pico da manhã como da tarde, considerando a implantação de sistema MLFF, implantação de sistemas com faixas reversíveis e cenários que contemplam prováveis alterações nos perfis de demanda decorrentes de estratégias de tarifação.

De forma complementar, foi realizada uma análise quanto aos sinistros registrados nas proximidades da praça de pedágio da Ecovias Ponte. Essa análise teve como objetivo estudar os potenciais de redução de acidentalidade a partir da implementação do sistema MLFF.

Em relação ao quarto objetivo, análise da assertividade do sistema MLFF, foi analisado um conjunto de dados do pórtico em teste na Ponte Rio-Niterói. O período de análise corresponde ao mês de março de 2025 e o banco de dados apresenta os veículos que passaram pelo pórtico no período de análise com a classificação conforme as categorias de pedágio, o número de eixos e a placa identificada.

1.3. Palavras-Chave: *Multi-lane Freeflow*, Concessão rodoviária e Análise de demanda.

1.4. Justificativas

O desenvolvimento do projeto se justifica pela crescente implementação de sistemas MLFF e pela necessidade de adaptação das ferramentas de gestão e análise de tráfego, visando maior eficiência operacional, segurança e melhor prestação de serviço.

A implantação de sistemas Multi-lane Freeflow (MLFF) representa uma evolução significativa na gestão de pedágios, permitindo que os veículos passem pelas praças de pedágio sem a necessidade de parar ou reduzir a velocidade. Essa tecnologia utiliza sistemas de identificação eletrônica para tornar a cobrança mais eficiente e fluida, eliminando barreiras físicas e permitindo múltiplas faixas de tráfego livre. No entanto, a adoção do MLFF enfrenta diversas barreiras que precisam ser analisadas e superadas. Entre essas barreiras estão a aceitação dos usuários, a compatibilidade tecnológica, os custos de implementação e manutenção, e a necessidade de ajustes na infraestrutura existente.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo Geral: Estudar os impactos da implantação de Conjunto de Vídeo Auditoria em laboratório do sistema multi-lane freeflow "pré-montado" na Ponte Rio-Niterói, Niterói, com o desenvolvimento e gerenciamento do projeto, suporte a operação e testes de assertividade do Conjunto de Vídeo Auditoria.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- Avaliação das condições atuais de operação da Ponte Rio-Niterói e elaboração de cenários de evolução da demanda;
- Análise dos impactos da solução MLFF nas condições operacionais presente e futura;
- Análise dos impactos nas condições operacionais da via decorrentes da introdução das seguintes medidas complementares ao MLFF: sistema de tarifa variável e implantação de faixas reversíveis;
- Análise da assertividade do conjunto de classificação em laboratório "pré-montado" na Ponte Rio-Niterói.

1.6. Organização do trabalho:

Este relatório está estruturado em 8 capítulos. Após a introdução, o capítulo 2 apresenta os métodos e técnicas utilizadas no estudo. Os capítulos 3, 4, 5, 6 e 7 descrevem as etapas que compõem o plano de trabalho. O capítulo 8 sintetiza as conclusões, considerações finais e produtos do projeto.

1.7. Período de execução:

O projeto foi executado no período entre o dia 11/07/2022 à 31/12/2024.

1.8.Local de execução:

As atividades do projeto foram executadas no Laboratório de Sistemas de Transportes (LASTRAN), vinculado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde ocorreram as análises técnicas, reuniões da equipe e testes com os dados.

O laboratório com os equipamentos do MLFF foi instalado no pórtico número 24, sentido Niterói - Rio de Janeiro, suspenso sobre 4 faixas, garantindo uma área desobstruída de 6,35m de altura.

1.9. Equipe executora:

A equipe executora foi composta pela coordenadora Helena Beatriz Bettella Cybis, PhD, e pela vice-coordenadora Ana Margarita Larranaga Uriarte, PhD. Também integraram a equipe as estudantes de doutorado Giovana Facchini, Me., Mariana Lovato dos Santos, Me., Lucas Cavalcante Machado, Me., o aluno egresso Douglas Zecchin, Dr., o estudante de mestrado Sander Fraga Farinha da Silva, Eng., com apoio do graduando de Engenharia Civil Raul Júlio Campelo Motta.

1.10. Lista de Material

SISTEMAS MULTI-LANE FREEFLOW EM RODOVIAS SOB CONCESSÃO ANTT

Identificação automática de veículos (AVI)			
Descrição	**Fabricante**	**PN**	**Quantidade**
TITAN, High Performance Reader, AVI High Speed Reading RFID	Star Systems	HRD22000-F-1A	2
Artefato Protocol License	Star Systems	HRD20000-L9	2
802.3at Gigabit POE Injector with power cord	Star Systems	HMS07012	2
Titan, 2 Meter Ethernet CABLE, M12 Plug, 8 Position, Code A,	Star Systems	HCB15000-4	2
AVIOR, Narrow Beam Tolling Antenna	Star Systems	HAN25010-1-M	8
6 meter cable, LMR 400 equivalent N Type Male to N Type Male	Star Systems	HCB08002 6	8

Classificação automática de veículos (AVC)			
Descrição	**Fabricante**	**PN**	**Quantidade**
Laser scanner detector	Comark	LSR2001T	4
Raser scanner detector	Comark	RSR4001L	4
Sensors Bracket	Comark	ST-SN-001	4
Prot	Comark	Protez	4
Power Supply 12V 75W	Digimax	SDR-75-24	8
AXLE COUNTER	Tattile	F02002-000	8
EXTERNAL ILLUMINATOR IR H80/V30 TAT 1200	Tattile	F01920-000	8

ADATTATORE DA PALO VIDEOTEC WSFPO_TATTILE COLORE RAL 5002	Tattile	T19841	8
KIT ADATTATORE PALO ORIZZONTALE	Tattile	T19943	8

Sistema de fiscalização de veículos (VES)			
Descrição	**Fabricante**	**PN**	**Quantidade**
VEGA SMART 2HD NRP	Tattile	F01768	4
EXTERNAL ILLUMINATOR IR H40/V15 TAT 1200	Tattile	F01717	4
GPS on n.1 Vega Smart 2HD NRP	Tattile	T20286	1
VEGA SMART 2HD IR7	Tattile	F01761-2C1	4
EXTERNAL ILLUMINATOR IR730 H40/V15 TAT 1200	Tattile	F01921-000	4
KIT MOUNTING EXTERNAL ILLUMINATOR	Tattile	T21075	8
Carmen SDK Freeflow for ANPR, 4 core, 1 regional license	ARH	CARMEN FF Quad	1

Controladores de zona			
Descrição	**Fabricante**	**PN**	**Quantidade**
Zone controller industrial server DELL XR2	DELL		1
IE4010 with 24GE Copper PoE+ ports and 4GE SFP uplink ports	CISCO	IE-4010-4S24P	2
Cables, Power Supply, Cables Terminations	N/A		1
Rack console 19''	DELL	A1310210	1

Tabela 1 – Lista de Material

2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Os equipamentos para o laboratório do sistema MLFF foram instalados no Pórtico 24, sentido Niterói - Rio de Janeiro. Optou-se por criar uma solução sem dispositivos no chão. O pórtico foi equipado com os dispositivos necessários para detectar veículos, identificar veículos por meio de leitura de *tag*, se aplicável, registrar a imagem de placas traseira e/ou dianteira; classificar o veículo de acordo com o tipo, quantidade de eixos e pneus em rodados duplos.

As pesquisas elaboradas basearam-se em uma sequência de métodos e técnicas estruturadas em quatro atividades principais. A primeira atividade consistiu na elaboração de um estado da prática quanto aos sistemas de cobrança com livre passagem e outras medidas complementares como o sistema de faixas reversíveis e o sistema de pedágio variável. A segunda corresponde à análise da demanda, com base nos volumes de tráfego de veículos pagantes registrados na praça de pedágio da Ecovias Ponte. A análise considerou dados coletados entre setembro de 2015 e agosto de 2023, possibilitando a avaliação do comportamento da demanda ao longo do tempo.

A terceira atividade consistiu na realização da pesquisa origem-destino (OD), aplicada pela empresa Perplan, com análise de dados realizada pela equipe do Lastran. Essa pesquisa teve como objetivo identificar as principais origens e destinos dos usuários da Ecovias Ponte, por meio da aplicação de um questionário estruturado com perguntas sobre local de origem e destino, frequência da viagem, número de passageiros, e características dos veículos, entre outros aspectos.

A quarta atividade consistiu na elaboração, aplicação e análise de pesquisa de preferência declarada (PD), com o propósito de captar as escolhas e preferências dos usuários em cenários hipotéticos. Essa técnica envolveu três fases: especificação do modelo econométrico, planejamento experimental e desenho do questionário, sendo aplicada para identificar as preferências dos usuários em relação a atributos específicos de diferentes alternativas de viagem. A coleta de dados foi realizada pela empresa Perplan.

A simulação de tráfego foi desenvolvida no *software* de micro simulação de tráfego VISSIM, de forma a analisar diferentes cenários, tanto para o período de pico da manhã como da tarde, considerando a implantação de sistema MLFF, implantação de sistemas com faixas reversíveis e cenários que contemplam prováveis alterações nos perfis de demanda decorrentes de estratégias de tarifação.

3. ETAPA 1: INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E ADAPTAÇÃO DO PÓRTICO

Para o laboratório do MLFF instalado no Pórtico 24, sentido Niterói - Rio de Janeiro, optou-se por criar uma solução sem dispositivos no chão, fazendo uso de tecnologias inéditas. O pórtico foi equipado com os dispositivos necessários para:

- Detectar veículos;
- Identificar veículos por meio de leitura de *tag* e ou placa;
- Registrar a imagem de placas traseira e/ou dianteira;
- Classificar o veículo de acordo com o tipo, quantidade de eixos e pneus em rodados duplos.

Todas as faixas terão a mesma configuração necessária para a contagem de eixos pelos dispositivos, os quais foram instalados em apenas duas faixas. Além dos dispositivos, foi instalada na parte superior do pórtico a parte eletrônica para garantir energia e comunicação aos dispositivos, enquanto o controlador de zona foi instalado em um outro local coberto.

Para cada veículo que passe por baixo do pórtico, foi criada uma transação contendo todos os dados gerados pelos dispositivos; esses dados e todas as fotos relacionadas foram coletados e disponibilizados em um aplicativo para verificação e anális. Todos os dados coletados foram utilizados para calcular KPIs para avaliação do desempenho do sistema e dos dispositivos.

Durante o período de fevereiro a outubro de 2023, foi realizada com sucesso a instalação dos equipamentos no pórtico 24 da unidade Ecovias Ponte. Essa etapa teve como foco a adaptação da estrutura existente para viabilizar a implantação do Multi-Lane Free Flow (MLFF), voltado à avaliação de tecnologias de pedágio eletrônico sem barreiras.

Foram instalados e configurados diversos dispositivos essenciais para o funcionamento do sistema, incluindo antenas de alta frequência, câmeras rodoviárias com capacidade para monitoramento em alta velocidade, refletores LED e infravermelhos, radares de tráfego e contadores de eixos. Além da instalação física, também foi realizada a configuração da rede e a integração dos equipamentos ao sistema de comunicação, garantindo a operacionalidade do conjunto.

Atividades Executadas:

- Adaptação do pórtico para receber os equipamentos.
- Antenas (12-57V, 1,25A, 860-960MHz e polarizadas 865-928MHz)
- Switch de redundância (HMS12001-1A)
- Contador de eixos (até 180 km/h)
- Câmeras rodoviárias (até 250 km/h, alcance de 35m)
- Refletores LED e infravermelho (IV) (12-30V CC e 1200W 24V CA/CC)
- Radares LTR5001 COMARK (2 unidades)

Além disso, foi realizada a configuração de rede e comunicação dos equipamentos. A Figura 1

mostra a instalação dos equipamentos no pórtico.

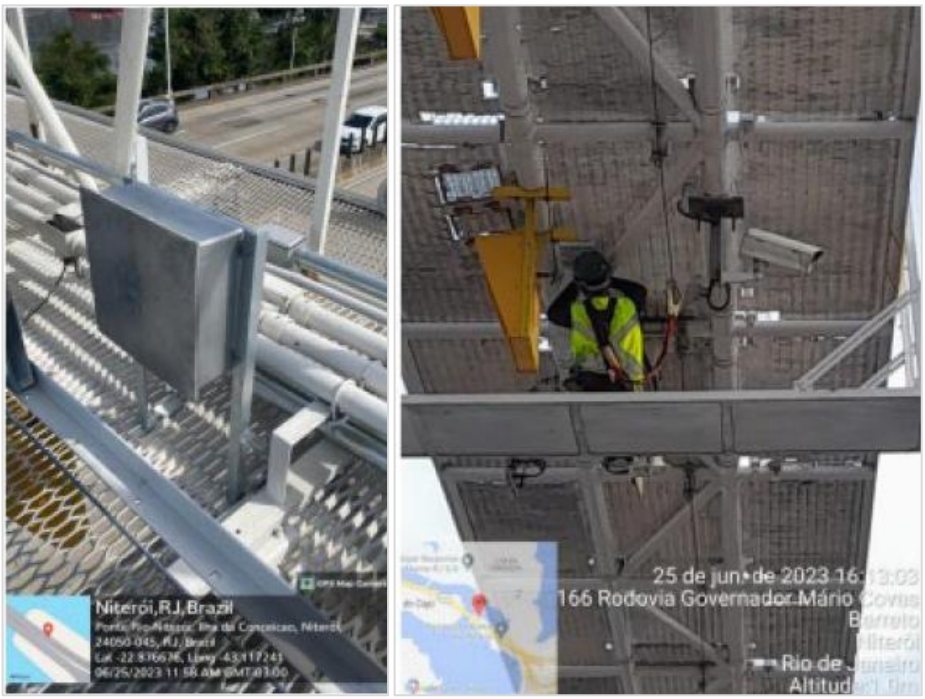

Figura 1 – Implantação dos equipamentos

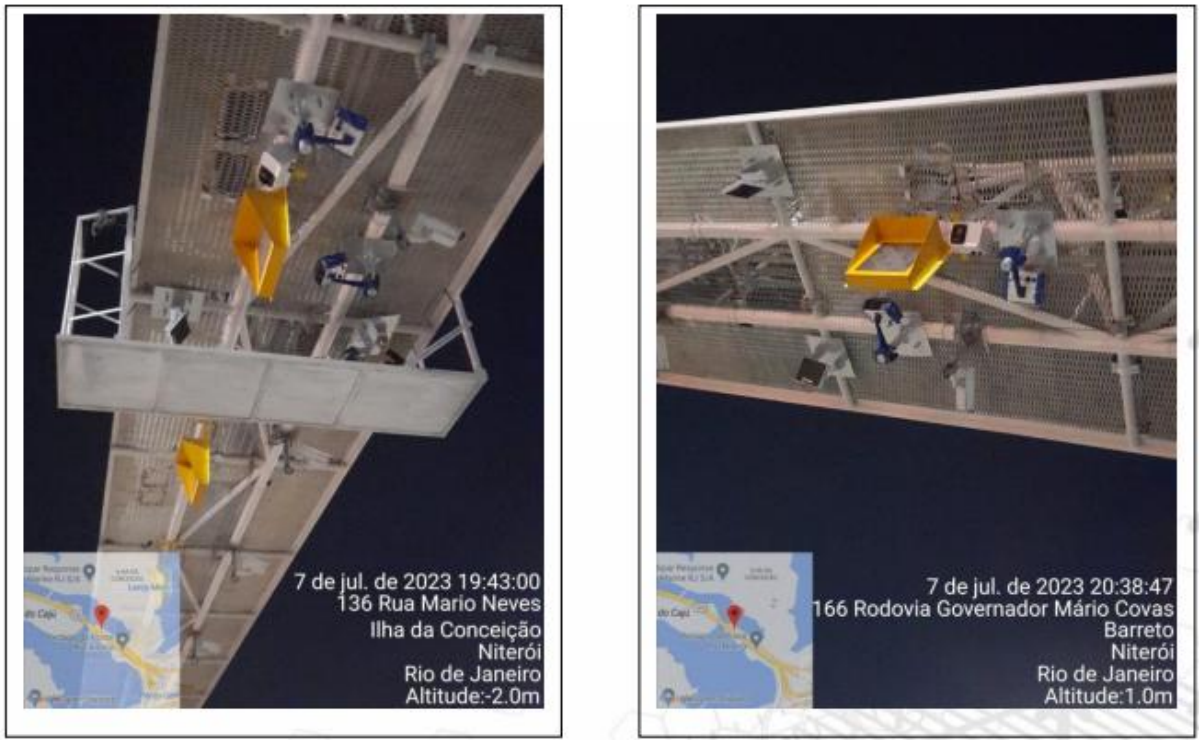

Figura 2 – Disposição dos equipamentos

1.1. LAUDO INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTOS

O documento "Laudo Instalação art2020250077601.pdf" trata da execução de um serviço técnico de instalação de dispositivos para o sistema Multi Lane Free Flow em um pórtico existente, localizado no trecho de concessão administrado pela Concessionária de Ponte Rio-Niterói S.A. – ECOVIAS PONTE.

Cópia para conferência sem valor legal

2ª Via - CONTRATANTE

ART de Obra ou Serviço

INICIAL
INDIVIDUAL

1. Responsável Técnico

LUIZ FERNANDO GOMES ANTUNES

Título profissional: **ENGENHEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES**

RNP: **2613121416**

Registro: **2016110415**

Empresa contratada: **MARSAO AUTOMAÇÃO RODOVIARIA LTDA-ME**

Registro: **2016200590**

2. Dados do contrato

Contratante: **CONCESSIONARIA DE PONTE RIO-NITEROI S.A - ECOPONTE**

CPF/CNPJ: **22.163.297/0001-49**

TRAVESSA MARIO NEVES

Complemento:

Bairro: **ILHA DA CONCEICAO**

Nº: **1**

Cidade: **NITEROI**

UF: **RJ**

CEP: **24050290**

Contrato: **EPON-AUT-CT00001/23** Celebrado em: **16/03/2023** Tipo de Contratante: **PESSOA JURIDICA DE DIREITO PRIVADO**

Valor do Contrato: **R$ 223.651,60**

3. Dados da Obra/Serviço

RUA MARIO NEVES

Complemento:

Bairro: **ILHA DA CONCEICAO**

Nº: **1**

Cidade: **NITEROI**

UF: **RJ**

CEP: **24050105**

Data de Início: **01/01/2025** Previsão de término: **31/05/2025**

Coordenadas geográficas: -22,877896 -43,113825

Finalidade: **INFRAESTRUTURA**

Proprietário: CONCESSIONARIA DE PONTE RIO-NITEROI S.A - ECOPONTE

CPF/CNPJ: 22.163.297/0001-49

4. Atividade técnica

	Quantidade	Unidade	Pavimento
27 - EXECUCAO DE INSTALACAO **42 - MELHORAMENTO** **73 - OUTROS** **175 - OUTROS**	**2.00**	**h/d**	**-**

Após a conclusão das atividades técnicas o profissional deverá proceder a baixa desta ART

5. Observações

SERVIÇO DE IMPLANTAÇÃO DE DISPOSITIVOS PARA SISTEMA MULTI LANE FREE FLOW EM PÓRTICO EXISTENTE NO TRECHO DE CONCESSÃO ADMINISTRADO PELA CONCESSIONÁRIA ECOPPONTE.

6. Declarações

7. Entidade de classe

NENHUMA

ATENÇÃO!

- O registro da ART, assim como a sua impressão no formato oficial, serão possíveis somente a partir da confirmação do **seu pagamento no sistema do Crea-RJ.**
- O pagamento do valor de registro da ART deve ser feito unicamente na rede bancária.
- A data de lançamento do pagamento por agendamento não é considerada para registro da ART. Neste caso, somente a **data da liquidação valida o registro.**

Rascunho

Figura 3 – Laudo de instalação

1.2. LAUDO DO PÓRTICO

O documento (RT-BR0000101-321-6.334-3-0C7-L05-009) apresenta os resultados da inspeção técnica realizada pela Concessionária Ponte Rio-Niterói S/A – Ecovias Ponte, no trecho da BR-101/RJ, entre os km 321+600 e 334+385, abrangendo a Ponte Presidente Costa e Silva e seus acessos. Segundo o relatório (p. 12), o objetivo foi avaliar o estado de conservação dos 53 pórticos existentes, garantindo a segurança dos usuários e atendendo às exigências do Programa de Exploração de Rodovias (PER). As inspeções ocorreram entre 06 e 27 de junho de 2023 (p. 11), com tempo bom. Os dados foram registrados em fichas cadastrais e analisados conforme os parâmetros do PER (p. 13). Conforme a seção de resultados (p. 20), nenhuma anomalia foi detectada. Todos os pórticos apresentaram bom estado de conservação, tanto na monitoração atual (2º semestre de 2024) quanto na anterior (2º semestre de 2023), com zero reprovações em ambas as campanhas (p. 21). O relatório destaca o impacto da criminalidade na região, com furtos recorrentes de dispositivos nas proximidades da Avenida Brasil. A concessionária tem adotado medidas como registro de boletins de ocorrência e reforço nas rondas (p. 20). A inspeção foi conduzida sob responsabilidade técnica de Jean Morais Rodrigues (CREA 220719023-4), com apoio de uma equipe multidisciplinar (p. 12).

Anotação de Responsabilidade Técnica - ART
Lei nº 6.496, de 7 de dezembro de 1977
CREA-RJ
Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio de Janeiro
ART de Obra ou Serviço
2020230143529
1. Responsável Técnico
JEAN MORAIS RODRIGUES
Título profissional:
ENGENHEIRO CIVIL
RNP: 2207190234
Registro: 2022109490
Registro: 2015201760
Empresa contratada:
CONCESSIONARIA DE PONTE RIO-NITEROI S.A - ECOPONTE
2. Dados do contrato
Contratante: CONCESSIONARIA DE PONTE RIO-NITEROI S.A - ECOPONTE
CPF/CNPJ: 22163297000149
TRAVESSA MARIO NEVES
Complemento: -
Bairro: ILHA DA CONCEIC AO
Nº: 1
Cidade: NITEROI
UF: RJ
CEP: 24050290
Contrato: EDITAL 01/2015
Celebrado em: 01/06/2015
Tipo da Contratante: PESSOA JURIDICA DE DIREITO PRIVADO
Valor do Contrato: R$ 0,00
3. Dados da Obra/Serviço
TRAVESSA MARIO NEVES
Complemento: -
Bairro: ILHA DA CONCEIC AO
Nº: 1
Cidade: NITEROI
UF: RJ
CEP: 24050290
Data de Início: 01/06/2023
Previsão de término: 16/09/2025
Finalidade: INFRAESTRUTURA
Propriedade: CONCESSIONARIA DE PONTE RIO-NITEROI S.A - ECOPONTE
CPF/CNPJ: 22163297000149
4. Atividade técnica
Quantidade 1,00
Unidade un
Pavimento -
51 VISTORIA
73 OUTROS
68 ESTRUTURA METALICA
115 PONTE
Após a conclusão das atividades técnicas o profissional deverá proceder a baixa desta ART
5. Observações
EXECUÇÃO DE SERVIÇO DE MONITORAÇÃO DOS PÓRTICOS, QUE INTEGRAM OS ELEMENTOS DE PROTEÇAÕ E SEGURANÇA C ONFORME PREVISTO NO PER
6. Declarações
7. Entidade de classe
8. Assinaturas
9. Informações
CREA-RJ

Figura 4 – Laudo Pórtico

4. ETAPA 2: AQUISIÇÃO DE LICENÇA DE SOFTWARE

Paralelamente à instalação dos equipamentos, foi realizada a aquisição da licença de software necessária para a operação do sistema MLFF. A licença, identificada como MLFF – SW WBE: T003.00299.005, foi adquirida junto à empresa Sinelec, conforme previsto contratualmente.

O pagamento da invoice foi efetuado dentro do prazo estipulado, assegurando a legalidade e a funcionalidade do ambiente de testes. A obtenção dessa licença foi fundamental para garantir a continuidade das etapas seguintes do projeto, especialmente os testes de desempenho e a coleta de dados em ambiente real.

Atividade Executadas:

- Aquisição da licença de software:
- Produto: MLFF – Licenças SW WBE: T003.00299.005
- Fornecedora: Sinelec

5. ETAPA 3: TESTES NO LABORATÓRIO MLFF

A implantação do sistema de cobrança automática MLFF representou um marco na modernização dos modelos de pedágio, sendo tratada como um verdadeiro laboratório tecnológico em ambiente real. A instalação inicial envolveu o pórtico 24, suspenso sobre quatro faixas, com vão livre de 6,35m de altura.

Para essa Prova de Conceito (POC), foi adotada uma solução disruptiva com nenhuma intervenção no solo (sensores). A ideia era clara — eliminar dispositivos intrusivos e testar tecnologias inéditas no Brasil, criando um modelo avançado e replicável. O pórtico foi equipado com sensores e sistemas de última geração para:

- Detecção e classificação de veículos, incluindo leitura de *tags* (quando disponíveis);
- Leitura automática de placas dianteiras e traseiras com câmeras de Reconhecimento Automático de Placas (ANPR);
- Contagem de eixos e identificação de pneus em rodado duplo, utilizando sensores laser/radar e inteligência de vídeo aplicada.

Embora todas as faixas estejam aptas à operação, os dispositivos de contagem foram alocados em apenas duas faixas, mantendo a padronização necessária para testes comparativos. A estrutura eletrônica foi instalada na parte superior do pórtico para fornecer energia e comunicação, enquanto o controlador de zona foi posicionado em área coberta próxima.

Cada passagem sob o pórtico gera uma transação única e completa — composta por dados oriundos de imagens e metadados. Essas informações são reunidas, processadas e disponibilizadas via aplicativo para análise e verificação. Os dados coletados também são utilizados para calcular KPIs de desempenho do sistema, sendo comparados com os resultados da praça de pedágio tradicional usada como referência.

- Entre os principais objetivos da POC, destacam-se:
- Medição e avaliação de KPIs com base em dados reais;

- Validação técnica da solução em um cenário nacional;
- Comparação com o modelo convencional de pedágio.

A solução S*Gate escolhida para o teste reúne sensores robustos e padronizados, combinando eficiência operacional com facilidade de manutenção. O sistema foi projetado com foco na disponibilidade, simplicidade de operação e flexibilidade para evolução futura, incluindo AET (cobrança eletrônica integral) e arquitetura redundante.

A estrutura conta com:

- Câmeras ANPR dianteiras e traseiras;
- Leitores AVI com antenas para leitura de *tag*;
- Sensores laser/radar para escaneamento volumétrico;
- Contagem automática de eixos via análise de vídeo, dispensando loops no pavimento;
- Servidor industrial dedicado e sistema de comunicação;
- Proteção contra falhas com UPS local, garantindo continuidade e desligamento seguro.

A inteligência do sistema está na correlação em tempo real dos dados: sensores, câmeras e leitores AVI trabalham de forma coordenada, gerando uma única transação por veículo com base em gatilhos automáticos, leitura de placas e dados do *transponder*, se presente. O módulo de controle integra e valida todas essas fontes, formando um registro único por veículo, que é então transmitido ao Host de Pedágio para validação e auditoria.

Um dos diferenciais técnicos é o modo Ativação Automática das câmeras, com início/fim da captura baseado na posição exata do veículo na imagem. Ademais, o sistema de contagem gera uma única imagem reconstituída do veículo, criada a partir de múltiplos frames capturados durante a passagem — ideal para rastreabilidade e auditoria. A Figura 5 apresenta a arquitetura de funcionamento do pórtico instalado.

Figura 5 – Esquemático da arquitetura de funcionamento do pórtico

O processo de calibração dos equipamentos demandou meses de ajustes finos, especialmente para adaptar o sistema à realidade do tráfego local. Um dos maiores desafios foi o comportamento dos usuários de motocicleta, que frequentemente desrespeitam o fluxo natural das faixas e cortam os veículos por todos os lados, gerando ruído nos dados captados e dificultando a correlação entre sensores e veículos. Esse padrão de comportamento exigiu reprogramações e adaptações específicas na lógica de detecção, principalmente no módulo de contagem e classificação.

1.1.PLANO DE MANUTENÇÃO E INTERVENÇÕES NO PÓRTICO.

Plano de Manutenção.

A tabela Plano de manutenção apresenta os equipamentos e cronograma de preventiva, a Figura 6 presenta uma interface de um sistema de gestão de manutenção, especificamente voltado para o controle e execução de planos de manutenção preventiva. O foco está no pórtico de pedágio eletrônico e nos sistemas instalados nele, pertencentes à tecnologia MLFF (Multi-Lane Free Flow) da Ecovias Ponte.

ecovias	Multi-Lane Free Flow		ecorodovias
Equipamento	Tarefa	Responsável	Periodicidade
Câmeras, Laser Scanner e Antenas	Verificar no sistema de monitoramento do freeflow se todas as câmeras, laser scanners e antenas estão funcionando corretamente antes do início das atividades	Manutenção	Anual
Câmeras	Verificar integridade física da câmera, fixação e realizar limpeza das lentes.	Manutenção	Anual
Laser Scanner	Verificar integridade física dos equipamentos, fixação e realizar limpeza	Manutenção	Anual
Antenas	Verificar integridade física das antenas, fixação e realizar limpeza.	Manutenção	Anual
Software de Monitoramento	Verificar através do software se todos os equipamentos estão funcionando corretamente após as manutenções	Manutenção	Anual
Câmeras	Verificar funcionamento das câmeras através do software de monitoramento	Manutenção	Mensal
Laser Scanner	Verificar funcionamento via através do software de monitoramento	Manutenção	Mensal
Antena	Verificar o correto funcionamento da leitura das tags através do software de monitoramento	Manutenção	Mensal

Desktop	Verificar o funcionamento, realizar limpeza externa, verificar cabeamento e conferir se há erros.	Manutenção	Mensal
Pórtico	Inspecionar visualmente os equipamentos instalados na estrutura do pórtico, e verificar se há cabos soltos, pendurados ou expostos	Manutenção	Mensal
Estrutura do Pórtico	Verificar oxidação, trincas, desalinhamento, parafusos soltos ou corrosão na estrutura metálica.	Manutenção	Anual
Armário Técnico	Verificar vedação, limpeza e condições dos armários técnicos.	Manutenção	Anual
Concentrador de Antenas	Observar LEDs indicadores, realizar limpeza externa, verificar aquecimento e garantir que os cabos de rede e energia estejam firmemente conectados	Manutenção	Anual
Cabos, tomadas e disjuntores	Inspeção elétrica	Manutenção	Anual
Computador Industrial	Realização de limpeza e backup de dados	Manutenção	Anual

Tabela 2 – Plano de Manutenção

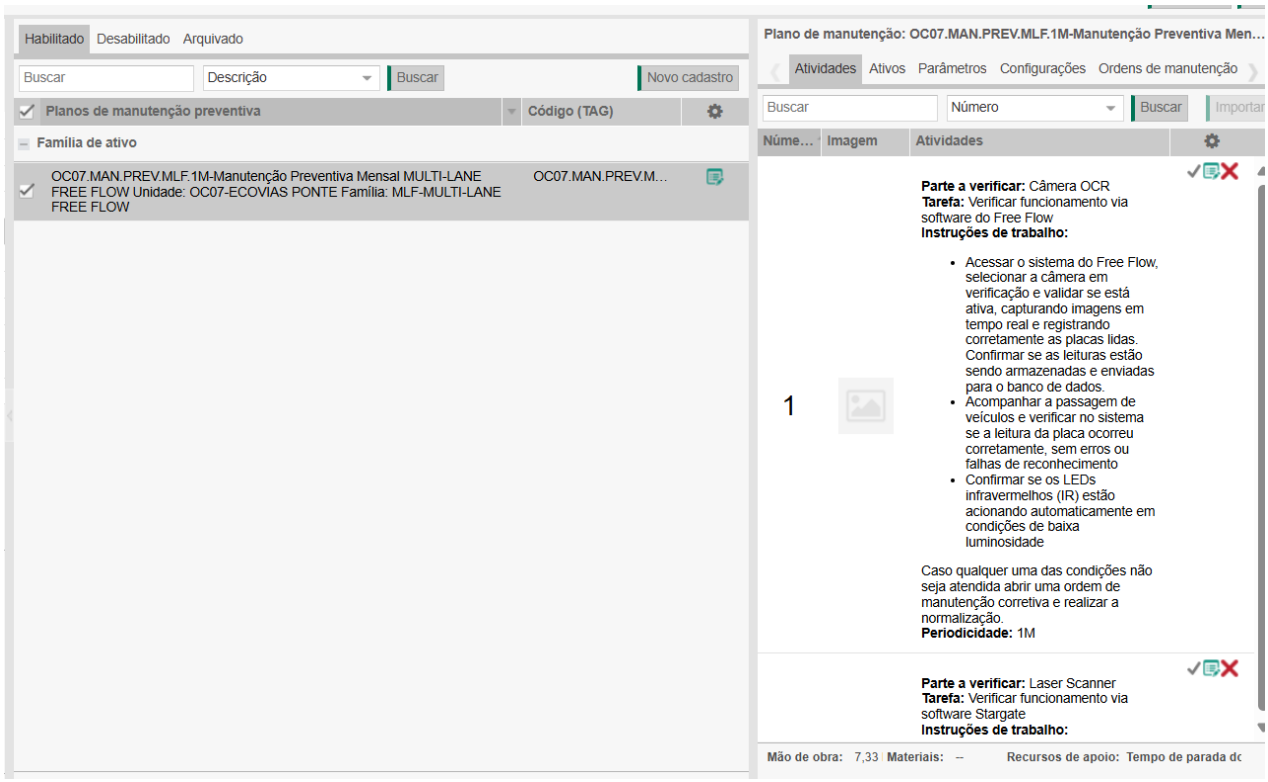

Figura 6 – Sistema gerenciamento de manutenção

Suporte Antena-A3

A Figura 8 apresenta um desenho técnico de um suporte metálico destinado à fixação de antenas em estruturas rodoviárias a chapa de Aço Carbono com 4 mm de espessura – utilizada como base estrutural do suporte. Barra Rosca M22 (3/4") – elemento de fixação, provavelmente parafusos ou tirantes. Dimensões indicadas no desenho Figura 7 (ex.: 280 mm, 290 mm, 400 mm, 600 mm), que definem o posicionamento e espaçamento dos elementos do suporte. O suporte é parte da infraestrutura necessária para a instalação de antenas em pórticos rodoviários, integrando sistemas de monitoramento e controle de tráfego.

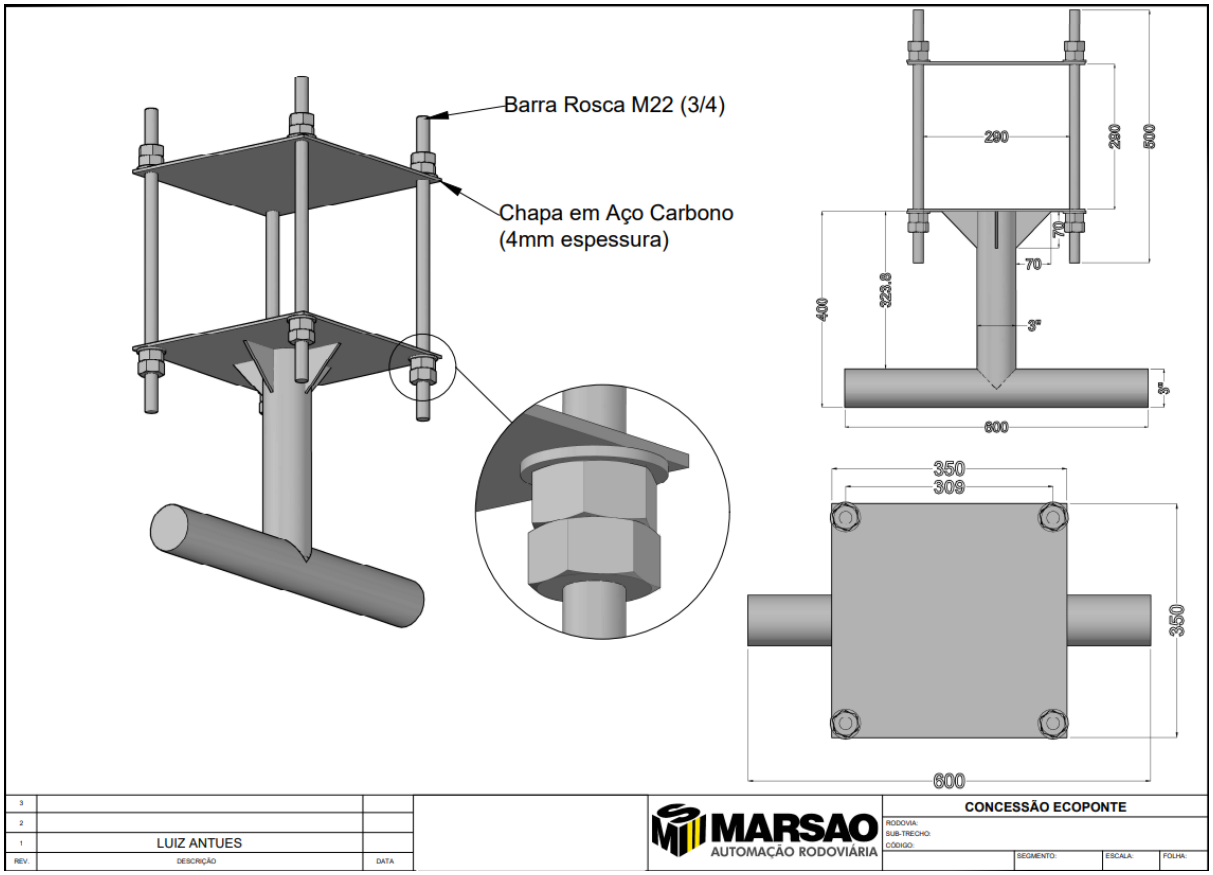

Figura 7 – Suporte Antena-A3

Suporte Câmera-A3

A Figura 9 apresenta um desenho técnico de um suporte metálico destinado à fixação de câmeras com infravermelho (IR) em estruturas rodoviárias. A chapa de Aço Carbono com 4 mm de espessura é utilizada como base estrutural do suporte. Barra Rosca M22 (3/4") – elemento de fixação, provavelmente parafusos ou tirantes. Dimensões indicadas no desenho (ex.: 50 mm, 100 mm, 170 mm, 242 mm, 280 mm, 309 mm, 330 mm, 350 mm), que definem o posicionamento e espaçamento dos elementos do suporte. O suporte é parte da infraestrutura necessária para a instalação de câmeras em pórticos rodoviários, integrando sistemas de monitoramento e controle de tráfego.

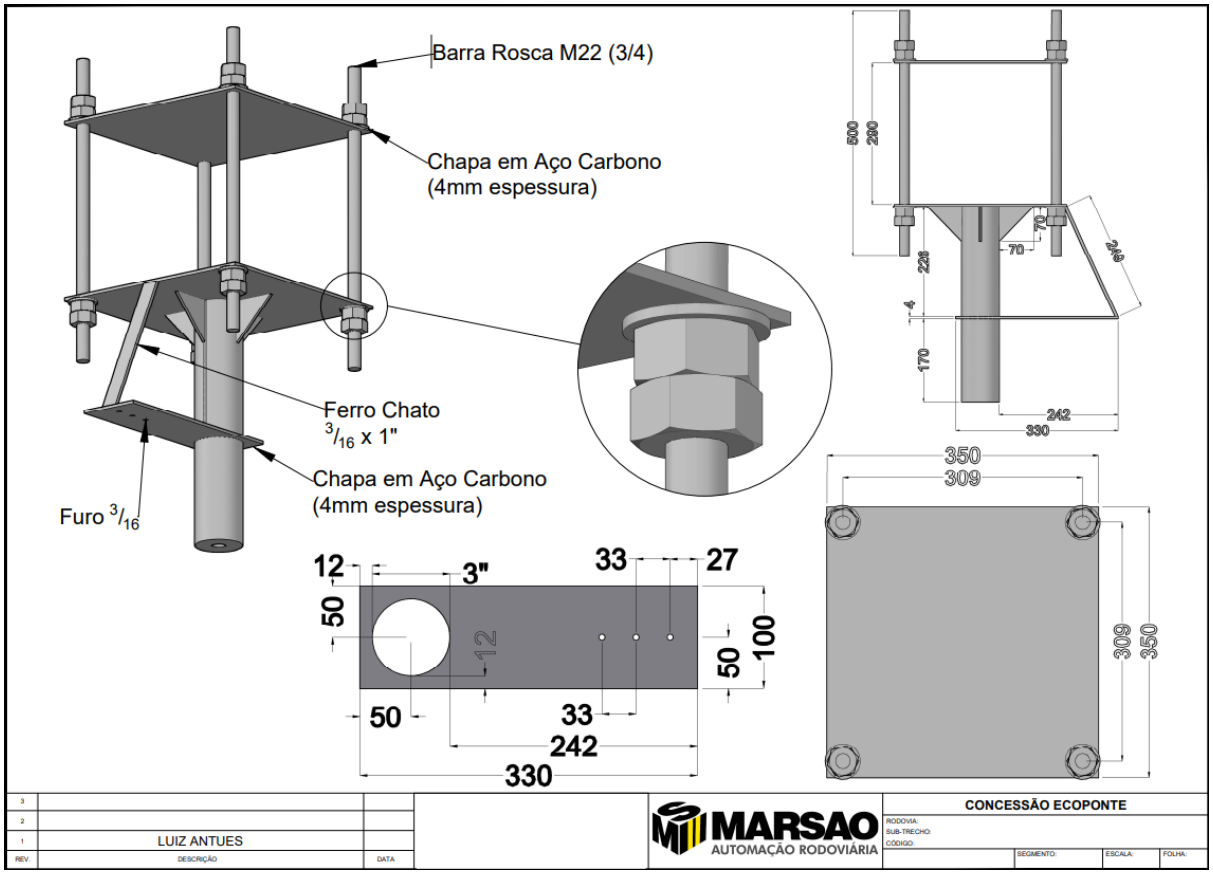

Figura 8 – Suporte Câmera-A3

Suporte IR-A3

A Figura 10 apresenta um desenho técnico de um suporte metálico utilizado em estruturas rodoviárias. A base estrutural do suporte é composta por chapa de Aço Carbono com 4 mm de espessura. O elemento de fixação é uma Barra Rosca M22 (3/4"), possivelmente parafusos ou tirantes. As dimensões indicadas no desenho (ex.: 50 mm, 100 mm, 150 mm, 290 mm, 309 mm, 350 mm, 500 mm) definem o posicionamento e espaçamento dos componentes do suporte. Este suporte faz parte da infraestrutura necessária para a instalação de equipamentos em pórticos rodoviários, podendo integrar sistemas de automação e controle de tráfego.

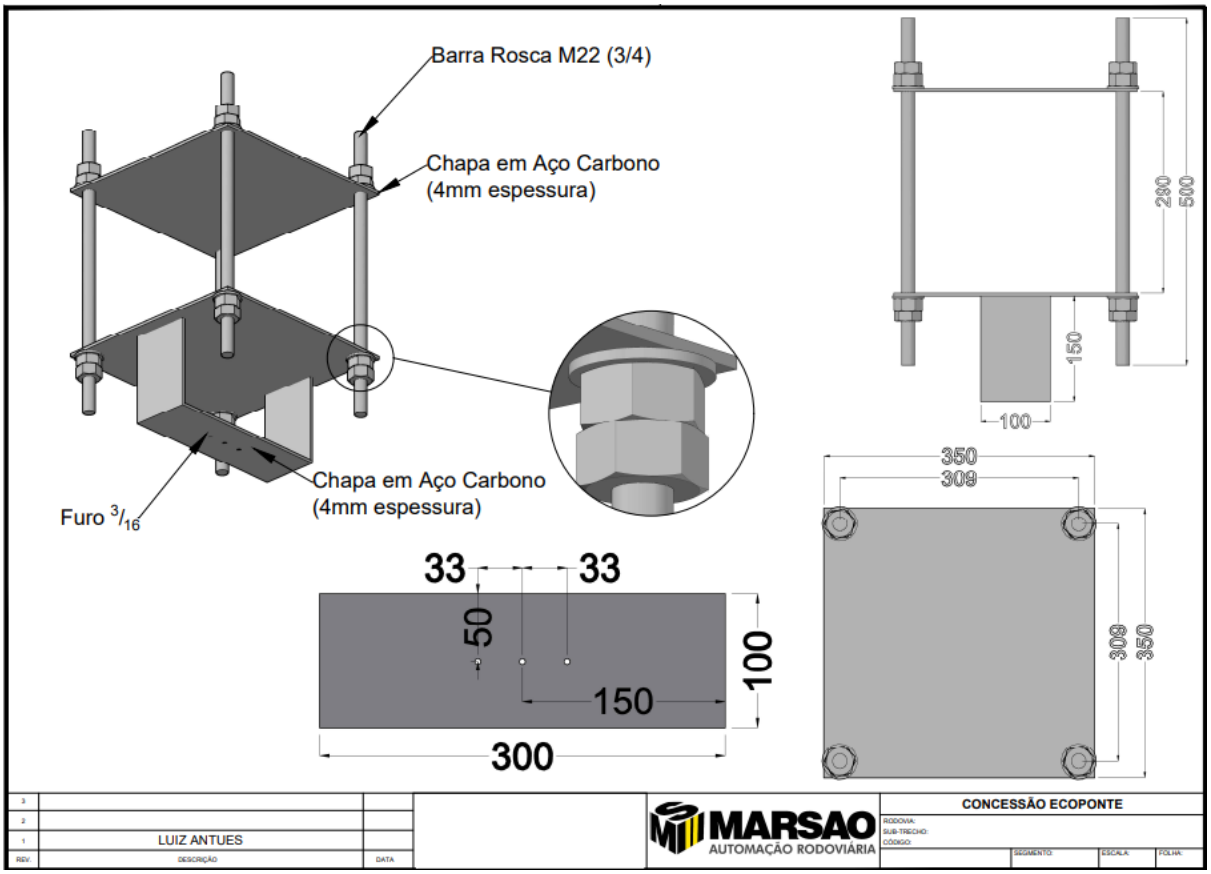

Figura 9 – Suporte Ecovias Ponte IR-A3

6. ETAPA 4: PESQUISAS

A presente seção, referente à Etapa 4, apresenta o estado da prática quanto aos sistemas de cobrança com livre passagem e outras medidas complementares como o sistema de faixas reversíveis e o sistema de pedágio variável. Além disso, é apresentada a análise dos dados de tráfego com base nas informações obtidas nas praças de pedágio ao longo do período avaliado (maio de 2014 a outubro de 2023), buscando identificar padrões de deslocamento e volume veicular. Também são detalhadas a metodologia adotada no planejamento e na execução das pesquisas de origem e destino, voltadas à caracterização dos fluxos de viagem dos usuários, bem como a aplicação da pesquisa de preferência declarada, cujo objetivo é captar as percepções e escolhas dos motoristas diante de cenários hipotéticos de deslocamento.

6.1. ESTADO DA PRÁTICA

6.1.1. SISTEMAS DE COBRANÇA COM LIVRE PASSAGEM

O sistema de pedágio MLFF tem se expandido globalmente, sendo adotado em diversas regiões como uma alternativa moderna para substituir os sistemas convencionais de cobrança de pedágio. Esse aumento gradual na adoção demonstra claramente a eficiência do sistema e seu potencial para aprimorar a fluidez do tráfego, reduzir congestionamentos e proporcionar uma melhor experiência aos usuários nas estradas.

A primeira implementação de um sistema MLFF ocorreu em 1989, no Texas, Estados Unidos, através da tecnologia RFID. Já a primeira rodovia totalmente automatizada foi implantada em 1997, em Ontario, Canadá, com a combinação do uso de RFID e OCR.

Na Austrália, ao longo da rodovia EastLink (www.eastlink.com.au) estão instalados 13 pórticos do sistema MLFF. O sistema localiza o veículo através de um detector e mede suas dimensões, enquanto um segundo detector realiza a leitura da tag, caso o veículo possua. Duas câmeras são responsáveis por capturar as imagens da placa dianteira e traseira, respectivamente. Essas informações são essenciais para identificação da classe do veículo (Eastlink, 2023). O valor do pedágio da viagem é calculado de acordo com a classificação do veículo e a percurso da viagem, levando em consideração o número total de pórticos por onde o veículo passou. A identificação dos pórticos é realizada através da combinação das informações lidas por todos os sensores, rastreando a viagem total realizada pelo veículo.

Na Eastlink, existe um número limite de pórticos para cálculo do valor do pedágio. Após esse limite, o valor total do pedágio da viagem não será aumentado, mesmo que o veículo realize uma viagem mais longa (Eastlink, 2023). As formas de pagamento disponibilizadas pela Eastlink são: pagamento pela tag, através de um passe único e envio da cobrança por e-mail, telefone ou endereço cadastrado no registro do veículo. Os pagamentos realizados pelas tags são mais baratos. Além disso, a empresa oferece alguns descontos de pedágios para carros no final de semana e carros que usam uma seção única do pedágio (Eastlink, 2023). A companhia SICE (www.sice.com/en) é responsável pela implementação do sistema de cobrança de pedágio MLFF nessa rodovia na Austrália. Os pórticos duplos de portagem eletrônica são

compostos por antenas de micro-ondas com tecnologia GSSA1, câmeras estereoscópicas para classificação automática de veículos, sistema de reconhecimento das placas, além da comunicação entre os pórticos e servidores. Além disso, a empresa implementou um sistema de tratamento de dados e sistema de atendimento ao cliente através da internet (SICE, 2023).

Portugal tem também uma significativa experiência na utilização de MLFF, com diversas autoestradas que adotam o sistema de pedágios eletrônicos com passagem livre. Esses pórticos estão equipados com câmeras e detectores laser transmissores que realizam o reconhecimento dos veículos através de volumetria, permitindo a efetivação da cobrança da taxa. Caso o veículo não esteja equipado com o identificador eletrônico, o sistema analisa a matrícula para identificar o proprietário e enviar a cobrança. Para os motoristas que possuem o identificador eletrônico, o pagamento pode ser realizado de forma automática, direto pela conta bancária ou descontado do saldo do identificador. No entanto, para aqueles que não possuem o dispositivo em seus veículos, é necessário dirigir-se aos Correios ou a um agente PayShop para efetuar o pagamento (Ascendi, 2023). A forma mais vantajosa é adquirir o localizador eletrônico, pois ele isenta o usuário de pagar taxas extras, garantindo uma opção econômica para os motoristas que utilizam essas autoestradas em Portugal.

A França também apresenta o sistema MLFF para cobrança de pedágio em algumas rodovias. Um exemplo é a rodovia A79, que conecta Montmarault a Digoin no Allier, com extensão de 88 km e 6 pórticos. Esses pórticos são equipados com câmeras infravermelhas e sensores que permitem a detecção do veículo e identificação do tipo de veículo, seja por meio de um tag eletrônico ou pela leitura da placa. A cobrança é realizada de forma automática através do tag eletrônica no veículo ou, caso a placa esteja cadastrada no sistema, o pagamento também é realizado de forma automática. Entretanto, caso nenhuma dessas opções esteja disponível, o usuário deve efetuar o pagamento da taxa de forma online ou em uma máquina de pagamento no prazo de até 72 horas após a passagem pelo pórtico (ALIAE, 2023). Além disso, há um projeto de implementar o pedágio de fluxo livre em toda a extensão de 210 km da autoestrada Paris-Normandia a partir de 2024 (SANEF, 2023). Exemplos de MLFF também são encontrados em diversas outras localidades, trazendo benefícios para o tráfego e a arrecadação de receitas.

Na Irlanda, por exemplo, o sistema foi instalado na movimentada autoestrada M50, abrangendo oito faixas com apenas um pórtico de pedágio. Essa implementação resultou em um recorde de receitas provenientes do pedágio para a autoestrada (Kapsch, 2023a). Em Quito, Equador, o sistema de pedágio MLFF foi implementado no Túnel Guayasamin, representando o primeiro sistema do tipo no país, conforme apresentado na Figura 10. Nesse caso, pórticos bidirecionais foram adotados, permitindo a reversibilidade da característica do pórtico para facilitar intervenções durante o horário de pico, como mudanças de sentido na via. Com quatro pistas, o pórtico de fluxo livre dispensa a necessidade de parada dos veículos para pagamento (Kapsch, 2023b).

Na Itália, a empresa Sinelec implantou recentemente o sistema MLFF na autoestrada A33 Asti-Cuneo. A solução é baseada na tecnologia S*GATE, combina a utilização de IA e seguimento

3D de veículos, aplicados à análise em tempo real de fluxos de vídeo, garantindo o mais alto nível de precisão e deteção.

Figura 10 – Pórtico do sistema MLFF no Equador

Outro exemplo de aplicação, na Bielorrússia, é o sistema BelToll em operação desde 2013. Nessa implementação, foi utilizado o sistema ETC com tecnologia de comunicação dedicada de curto alcance (DSRC - dedicated short-range communication) entre veículos e infraestrutura. Essa tecnologia permite o registro do veículo mesmo durante mudanças de faixa ou circulação em distâncias reduzidas entre outros veículos (Kapsch, 2023c). Na África do Sul, o sistema é empregado com pórticos aéreos de pedágio a cada 10 km ao longo da rede rodoviária de Gauteng (Sanral, 2023).

Nos Estados Unidos, o sistema é amplamente adotado, notabilizando-se pela transição de praças convencionais para híbridas, com cobrança aberta na linha principal e tradicional fora dela. Na Noruega, o sistema MLFF também é empregado, como no caso dos túneis rodoviários submarinos Ryfast, que são entre os mais longos e profundos do mundo (Kapsch, 2021a). A Tabela 3 traz um levantamento de algumas localidades que utilizam o MLFF, assim como o fornecedor do sistema e o tipo cobrança disponibilizado por cada um.

No Chile, a abordagem MLFF foi implementada em Santiago, na Autopista Vespucio Norte, por meio do fornecedor Q-FREE ASA (https://www.q-free.com/). Esse projeto envolveu a instalação, montagem e manutenção de 15 pórticos de MLFF. O sistema emprega tecnologia DSRC, câmeras e software ALPR (Q-Free, 2023). Outro exemplo no país é o sistema MLFF que abrange um trecho de 27 km na região de Valparaíso, na rota Nogales Puchuncaví, implementado pelo fornecedor Kapsch TrafficCom (https://www.kapsch.net/en) (Kapsch, 2021b).

Tabela 3 – Síntese dos exemplos de aplicação apresentados no relatório

País	Local de instalação	Fornecedor
Austrália	Rodovia urbana Mitcham-Frankston Freeway (MFF) em Melbourne	SECI
Portugal	Rodovias A4, A41, A42 e VRI	Q-FREE ASA
França	Autoestrada A79	Kapsch TrafficCom
Irlanda	Autoestrada M50	Kapsch TrafficCom
Itália	Autostrada Asti-Cuneo (A33)	Sinelec
	Autostrada Pedemontana Lombarda (A36)	Telepass
Equador	Túnel Guayasamin em Quito	Kapsch TrafficCom
Bielorrússia	Rodovia M1/E30	Kapsch TrafficCom
Noruega	Túnel Ryfylke	Kapsch TrafficCom
África do Sul	Rede rodoviária de Gauteng	Kapsch TrafficCom
Chile	Autopista Vespucio Norte	Q-FREE ASA
	Rota Nogales Puchuncaví	Kapsch TrafficCom
Estados Unidos	Diversas praças de pedágio	

6.1.1.1. BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS *FREE FLOW*

A implementação de sistemas de cobrança eletrônica traz consigo uma série de vantagens que abrangem aspectos econômicos, ambientais e de segurança viária. Em termos econômicos, os benefícios reportados incluem: (i) redução das transações e do tempo de espera; (ii) trajetos percorridos mais rapidamente; (iii) redução no consumo de combustível; (iv) redução de congestionamento nas praças de pedágio e arredores; (v) redução da poluição do ar; e (vi) redução dos custos de operação (Crabtree et al., 2008).

Esses benefícios podem ser percebidos sob duas óticas (Chaudhary, 2003): (i) ótica da operadora - que tem como objetivo reduzir o custo de operação e manutenção da praça de pedágio, facilitar as transações financeiras e reduzir o número de colaboradores diretos; (ii) ótica do usuário - que busca evitar as perdas de tempo em fila, e em ações adicionais como busca da carteira, pagamento, etc. Além disso, tais benefícios podem ter impacto direto sobre o motorista, refletindo-se nos custos de combustível e no desgaste do veículo. Igualmente, os efeitos se estendem à economia como um todo, especialmente quando esses custos são repassados aos consumidores devido ao aumento no custo do frete de mercadorias (Alvarenga, 2010).

Os benefícios econômicos também poder ser observados por parte do operador, já que a implantação de sistemas MLFF pode ser uma alternativa para redução das tarifas praticadas, através da realização da cobrança em mais locais do trecho da concessão com ajuste da proporcionalidade tarifária e aumento da base de usuários pagantes (Santos e Ribeiro, 2018). Ademais, o aumento da capacidade da rodovia e melhoria do fluxo de veículos, resultando na redução de congestionamentos, tem um impacto direto na redução da emissão de gases poluentes.

Um estudo realizado em uma rodovia no Taiwan identificou uma redução de cerca de 13% nas emissões de CO2 após o aumento no número de faixas ETC (Tseng et al., 2013). Da mesma forma, um estudo de caso sobre o sistema de pedágio na República da Sérvia realizado por

Milenković et al. (2020) demonstrou que a substituição do sistema manual pelo MLFF poderia trazer benefícios ambientais estimados entre 1.349.862 e 1.491.391 Euros por ano, sendo que a implantação do sistema MLFF pode atingir uma redução na emissão de CO2 na faixa de 25% a 45%. De acordo com os estudos encontrados na literatura internacional, os sistemas MLFF são os mais eficientes em termos de emissões, seguidos pelos sistemas ETC e, por último, o sistema manual (Lin e Yu, 2008; Pérez-Martinez et al., 2011; Milenković et al., 2020).

Em relação à segurança viária, a adoção de sistemas MLFF oferece vantagens significativas. Um estudo conduzido por Gordin et al. (2011) na Flórida, analisou dados de acidentes nas proximidades de praças de pedágio que foram convertidas para ORT (Open Road Tolling, que é a designação dada nos Estados Unidos para esse tipo de sistemas). Os autores concluíram que a nova tecnologia resultou em redução da exposição dos motoristas à possíveis colisões. Isso ocorre porque nas proximidades das praças de pedágios podem ocorrer problemas como a confusão na troca de faixas e variações de velocidade (Saad et al., 2019), tornando esses pontos propícios a sinistros de trânsito. A distração dos motoristas durante a desaceleração do veículo e busca por dinheiro para pagamento do pedágio também é um fator de risco para ocorrência de acidentes. Adicionalmente, um estudo conduzido por meio de um simulador de direção em uma praça de pedágio híbrida localizada na rodovia estadual (SR-408) em Orlando-Orange County, Flórida, EUA, revelou que os condutores que escolheram o fluxo livre adotaram um comportamento mais seguro (Saad et al., 2019).

Em outra pesquisa, foi avaliada a eficácia da segurança ao introduzir uma praça de pedágio híbrida em uma rodovia na Flórida, EUA, utilizando um método Bayes Empírico multivariado. Os autores constataram que a mudança do sistema de pedágio convencional para o híbrido resultou em reduções médias de colisões de 47%, 46% e 54% para total de colisões, acidentes fatais e com feridos, e acidentes apenas com danos materiais, respectivamente (Abuzwidah et al., 2014). Um estudo de caso em rodovias de Nova Jersey (USA) identificou que o custo estimado dos acidentes foi reduzido em 43,2% após remoção de 9 praças de pedágio para implantação de sistemas MLFF (Yang et al., 2013). Os estudos de Yang et al. (2012) e Gordin et al. (2011) também corroboraram que o pedágio de fluxo livre eficazmente melhora a segurança nas praças de pedágio.

Por outro lado, a implantação de sistemas MLFF também apresenta diversas dificuldades, que podem ser superadas por aperfeiçoamento da tecnologia e interação institucional e investimento em comunicação com usuários. Um desses desafios está relacionado à utilização de sistemas de Reconhecimento Óptico de Caracteres (OCR). O sistema OCR é aplicado para a identificação dos veículos e posterior aplicação de multas, no caso de violação dos pedágios. No entanto, o reconhecimento das placas nem sempre é preciso devido a obstruções como sujeira nas superfícies placas, condições climáticas ou limitações do próprio equipamento, sendo necessária intervenção humana para correção, resultando em custos extras de operação manual (Hsu et al., 2012). Nesse sentido, o aperfeiçoamento tecnológico tem um papel fundamental. Por exemplo, Lin et al. (2012) relatam o desenvolvimento de algoritmo de correspondência de fotografia para transação (algoritmo PT) para melhorar a eficiência da correspondência de dados de transação com imagens de placas de veículos. Os resultados da

simulação mostraram que o algoritmo PT elaborado reduziu a necessidade de trabalho humano para o reconhecimento manual de placas e é um meio viável e confiável para a aplicação de violações.

A implantação do MLFF também encontra obstáculos relacionados à classificação dos diferentes tipos de veículos para fins de cobrança. Em geral, os sistemas de MLFF utilizam o comprimento do veículo como base para classificá-lo em categorias como automóveis, caminhões leves e pesados (Barbosa, 2013; Santos e Ribeiro, 2018).

No Brasil, o sistema de cobrança difere, sendo baseado na contagem de eixos e rodagem dupla. Portanto, é crucial que o sistema MLFF seja adaptável para acomodar essas especificidades do método de cobrança utilizado no país (Barbosa, 2013).

Uma desvantagem adicional desse sistema é o aumento de usuários que o utilizam sem a intenção de pagar, comparado ao sistema convencional, já que ele não possui barreiras físicas nos pontos de cobrança (Barbosa, 2013; Ptolemus, 2020). As violações podem ocorrer através da obstrução da placa ou pela passagem do veículo muito próximo ao veículo da frente, dificultando a leitura da placa. Esse tipo de violação pode ser evitado com a utilização de sistemas que requerem a implantação de um chip ou tag de posicionamento em todos os veículos, como no sistema Beidou utilizado na China. O sistema tem as funções de pagamento em alta velocidade, localização precisa, aquisição de informações relevantes do veículo vinculado (incluindo informações de longitude e latitude, velocidade do veículo e limite atual de velocidade na estrada, etc.) e envio para a plataforma de nuvem, etc. (Peng et al., 2022). No entanto, a aplicação desse tipo de sistema só seria viável a partir de uma legislação nacional.

Em países como a Alemanha, todos os veículos vêm de fábrica com um sistema desse tipo. Foram observados na literatura estudos a respeito de subsídios públicos para implantação de tags. Em Taiwan, a política de subsídio pelo governo implicou em um aumento de 40% para 93% na adesão ao pagamento eletrônico e de cerca de 17% na base de veículos pagantes (Tseng e Pilcher, 2022). Além disso, podem ser oferecidos descontos para usuários de tag como incentivo à utilização desse tipo de pagamento. Na concessão RioSP, o Desconto Básico de Tag (DBT) é de 5% em cada cobrança de tarifa para os usuários de tag e os impactos financeiros da concessão desse desconto são considerados desde os estudos de viabilidade (ANTT, 2022).

Ainda quanto às violações, um estudo de benchmarking realizado pela KMPG em 2018 consultou 65 operadores públicos e privados de pedágio no mundo todo a respeito dos níveis de inadimplência em diferentes sistemas de pedágio. O nível médio de inadimplência foi de 3,5%. Considerando somente sistemas MLFF, o índice variou entre 2% e 15% (KPMG, 2019).

6.1.1.2. CONTEXTO BRASILEIRO

No contexto brasileiro, a implantação de sistemas MLFF é orientada pela Resolução Nº 984/2022 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). A resolução específica que o sistema *Multi-lane Free Flow* pode ser implementado diretamente pelo órgão com circunscrição sobre a via ou pela concessionária, quando o trecho se encontrar sob concessão. Nesse último caso, devem ser seguidas também as condições estabelecidas no contrato de concessão e demais normas regulatórias. A resolução estabelece também os padrões de sinalização vertical, que devem ser implantados no acesso e ao longo da via, garantindo informações prévias ao usuário acerca do sistema MLFF implantado. As placas de sinalização utilizadas devem conter os valores das tarifas de pedágio, além de informações sobre: veículos isentos; configuração da infração de trânsito em caso de não pagamento da tarifa; local, contato telefônico e site para obter mais informações e indicação das opções de pagamento.

Segundo o CONTRAN, a identificação dos veículos deve ser realizada utilizando a tecnologia de reconhecimento óptico de caracteres (OCR). Outras tecnologias de identificação automática de veículos podem ser utilizadas para efeitos de redundância ou para viabilizar a vinculação a sistemas de auto pagamento disponíveis na via de forma complementar à tecnologia OCR. Nesses casos, a possibilidade de utilização depende da adesão prévia, expressa e voluntária do usuário, sendo livre sua escolha de quaisquer das tecnologias disponíveis na via. O pagamento da tarifa é obrigação do usuário, sendo que esse pode ser realizado por meio de sistema de auto pagamento ou outra forma estabelecida pelo órgão com circunscrição sobre a via, devendo ser assegurada ao usuário a possibilidade de pagamento em momento posterior à passagem do veículo na via. O prazo máximo de pagamento é de 30 dias, iniciado no dia seguinte ao da passagem do veículo pelo ponto de leitura. Passado esse prazo, é configurada infração de trânsito previsto no artigo 209 do Código Brasileiro de Trânsito (CTB). O pagamento da multa não desobriga o usuário de realizar o pagamento das tarifas de pedágio devidas.

O primeiro sistema de pedágio eletrônico com pagamento automático e sem cancela (*Free Flow*) no Brasil foi implementado na rodovia Rio-Santos (BR-101). A operação do novo modelo de cobrança sem paradas foi autorizada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e iniciou a operação após a conclusão dos serviços iniciais feitos pela concessionária CCR RioSP, em abril de 2023.O sistema dispensa a estrutura das praças de pedágio e funciona por meio de sensores e câmeras em três pontos da Rio-Santos, sendo o primeiro em Mangaratiba (km 477), o segundo em Itaguaí (km 414) e o terceiro em Paraty (km 538). O pagamento da tarifa ocorre pela leitura de uma tag (etiqueta eletrônica), de empresas como SemParar e ConectCar, sendo cobrado direto na fatura. Como medida de incentivo a aquisição da etiqueta eletrônica, os motoristas com a tag podem receber desconto progressivo nos preços do pedágio, que variam entre 5% e 70% do valor. No entanto, para os veículos que não possuam, a cobrança foi realizada através de reconhecimento visual pela leitura da placa. Após a passagem pelo pedágio, o valor fica disponível para pagamento no site da concessionária, no aplicativo da CCR – CCR RioSP ou via WhatsApp.

Atualmente a cobrança viária através de sistemas *Free Flow* já está implantada em 7 rodovias brasileira:

- Rio-Santos (BR-101) - CCR Rio SP em: Itaguaí, no km 414; Mangaratiba, no km 447 e Paraty, no km 538.
- ERS-122 - Caminhos da Serra Gaúcha (CSG) em: Ipê, no km 151; Antônio Prado, no km 108; Farroupilha, no km 45; São Sebastião do Caí, no km 4.
- ERS-446 - Caminhos da Serra Gaúcha (CSG) em Carlos Barbosa, no km 6.
- ERS-240 - Caminhos da Serra Gaúcha (CSG) em Capela de Santana, no km 30.
- SP-333 – EcoNoroeste em Itápolis, no km 179; Jaboticabal, no km 110.
- MG-459 - EPR Sul de Minas em Monte Sião, no km 12,7;
- Contorno Sul da Rodovia Tamoios (SP-099) em Caraguatatuba, no km 13,5.

Diversas novas implementações estão previstas para os próximos anos.

6.1.1.3. SISTEMA MULTI-LANE FREE FLOW EM OPERAÇÃO EM CONCESSÕES ECORODOVIAS

O sistema em foco neste projeto RDT encontra-se já também em operação no Brasil. Ele é operado pela empresa italiana Sinelec. A empresa tem intensificado sua atuação na América do Sul, especialmente no Brasil, com a implantação de um sistema *Multi-lane Free Flow*. Este desenvolvimento, realizado em colaboração com a EcoRodovias e concessões do grupo, e tem passado por rigorosos testes no país.

A Sinelec opera como a vertente tecnológica desta aliança, enquanto a EcoRodovias desempenha o papel de plataforma de concessões no território brasileiro e a Ecopistas atua como a concessão específica para este projeto. Esta colaboração integrada alinha-se ao modelo "*One Company*" adotado pelo Grupo ASTM, permitindo a combinação e supervisão de competências diversificadas, otimizando assim a gestão completa da cadeia de valor.

Conforme apresentado, os sistemas MLFF, ou ORT, são sistemas projetados para cobrar veículos que passam por uma seção de estrada sem interferência substancial no fluxo de tráfego. Deste modo, diminui-se a necessidade de reduzir velocidades, parar ou redirecionar o trânsito. A manutenção da velocidade constante, a ausência de infraestrutura e a redução do fechamento de faixas para manutenção pode ocasionar um aumento na segurança e na fluidez do tráfego, o que consequentemente resulta em menor poluição das emissões de veículos.

Dado o contexto ambiental, estruturas mais simples, utilizadas apenas para abrigar os dispositivos e a manutenção, levam a um menor impacto e a uma diminuição no uso do solo. No sentido da sustentabilidade, o Grupo ASTM, tem adotado práticas ambientais em seus protocolos operacionais e estratégicos. Este comprometimento foi estabelecido com a meta de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 25% até 2030, com base nas métricas de 2020.

A Iniciativa de Metas Baseadas na Ciência (SBTi) validou essas metas como alinhadas com as exigências do Acordo de Paris. Em paralelo, a EcoRodovias, seguindo as diretrizes do Grupo ASTM, está elaborando seu plano de sustentabilidade, que inclui estratégias como um

Programa Zero Carbon para neutralizar emissões de gases de efeito estufa em determinadas operações.

No que diz respeito ao pagamento em sistemas MLFF, há uma transição para modos de pagamento digitalizados, eliminando a necessidade de dinheiro físico. Esta evolução tem o objetivo de oferecer benefícios tanto para os usuários quanto para os operadores, minimizando os desafios logísticos e riscos associados ao manuseio de dinheiro. O projeto é baseado no S*GATE, a solução de cobrança 'open road' desenvolvida pela Sinelec na Itália. O S*GATE, através do uso combinado de Inteligência Artificial (IA) e rastreamento de veículos 3D aplicado à análise em tempo real de fluxos de vídeo, procura aumentar o nível de precisão e detecção, independentemente dos fatores ambientais.

Dado esse contexto, um aplicativo adaptativo foi desenvolvido para facilitar o acesso dos usuários registrados ao sistema de cobrança de pedágio. Este aplicativo, otimizado para dispositivos, permite que os usuários visualizem dados e gerem relatórios focados em indicadores chave de desempenho (KPIs) a partir de qualquer localização. Com base na modularidade e flexibilidade desta solução digital, está sendo possível personalizá-la para se adequar às particularidades do sistema rodoviário brasileiro.

Diferentemente dos países europeus, o Brasil adota um sistema de classificação de veículos fundamentado primordialmente no número de eixos. Neste contexto, o tamanho do veículo, indicado pelo número de seus eixos, é o critério utilizado para estabelecer as tarifas de pedágio para caminhões e ônibus. Sinelec, e EcoRodovias construíram e colocaram um portal experimental que pode ser usado em condições reais para testar a viabilidade técnica das escolhas, o desempenho de cada um dos aparelhos, diante da alta velocidade, condições variáveis de tráfego e clima. A Figura 11 apresenta um dos pórticos objeto de teste localizado na região metropolitana de São Paulo, na Rodovia Ayrton Senna, próximo ao pedágio de Itaquaquecetuba.

Figura 11 – Pórtico de testes na EcoPistas

De acordo com os princípios de projeto que visam reduzir o custo total de propriedade do S*GATE, decidiu-se não instalar sensores no asfalto, e sim integrar sensores a laser para determinar o tamanho e o volume do veículo.

A Figura 12 apresenta as câmeras contadoras de eixo, câmeras de reconhecimento de placas otimizadas para uso no Brasil e antenas ETC compatíveis com o Artefacto, protocolo brasileiro de comunicação de etiquetas RFID.

Figura 12 – Câmeras do pórtico de testes na EcoPistas

O algoritmo de correlação de dados que compõe a transação de pedágio é derivado de uma combinação de lógicas de aplicação, modelos de Aprendizado de Máquina, visando minimizar a necessidade de intervenções de correção posteriores.

O sistema S*GATE tem a capacidade técnica de consolidar informações obtidas por dispositivos específicos, formando uma identificação digital exclusiva para cada veículo. Essa identificação abrange características como forma, dimensões, placas dianteira e traseira, número de eixos observados em ambas as direções, detecção de eixos elevados, bem como marca, modelo, cor e marcações do veículo. A referida identificação digital é associada precisamente à data, hora e coordenadas GNSS. Posteriormente, esses dados são transmitidos através de um protocolo criptografado para um *data lake*, projetado para análises subsequentes. Este sistema se encontra em operação plena em pórticos MLFF na Concessionária EcoNoroeste deste setembro de 2024.

6.1.2. MEDIDAS COMPLEMENTARES UTILIZADAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE RODOVIAS

6.1.2.1. OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE FAIXAS REVERSÍVEIS

As faixas reversíveis, também conhecidas como faixas de contrafluxo ou faixas bidirecionais temporárias, são consideradas como um dos métodos mais rentável para aumentar a capacidade de uma infraestrutura através da alteração da direção do fluxo de tráfego em uma determinada faixa de rodagem, dependendo das necessidades de tráfego em diferentes momentos do dia (Asaithambi *et al.*, 2021). Ao redistribuir a capacidade da via de acordo com a demanda, as faixas reversíveis podem reduzir significativamente os congestionamentos, melhorando os tempos de viagem e a eficiência geral do sistema de transporte (Wollenstein-Betech *et al.*, 2022).

O primeiro sistema de faixas reversíveis identificado foi implementado em 1928, na 8ª Rua em Los Angeles, Califórnia, EUA. Esta inovação surgiu como uma resposta à crescente demanda de veículos e à necessidade de uma gestão mais eficiente do espaço viário. A Figura 13 demonstra o sistema de faixas reversíveis utilizado no *Wilshire Boulevard* em Los Angeles, Califórnia, EAU, em 1937, este sistema usava cones de tráfego posicionados manualmente durante os períodos de pico.

Figura 13 – Faixas reversíveis no Wilshire Boulevard, Los Angeles, Califórnia, EUA

Dado o contexto em que o automóvel começava a dominar as cidades americanas, Los Angeles, em particular, enfrentava desafios significativos de congestionamento. A *Wilshire Boulevard*, sendo uma das principais artérias da cidade, experimentava fluxos de tráfego intensos em direções opostas durante os horários de pico. Assim, a introdução de uma faixa reversível foi uma tentativa pioneira de adaptar a infraestrutura existente às novas demandas de mobilidade (Guebert *et al.*, 2010).

Este sistema foi concebido com o objetivo de melhorar a capacidade das vias urbanas, especialmente em áreas com padrões de tráfego assimétricos, como os observados durante os horários de pico da manhã e da tarde (Guebert *et al.*, 2010; Wolshon e Lambert, 2004). A eficiência do sistema de faixas reversíveis provém da habilidade de aproveitar a capacidade subutilizada em direções de menor fluxo, redirecionando a capacidade para atender ao de maior demanda, eliminando ainda a necessidade de construir faixas adicionais (Liu *et al.*, 2011).

As faixas reversíveis são classificadas em duas categorias principais. A primeira, denominada faixas de contrafluxo e barreira móvel, refere-se às faixas existentes cuja direção pode ser alterada ao longo do dia, adaptando-se às demandas variáveis de tráfego. Estas faixas utilizam sinalização dinâmica e, em alguns casos, barreiras móveis para reconfigurar a separação entre os sentidos opostos, sendo especialmente úteis em corredores com padrões de tráfego assimétricos. A segunda categoria abrange as faixas exclusivas separadas, que são adicionais e paralelas às faixas regulares. Estas podem ser ativadas ou desativadas conforme a necessidade e direção do fluxo. Controladas por sinalização específica, estas faixas são ideais para vias com espaço lateral disponível ou que enfrentam flutuações significativas na demanda, como áreas próximas a grandes eventos (Wollenstein-Betech *et al.*, 2022). A maioria das faixas reversíveis serve para mitigar os efeitos de um tráfego desbalanceado durante um dos três cenários seguintes: horário de pico, tráfego relacionado a eventos ou evacuação de emergência (Kishore, 2011).

Entre os critérios de implantação de um sistema de faixas reversíveis, encontram-se os seguintes critérios (Guebert *et al.*, 2010; Wolshon e Lambert, 2004):

- Demanda assimétrica de tráfego: a velocidade média na *freeway* deve sofrer uma redução de, no mínimo, 25% durante os períodos de congestionamento em comparação com a velocidade em fluxo livre. Em contextos urbanos, isso se traduz em congestionamentos significativos, com veículos falhando em atravessar uma ou mais fases verdes em interseções controladas por semáforos. Nesse sentido, a demanda deve exceder a capacidade da rodovia ou avenida.

- Previsibilidade do congestionamento: o congestionamento deve ser regular e previsível, ocorrendo em horários ou situações específicas.

- Fluxo unidirecional dominante: o fluxo de congestionamento deve ser predominantemente unidirecional, com uma distribuição aproximada de 65/35 durante os horários de pico.

- Restrições e espaço para manobras: deve haver restrições nas manobras de viragem à esquerda, seja entrando no corredor principal ou saindo dele e espaço suficiente para veículos realizarem manobras de mudança de faixa, especialmente nas zonas de início e fim da faixa reversível

- Sinalização adequada: a via deve ser capaz de acomodar sinalização clara e visível, incluindo sinais de trânsito, marcas de pavimento e, possivelmente, barreiras físicas para indicar a direção do tráfego.

- Segurança: deve haver uma análise de segurança para garantir que a introdução de uma faixa reversível não aumente o risco de colisões ou outros incidentes de tráfego.

- Acessos e cruzamentos: a presença de muitos acessos, interseções ou cruzamentos pode complicar a operação de uma faixa reversível. A configuração da via e a frequência de pontos de conflito devem ser consideradas.

- Sistemas de monitoramento: a capacidade de monitorar o tráfego em tempo real pode auxiliar para a operação de faixas reversíveis, permitindo ajustes dinâmicos conforme necessário.

A sinalização para faixas reversíveis combina elementos verticais, como placas, com sinalização horizontal, representada por marcas no pavimento. Adicionalmente, sinais luminosos semafóricos são empregados para reforçar as direções permitidas. Em situações específicas, dispositivos auxiliares como cones ou barreiras podem ser utilizados, demandando a intervenção de agentes de trânsito para sua instalação e remoção durante as operações de reversão (Asaithambi *et al.*, 2021).

Nos Estados Unidos, as faixas reversíveis são demarcadas por linhas duplas amarelas seccionadas pintadas no asfalto (sinalização horizontal) e por placas regulamentadoras que indicam o início, término, horários de operação e manobras permitidas (sinalização vertical). (Federal Highway Administration, 2009).

No contexto europeu, o projeto EasyWay adota o gerenciamento dinâmico de faixas de tráfego utilizando o Sistema de Mensagens Variáveis (*Variable Message Signs* - VMS). (De Biasi, 2012).

No Brasil, o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, conforme estabelecido em 2014, segmenta a sinalização em categorias específicas: horizontal, vertical e semafórica. O Manual de Sinalização Horizontal define a Marcação de Faixa Reversível (MFR) para contrafluxo como linhas duplas seccionadas, pintadas de amarelo e com espaçamentos iguais entre si. Quanto à sinalização vertical, o manual enfatiza que a MFR deve ser complementada por placas indicativas, informando sobre sua existência e os horários de operação em cada direção. O Manual de Sinalização Vertical de Advertência também destaca a possibilidade de sinalização especial em situações em que os sinais padrões não se aplicam. Além das placas de regulamentação e advertência, placas educativas podem ser utilizadas para orientar e educar os motoristas sobre comportamentos seguros no trânsito.

A sinalização estática comumente é realizada com painel fixo ao longo do corredor, indicando os horários de uso das faixas reversíveis, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Sinal estático na Av. Beira Rio, Recife, PE

A sinalização dinâmica em sistemas de faixas reversíveis frequentemente utiliza pórticos para indicar se uma faixa está operacional ou não, conforme apresentado na Figura 15. Embora não haja padrões estritos para a marcação do pavimento nesses sistemas, a abordagem mais comum é a aplicação de uma dupla linha amarela seccionada para demarcar a faixa reversível.

Figura 15 – Sinalização dinâmica com marcação amarela do pavimento

A transição inclui dois componentes: temporal e espacial. A transição temporal consiste no tempo necessário para que o fluxo inteiro saia da faixa antes de poder abrir ela no sentido oposto. O componente espacial são as zonas de transição que devem ser planejadas.

As faixas reversíveis no contrafluxo são usualmente implementadas em contextos urbanos, onde as velocidades tendem a ser mais moderadas em comparação às *freeways*. A ideia central é potencializar, de forma temporária, a capacidade da direção com maior congestionamento,

aproveitando a capacidade subutilizada do sentido oposto. Esta estratégia melhora o fluxo de tráfego sem a necessidade de expandir a infraestrutura existente, proporcionando uma solução eficiente e econômica para os desafios do trânsito urbano (Hausknecht *et al.*, 2011).

O sistema de barreira móvel, diferentemente das faixas reversíveis em contrafluxo, é menos ágil, não possibilitando rápidas alterações de sentido. Esta abordagem se baseia na premissa de que os desequilíbrios de fluxo ocorrem majoritariamente pela manhã e à tarde em direções opostas, com cerca de 70% do tráfego no sentido mais congestionado e 30% no sentido contrário. Sendo assim, resulta em um congestionamento previsível em uma direção e um fluxo mais livre na direção oposta. Com a barreira móvel, elimina-se a necessidade de sinalização dinâmica. Esse método evita o contrafluxo e permite velocidades maiores, no entanto, há a necessidade da utilização de uma máquina especial para movimentar a barreira. (Wollenstein-Betech *et al.*, 2022, Bain *et al.*, 2001). A Figura 16 ilustra um exemplo dessa tecnologia implantada na Golden Gate, na Califórnia.

Figura 16 – Ilustração do sistema de faixa reversível com barreira móvel

A implantação de faixas reversíveis é uma estratégia considerada para solucionar problemas de congestionamento diário em pontes em diversos países.

6.1.2.2. SISTEMAS DE PEDÁGIO VARIÁVEL

A precificação de estradas há muito é vista como um instrumento potencialmente eficiente para lidar com o congestionamento do tráfego. Este tema remonta a 1920, quando Pigou (1932) usou o exemplo de uma estrada congestionada para explicar a economia dos “efeitos externos” e, em particular, como um imposto corretivo pode ser usado para restaurar a eficiência quando alguns bens não têm um preço compatibilizado ao custo marginal. Para uma estrada congestionada, esse "bem" em particular é o acréscimo no tempo de viagem de outros usuários, cujo valor não é considerado pelos indivíduos quando tomam decisões sobre a realização de suas viagens (De Palma *et al*. 2011).

Nesse contexto, a aplicação de tarifas variável, com valores mais elevados durante o período de congestionamento, funciona como uma penalidade econômica para desencorajar o consumo do bem nas horas pico, e assim induzir uma distribuição espacial e temporal desse excesso de demanda (Button, 2010). Tarifas variáveis podem assumir valores pré-determinados, ou variação dinâmica em função das condições operacionais.

Tarifações dinâmicas são amplamente utilizadas em sistemas de distribuição de eletricidade, água e gás, e muitos economistas defendem seu uso em sistemas de transporte como um mecanismo de otimização do uso das infraestruturas do setor, principalmente para estradas, portos, aeroportos e hidrovias. Com a evolução dos sistemas de cobrança eletrônica de pedágio através de dispositivos eletrônicos e por processamento de imagem, tem-se uma maior facilidade de implementação desse tipo de política, porém é necessário atentar à possibilidade de uma repercussão negativa por parte da população.

Esses mecanismos podem agir de diferentes maneiras, cobrando tarifas maiores durante certos períodos do dia ou certas regiões de um determinado sistema viário, bem como definir taxas adicionais nos períodos em que o sistema está operando acima de sua capacidade, ou seja, taxar o congestionamento de maneira instantânea. Outra forma bastante utilizada nos EUA são as *High-occupancy toll lanes* (HOT lanes), que são faixas prioritárias para veículos com alta ocupação e que taxam dinamicamente outros veículos que por ela trafegam. Dos modos de tarifação citados, o que provavelmente mais se adequa a este projeto é o de tarifação variável, porém com valores pré-definidos para os horários de pico (não dinâmica), visto que os fluxos máximos ocorrem sempre no mesmo período do dia, além do fato de gerar menos confusão ao usuário final, facilitando a aceitação por parte destes.

Um exemplo de aplicação cobrança variável em função de congestionamento em pontes é a ponte Itchen, sobre o rio Itchen em Southampton, Hampshire, que liga a A3025 Portsmouth Road a Southampton. As tarifas cobradas nos horários de pico (Segunda a Sexta, das 7h00 às 9h30 e das 16h00 às 18h30) são de 14% a 33% maiores que nos horários fora de pico. Além disso, não residentes pagam mais pelo acesso, e veículos eléctricos são isentos de taxas (Southampton City Council, 2020).

Na Califórnia foram investigados os efeitos da implementação de pedágio variável durante os horários de pico no tráfego da Bay Bridge, que liga São Francisco a Oakland. A pesquisa

revelou que, após a introdução de uma tarifa de $2,50 para a faixa HOV (High Occupancy Vehicle), houve redução no tráfego dessa faixa específica. Cerca de 54% dessa queda no tráfego pode ser diretamente atribuída à nova tarifa. O estudo também apontou que, embora muitos motoristas tenham optado por pagar a tarifa mais alta, outros fatores externos, como o aumento dos preços da gasolina e taxas de desemprego, desempenharam um papel no comportamento do tráfego durante esse período (Cervero, 2012).

Na Flórida, um estudo semelhante analisou os impactos no tráfego devido à implementação de tarifas variáveis nas pontes de Lee County. Observou-se que, após a introdução de descontos de pedágio variável, houve uma mudança significativa nos padrões de tráfego, com motoristas elegíveis ajustando seus horários de viagem para se beneficiar dos descontos. Especificamente, houve um aumento de 7% no tráfego durante o período de desconto da manhã cedo e uma diminuição correspondente durante o horário de pico da manhã. Concluiu-se que a tarifação variável tem influência no comportamento de viagem dos motoristas (Burris et al., 2000).

Dentre as vantagens que esse sistema introduz, pode-se mencionar a maximização da infraestrutura existente, incentivo às viagens fora do horário de pico, tempos de viagem mais previsíveis e redução nas emissões de gases poluentes.

Uma das dificuldades impostas por estas tecnologias é a identificação dos veículos para monitoramento e cobrança. Dentre as formas de realizar esta identificação, as mais comuns são o uso de imagens obtidas com câmeras de monitoramento e o reconhecimento dos veículos por meio de tags instaladas nos mesmos. Neste estudo foi feito o acompanhamento do desenvolvimento e a avaliação da efetividade de um sistema de identificação de veículos por imagem. Também foram avaliadas as possibilidades de embarcar este sistema em um sistema MLFF.

6.2. ANÁLISE DE DEMANDA

Os dados de tráfego analisados no presente relatório são provenientes da Praça de Pedágio da Concessão Ecovias Ponte, localizada na saída da Ponte Rio-Niterói no sentido Rio-Niterói, conforme apresentado na Figura 17. Foram recebidos os dados para as cabines manuais e automáticas dessa praça de pedágio para o período entre setembro de 2015 e agosto de 2023.

Figura 17 – Praça de Pedágio Ecovias Ponte

Os dados de volume de veículos pagantes entre 2022 e 2023 foram empregados para subsidiar uma análise mais detalhada da flutuação mensal e diária na praça de pedágio.

6.2.1. EVOLUÇÃO DO VOLUME MENSAL

A Figura 18 apresenta a variação do volume de tráfego total mensal (eixo principal à esquerda) e volume médio diário mensal (eixo secundário à direita) entre os meses de setembro de 2015 e agosto de 2023 na praça de pedágio da Ecovias Ponte.

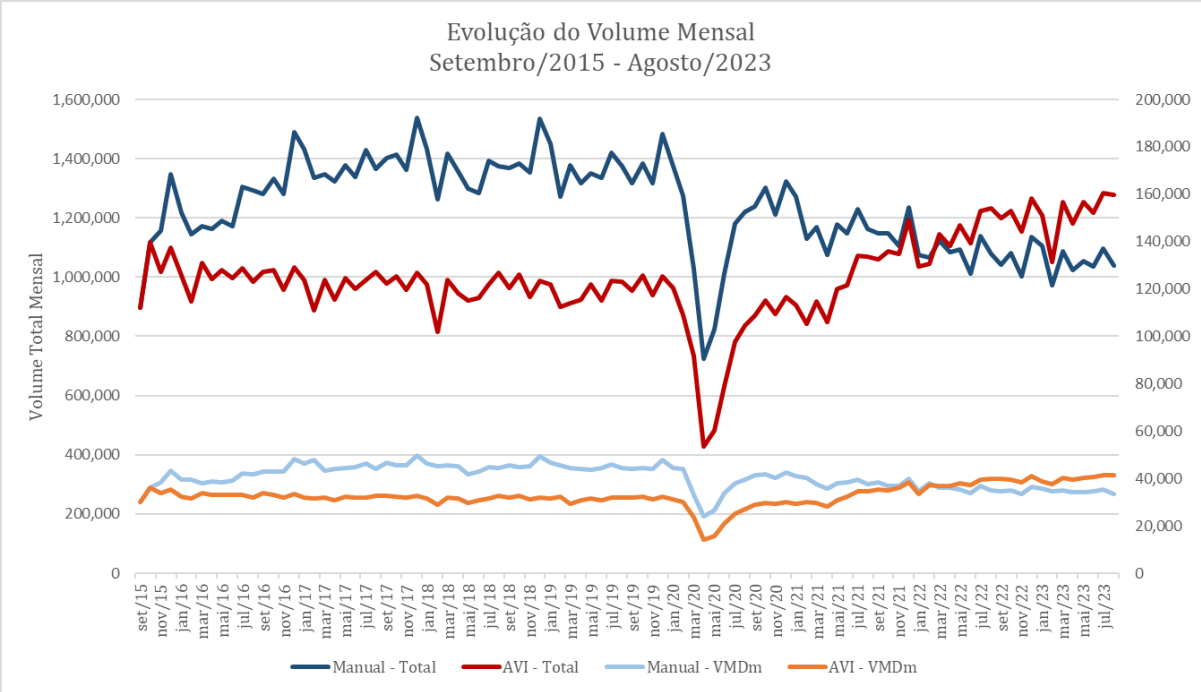

Figura 18 – Evolução do Volume Mensal (2015-2023)

O gráfico da Figura 18 evidencia uma tendência ascendente no volume total de veículos ao longo do período analisado. Contudo, destacam-se dois segmentos temporais distintos: o primeiro abrangendo de setembro de 2015 a abril de 2020, e o segundo de abril de 2020 a agosto de 2023. Esses intervalos são demarcados por um ponto/período de transição que representa uma expressiva redução no volume, iniciando-se em março de 2020 e atingindo seu ponto mais baixo em abril e maio do mesmo ano. Este ponto/período coincide com o início da pandemia da Covid-19 e a promulgação, em 17 de março, pelo governo do Rio de Janeiro, de medidas restritivas à circulação, visando conter a propagação da pandemia.

Durante o primeiro segmento temporal, no intervalo entre setembro de 2015 e fevereiro de 2020, observou-se um crescimento maior no volume de veículos que utilizam a cobrança manual em comparação com aqueles que usam o sistema de cobrança automática. O volume de veículos com cobrança manual registrou um aumento de 42% (entre setembro de 2015 e setembro de 2015 e fevereiro de 2020), contrastando com a estabilidade nos valores relacionados à cobrança automática, os quais praticamente não apresentaram um incremento entre esses meses.

Analisando o segundo segmento temporal, no intervalo de abril de 2020 a agosto de 2023, aconteceu uma tendência diferente. O volume mensal total de veículos com cobrança automática experimentou um crescimento maior do que os veículos com cobrança manual. Excluindo os meses de abril e maio de 2020, nos quais os volumes foram consideravelmente

reduzidos, a relação de volumes entre junho de 2020 e agosto de 2023 revela que o volume total de veículos que utilizam o sistema de cobrança manual permaneceu praticamente inalterado (0%), enquanto aqueles que usam o sistema de cobrança automática aumentaram em 100%.

Ao longo de todos os anos estudados, foram observados aumentos no volume de veículos totais no mês de dezembro e reduções em janeiro, refletindo picos positivos em dezembro e picos negativos em janeiro. Analisando os volumes médios diários, observam-se tendências similares.

Para visualizar mais detalhadamente as variações volumétricas, as Figura 19 e Figura 20 apresentam essas variações expressas em percentuais, referenciando o início do período de estudo, designado como o ano base da análise, em setembro de 2015.

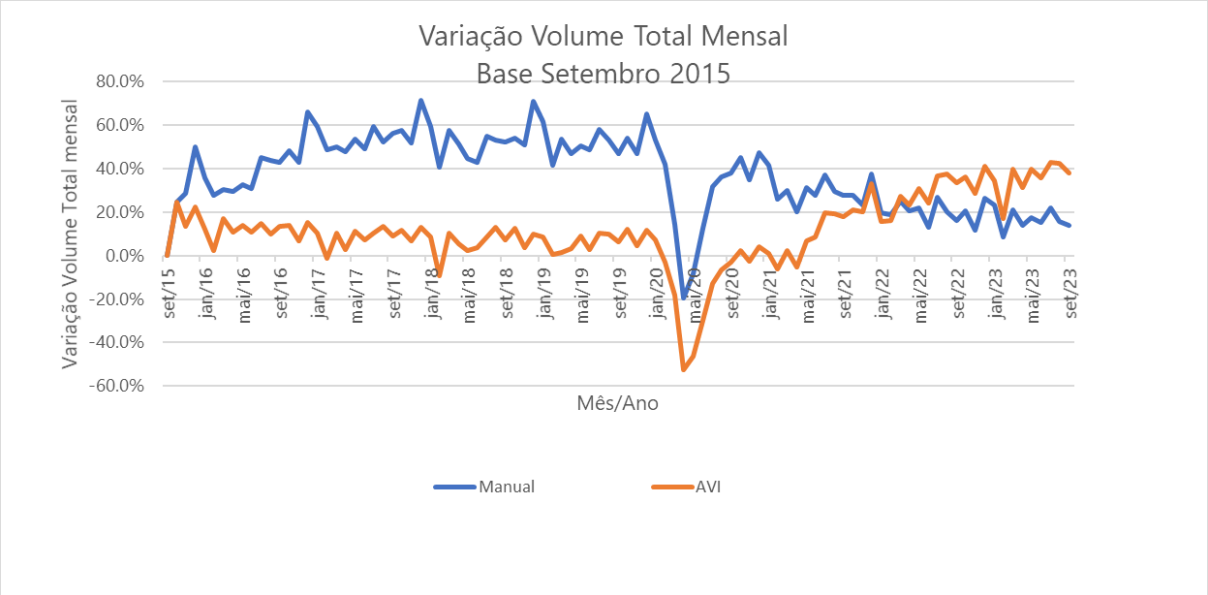

Figura 19 – Variação do Volume Total Mensal (%) (2015-2023)

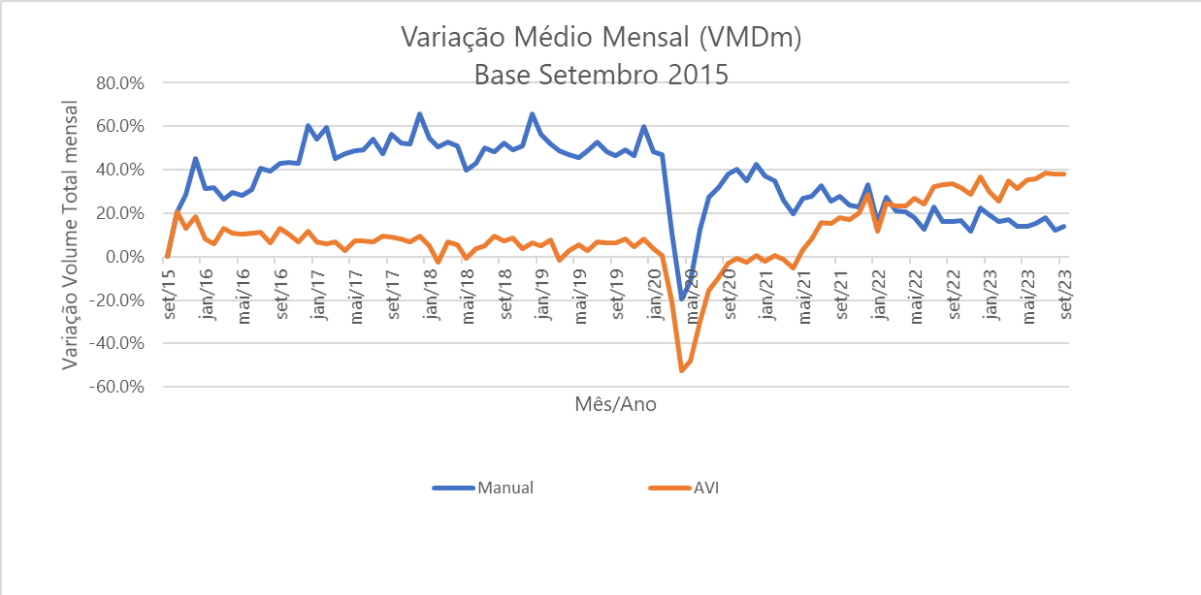

Figura 20 – Variação do Volume Médio Diário Mensal (%) (2015-2023)

Os dados indicam um crescimento expressivo do volume total até 2019, seguido pelo impacto significativo da pandemia de COVID-19 em 2020, que causou uma queda brusca nos volumes, especialmente nas transações manuais. Após esse período, observa-se uma recuperação gradual, com o AVI ganhando participação e se tornando mais relevante nos últimos anos. Vale ressaltar que setembro de 2015 teve um volume inferior aos demais meses, amplificando as variações numéricas iniciais, resultando em picos elevados no início da série.

6.2.2. Evolução da Proporção de veículos que usam cobrança automática

Nas figuras apresentadas na seção anterior, é possível observar a evolução e variação de cada sistema de cobrança. A seguir, a Figura 21 mostra a evolução da proporção de veículos que adotam o pagamento automático.

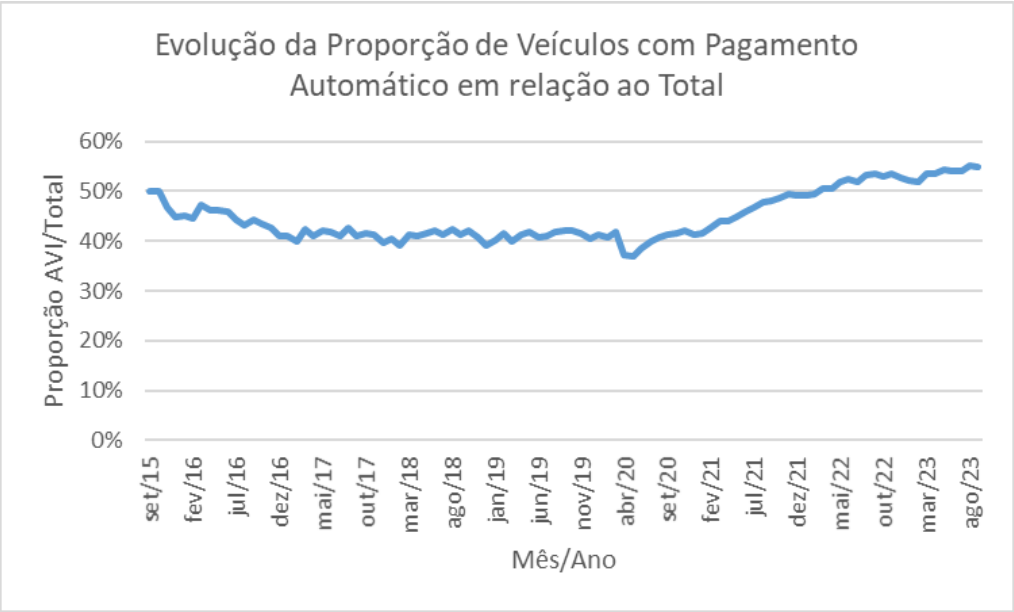

Figura 21 – Variação da Proporção de Veículos com Pagamento Automático (2015-2023)

A figura acima evidencia o incremento na proporção de veículos que optam pelo pagamento automático. A porcentagem de veículos utilizando esse método de pagamento aumentou em 10% ao longo do período de setembro de 2015 a setembro de 2023, passando de 50% para 55% ao término do período analisado.

6.2.3. VMDm por Categoria Veicular

As figuras a seguir apresentam a variação do Volume Médio Diário Mensal por Categoria de Veículo. A Figura 22 para cabines de cobrança manual e a Figura 23 para automáticas.

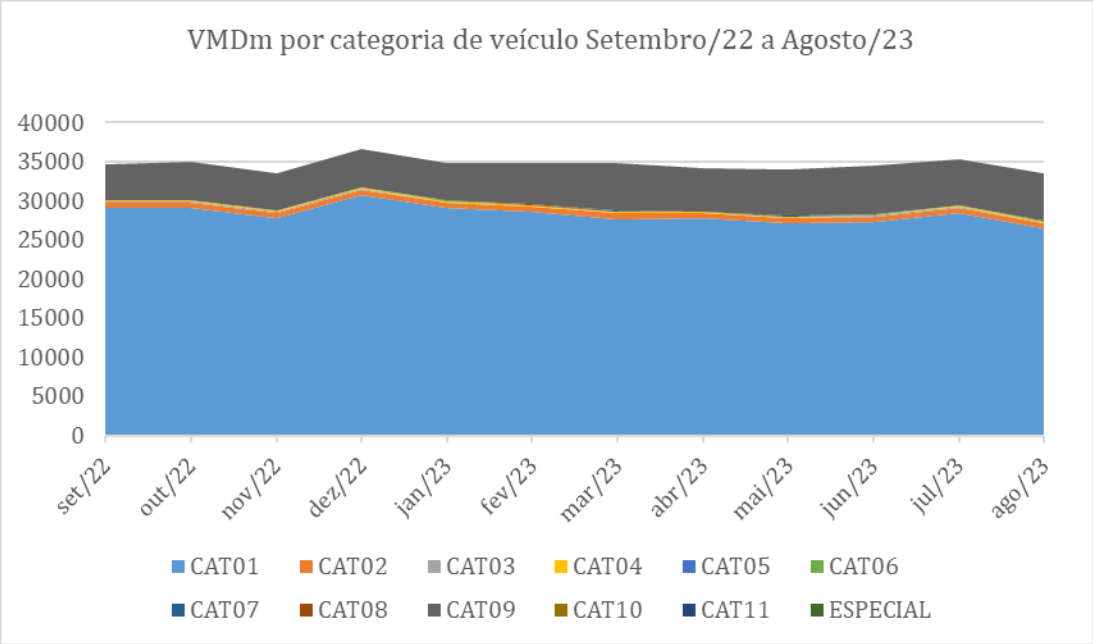

Figura 22 – Variação do Volume Médio Diário Mensal por Categoria de Veículo (Praça Ecovias Ponte - Manual)

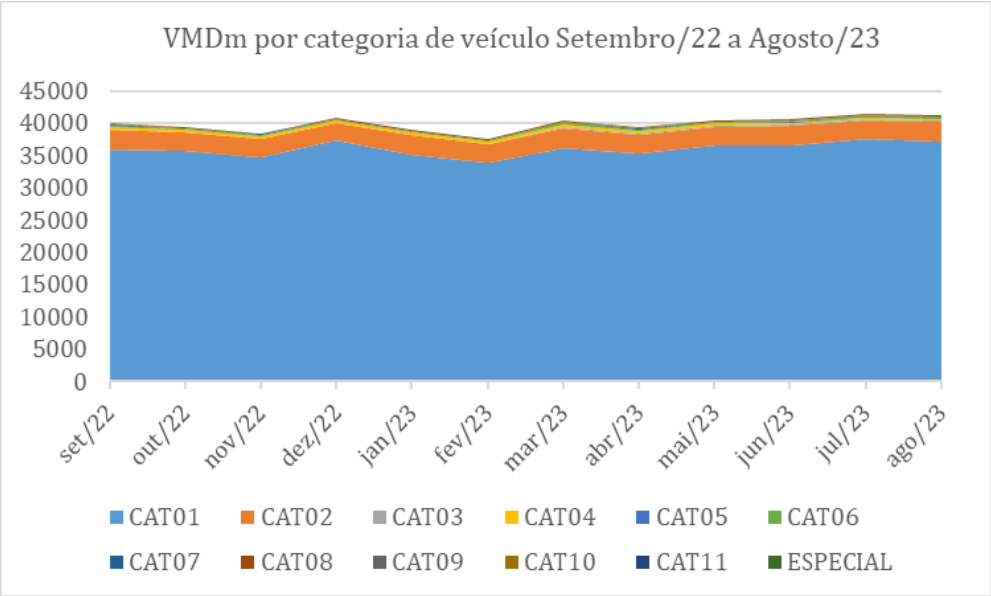

Figura 23 – Variação do Volume Médio Diário Mensal por Categoria de Veículo (Praça Ecovias Ponte - AVI)

Ao analisar a composição do tráfego, nota-se que a categoria 1 (veículos de passeio e utilitários) representa aproximadamente 82% do tráfego para o sistema de cobrança manual e 90% do tráfego para o sistema de cobrança AVI.

6.3. PESQUISA ORIGEM-DESTINO

A elaboração e aplicação da pesquisa de origem e destino (OD) foram realizadas pela empresa Perplan, com acompanhamento dos integrantes da equipe do LASTRAN para assegurar que todas as etapas do processo atendessem aos objetivos do projeto. Esse acompanhamento abrangeu desde o desenvolvimento do formulário inicial até a adaptação das metodologias de coleta de dados, visando maximizar a eficiência e a precisão dos resultados.

6.3.1. METODOLOGIA

A pesquisa de origem e destino tem como objetivo principal estabelecer a matriz de viagens dos usuários da ponte Rio-Niterói, identificando as principais origens e destinos desses veículos. Dessa forma, o questionário foi elaborado incluindo perguntas como bairro, município ou estado de origem, bairro, município ou estado de destino, frequência da viagem, número de passageiros, informações sobre os veículos, entre outros. O questionário final da pesquisa está apresentado no Apêndice 2.

A coleta de dados da pesquisa foi realizada nos dias 05 e 06/12/2023 pela empresa Perplan. A pesquisa foi inicialmente planejada para ser realizada com a parada total dos veículos, contando com o apoio da Polícia Rodoviária Federal (PRF) em uma área lateral e segura. No entanto, no primeiro dia não se contou com o apoio da PRF, assim, foi conduzida a coleta de dados nas cabines manuais da praça de pedágio, acompanhando os veículos enquanto aguardavam na fila do pedágio. Devido à essa metodologia, não foi possível realizar o questionário completo tendo em vista o tempo necessário para completar o questionário. Assim, algumas perguntas não essenciais foram excluídas no momento de aplicação da pesquisa, sendo elas:

- Marca e modelo do veículo
- Número de passageiros
- Frequência de viagem (para veículos pesados)
- Proprietário do veículo
- Financiador e isenção do pedágio
- Renda familiar
- Carga em container (para veículos pesados)
- Quem escolheu a rota (para veículos pesados)

No segundo dia de coleta, a equipe de pesquisa conseguiu o apoio da PRF para realizar a pesquisa nas cabines AVI (*Automatic Vehicle Identification*). A pesquisa foi aplicada somente na faixa AVI mais à direita das cabines de pedágio, visto que a PRF não permite a aplicação da pesquisa na faixa da esquerda por questões de segurança. A faixa AVI da direita permite que os veículos acessem o município de Niterói pelo Centro, enquanto a faixa da esquerda dá acesso à continuação da BR-101 em direção à São Gonçalo ou a Alameda São Boaventura e a RJ-104.

Figura 24 – Praça de Pedágio Ecovias Ponte

6.3.2. DADOS OBTIDOS

Durante a pesquisa de campo realizada nos dias 05 e 06 de dezembro de 2023, com o objetivo de coletar dados sobre o tráfego de veículos, foram obtidas 1.751 respostas. Durante a coleta de dados, os veículos foram classificados em Leves e Pesados. No processamento dos dados, a base de dados foi detalhada para separar os veículos pesados em duas categorias: veículos pesados com 2 eixos e veículos pesados com mais de 2 eixos. Essa segmentação permite uma análise mais precisa do comportamento e impacto dos diferentes tipos de veículos no tráfego, fornecendo informações essenciais para o planejamento e a gestão do transporte público e da infraestrutura viária.

A Figura 25 apresenta a distribuição percentual das classes de veículos observadas nas pesquisas realizadas. Dos 1.751 veículos pesquisados, 1.367 (78%) foram veículos leves, indicando que a grande maioria do tráfego é composta por esse tipo de veículo. Veículos pesados com 2 eixos representaram 287 (16%) do total, enquanto os veículos pesados com mais de 2 eixos somaram 97 (6%). Esses resultados mostram que, apesar da presença significativa de veículos pesados, os veículos leves predominam na área pesquisada.

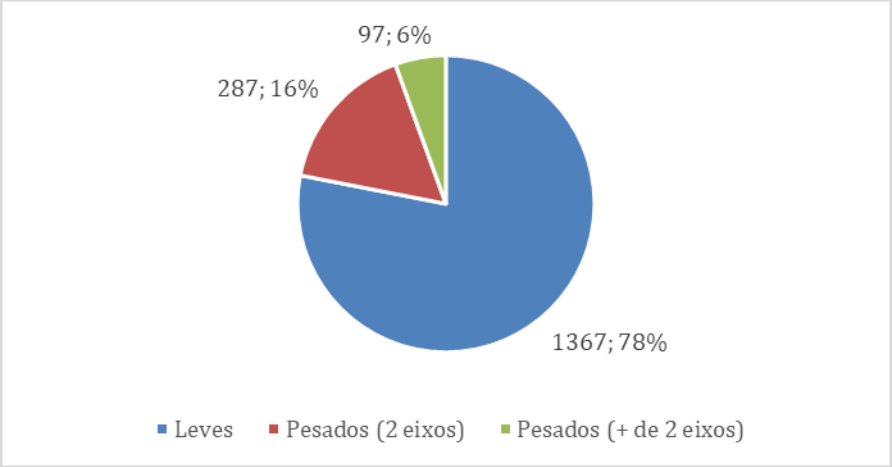

Figura 25 – Número de entrevistados por categoria de veículo

6.3.3. FATORES DE EXPANSÃO

Para o cálculo dos Fatores de Expansão (FE) foi considerado o volume médio diário de tráfego entre segunda e quinta-feira nos meses de outubro e novembro de 2022, e de março a agosto de 2023, utilizando o último ano completo de dados disponíveis das cabines de pedágio manuais e do sistema AVI. Inicialmente, foi calculada a média diária por tipo de dia da semana (segunda a quinta-feira) para cada mês considerado. Os meses de setembro, dezembro, janeiro e fevereiro foram excluídos da média final por serem considerados atípicos devido a variações sazonais que poderiam distorcer os resultados.

Com o volume médio diário estabelecido, a média foi recalculada, desconsiderando os meses mencionados. Essa média ajustada forneceu um valor mais representativo do tráfego típico durante o ano. Em seguida, o volume médio diário foi dividido pelo número de entrevistas realizadas em cada classe de veículo, resultando nos Fatores de Expansão (FE). A Tabela 4 mostra os resultados do volume médio diário de veículos leves por dia da semana, excluindo meses considerados atípicos (setembro, dezembro, janeiro e fevereiro).

Tabela 4 – Volume médio diário por dia da semana para veículos leves

Mês	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Média
setembro/2022	65.218	65.831	61.359	66.782	
outubro/2022	63.063	65.304	62.267	68.342	
novembro/2022	57.329	59.997	60.157	63.141	
dezembro/2022	66.038	67.293	70.321	73.843	
janeiro/2023	63.567	64.648	66.870	70.554	
fevereiro/2023	59.737	56.351	60.520	67.999	
março/2023	62.027	61.732	63.650	65.336	
abril/2023	62.683	64.285	66.040	70.710	
maio/2023	59.571	62.446	62.377	65.184	
junho/2023	62.066	63.509	65.135	66.009	
julho/2023	63.425	64.100	64.364	67.724	
agosto/2023	60.881	62.274	62.431	64.764	
Média	61.381	62.956	63.302	66.401	63.510

Para os meses válidos na análise (outubro e novembro de 2022, março, abril, maio, junho e julho e agosto de 2023), observa-se variações distintas nos volumes médios diários ao longo dos diferentes dias da semana. Em abril de 2023, os volumes médios variaram de 62.683 a 70.710, indicando uma tendência de aumento ao longo da semana. Em março de 2023, os volumes mostraram uma menor variabilidade, com valores entre 62.027 e 65.336. Maio de 2023 apresentou volumes médios diários ligeiramente menores, variando de 59.571 a 65.184. Já em julho de 2023, observou-se um aumento nos volumes médios, com valores entre 63.425 e 67.724. A média dos volumes médios diários, excluindo os meses atípicos, ficou entre 61.381 e 66.401, com uma média geral de 63.510 veículos leves por dia.

A Tabela 5 apresenta o volume médio diário de caminhões com 2 eixos por dia da semana, considerando os mesmos critérios anteriores. Em novembro de 2022, os volumes médios diários variaram de 4.002 e 4.460, indicando uma ligeira flutuação ao longo da semana. No mês de março de 2023, observamos uma maior estabilidade nos volumes, com valores entre 4.395 e 4.584, sugerindo um comportamento de tráfego mais uniforme durante esses dias. Maio de 2023 apresentou o menor volume médio, de 3.693 na Segunda, porém com um valor de 4.617 na quinta, com uma notável variabilidade, especialmente no início da semana. Em julho de 2023, os volumes médios mostraram-se novamente mais estáveis, com valores entre 4.366 e 4.579. A média dos volumes médios diários, excluindo os meses atípicos, ficou entre 4.209 e 4.548, com uma média geral de 4.394 caminhões com 2 eixos por dia.

Tabela 5 – Volume médio diário por dia da semana para caminhões 2 eixos

Mês	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Média
setembro/2022	4.526	4.552	3.840	4.606	
outubro/2022	4.172	4.698	3.923	4.833	
novembro/2022	4.002	3.877	3.895	4.460	
dezembro/2022	3.643	4.087	4.290	4.538	
janeiro/2023	4.182	4.359	4.403	4.461	
fevereiro/2023	3.696	3.651	4.182	4.653	
março/2023	4.395	4.515	4.534	4.584	
abril/2023	4.346	4.552	4.633	4.656	
maio/2023	3.693	4.405	4.453	4.617	
junho/2023	4.364	4.500	4.556	4.046	
julho/2023	4.366	4.482	4.466	4.579	
agosto/2023	4.332	4.524	4.540	4.607	
Média	4.209	4.444	4.375	4.548	4.394

A Tabela 6 apresenta o volume médio diário de caminhões com mais de 2 eixos por dia da semana, baseado nos mesmos critérios. Em novembro de 2022, os volumes médios diários variaram de 1.123 e 1.303, mostrando uma ligeira oscilação ao longo da semana. No mês de março de 2023, houve um aumento significativo nos volumes médios, variando de 1.171 e 1.415, com uma tendência de crescimento contínuo ao longo da semana. Maio de 2023 apresentou volumes médios mais baixos, variando de 1.001 e 1.285, destacando uma variabilidade significativa, especialmente no início e no fim da semana. Em julho de 2023, os volumes médios diários ficaram entre 1.160 e 1.354, mostrando novamente uma estabilidade

relativa com um aumento gradual ao longo da semana. A média dos volumes médios diários, excluindo os meses atípicos, ficou entre 1.100 e 1.306, com uma média geral de 1.241 caminhões com mais de 2 eixos por dia.

Tabela 6 – Volume médio diário por dia da semana para caminhões com mais de 2 eixos

Mês	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Média
setembro/2022	1.186	1.258	1.211	1.306	
outubro/2022	1.007	1.307	1.251	1.306	
novembro/2022	1.123	1.148	1.155	1.303	
dezembro/2022	1.084	1.302	1.217	1.277	
janeiro/2023	1.100	1.229	1.294	1.304	
fevereiro/2023	1.009	968	1.271	1.322	
março/2023	1.171	1.339	1.415	1.410	
abril/2023	1.129	1.289	1.347	1.255	
maio/2023	1.001	1.242	1.263	1.285	
junho/2023	1.099	1.207	1.274	1.216	
julho/2023	1.160	1.271	1.354	1.345	
agosto/2023	1.110	1.274	1.321	1.334	
Média	1.100	1.260	1.297	1.306	1.241

Por fim, a Tabela 7 apresenta os resultados dos Fatores de Expansão (FE) para veículos leves e caminhões com mais de 2 eixos, calculados com base nos volumes médios diários obtidos e no número de entrevistas realizadas para cada categoria de veículo.

Para veículos leves, o volume médio diário foi de 380.221, com um total de 1.367 entrevistas realizadas. O cálculo do FE para veículos leves resultou em um valor de 46,46. Sendo assim, considerou-se que cada entrevista representa aproximadamente 47 veículos leves no volume total de tráfego, ajustando os dados coletados na pesquisa para refletir a realidade do tráfego diário. Para caminhões com 2 eixos, com um volume médio diário de 4.394 e 287 entrevistas realizadas, o FE foi calculado em 15,31, significando que cada entrevista representa aproximadamente 15 caminhões com 2 eixos no tráfego total.

Já para caminhões com mais de 2 eixos, o volume médio diário foi de 1.241, com um total de 97 entrevistas realizadas. O cálculo do FE para essa categoria de veículos resultou em um valor de 12,79. Esse valor indica que cada entrevista representa aproximadamente 13 caminhões com mais de 2 eixos no volume total de tráfego.

Tabela 7 – Fatores de expansão

Classificação	Entrevistas	Volume médio	FE
Leves	1.367	63.510	46,46
Caminhões com 2 eixos	287	4.394	15,31
Caminhões com mais de 2 eixos	97	1.241	12,79

6.4. PESQUISA DE PREFERÊNCIA DECLARADA

A pesquisa de preferência declarada foi realizada para analisar a disposição dos usuários que atravessam a ponte no horário de pico a trocar o seu horário de viagem, de forma a atravessarem a ponte fora do horário de pico. O pico na ponte durante a manhã é no sentido Niterói – Rio de Janeiro, no período entre as 6:00 e as 10:00. Na tarde é no sentido Rio de Janeiro – Niterói, entre as 16:00 e as 19:00 (valores obtidos a partir da análise do tráfego diário e informações da concessionária). Assim, a pesquisa foca em usuários que usualmente atravessam a ponte nestes horários e busca analisar se estariam dispostos a realizar os seus deslocamentos antes do início do pico ou após o fim do horário do pico.

O instrumento de pesquisa está baseado em técnicas de preferência declarada (PD). Estas técnicas consistem em um conjunto de metodologias fundamentadas em juízos de valor declarados pelos indivíduos. Seu princípio básico é apresentar ao entrevistado um conjunto de situações hipotéticas. Em cada situação apresentada, o entrevistado escolhe uma alternativa (caracterizada por diversos atributos), dentre o conjunto de alternativas oferecido. Esta escolha feita pelo indivíduo representa a sua preferência pelos atributos de uma alternativa sobre as outras. Assim, o objetivo das pesquisas PD é obter, dos usuários da rodovia, suas preferências em relação às alternativas apresentadas.

A elaboração do experimento PD requer três estágios: (i) especificação do modelo; (ii) projeto experimental; e (iii) desenho do questionário. Os itens a seguir apresentam os passos adotados para cada um desses estágios.

6.4.1. ESPECIFICAÇÃO DO MODELO

O primeiro estágio consistiu na determinação completa da especificação do modelo econométrico com os parâmetros a estimar. Cada experimento PD é criado para estimar um modelo específico. Assim, este estágio requer o entendimento do problema de escolha a ser analisado, a identificação das alternativas, determinação dos atributos relacionados com cada alternativa, e dos níveis dos atributos que foram utilizados no estudo, e a determinação do tipo de modelo que foi estimado, definindo sua estrutura funcional.

Assim, foi analisado o problema de escolha de horário determinando três alternativas relativas ao horário para atravessar a ponte, aplicada a aqueles usuários que atravessam a ponte no horário de pico da manhã e/ou tarde. As alternativas consideradas foram: (i) atravessar a ponte no horário habitual (Habitual), (ii) atravessar a ponte antes do início do pico (Cedo) e (iii) atravessar a ponte após fim do horário de pico (Tarde).

A seleção dos atributos que influenciam na decisão de escolha de um sistema de cobrança foi baseada numa revisão bibliográfica de artigos nacionais e internacionais relevantes na área assim como de análise da situação específica da ponte (Bhat e Steed, 2002; Jong *et al.*, 2003; Hess *et al.*, 2007; Arellana *et al.*, 2012a; 2012b). A modelagem da escolha do início da viagem tem uma linha específica de pesquisa, sendo a formulação mais conhecida e na qual se baseiam a maioria dos estudos realizados o *schedulling model* (SM), proposto por Small (1982).

A função proposta por Small (1982) inclui o que este denominou demora horária (*schedule delay* (SDE) em inglês) referindo-se a diferença entre a hora de saída (ou chegada) em um determinado período e a hora de saída (ou chegada) preferida. Assim, foi proposta a inclusão dos atributos SDE nos modelos estimados, que corresponde à demora horária por sair (ou chegar) cedo e SDL é a demora horaria por sair (ou chegar) tarde. Segundo Small (1982), chegar cedo (SDE < O) sugere perder tempo ou utilizá-lo em atividades menos produtivas do que as preferidas para aquele horário, o que diminui a utilidade de um indivíduo. Por outro lado, chegar atrasado (SDL > O) tem, para a maioria dos trabalhadores, repercussões mais graves do que chegar cedo. Essas demoras horárias foram transformadas em horários de início e/ou fim da viagem na pesquisa apresentada para a ponte Rio-Niterói, a qual é uma abordagem usual na literatura. Por exemplo, para um usuário que habitualmente entra na ponte às 7:00 no sentido Rio de Janeiro (considerada esta como sua hora preferida), apresentar a alternativa de passar pela ponte às 5:50 implicaria numa penalidade por sair cedo (SDE) de 70 minutos. Entretanto, a alternativa de passar pela ponte às 10:10 implicaria numa penalidade por chegar tarde (SDL) de 190 minutos. Assim, ao invés de apresentar aos entrevistados questões em termos de demora (penalidades horárias) que seria um conceito de mais difícil interpretação, foram apresentadas questões sobre o horário que atravessariam a ponte. Essa abordagem e sua modelagem serão descritas mais detalhadamente em seção posterior, na estimação dos modelos a partir dos dados coletados.

Além das demoras horárias, a escolha do horário para atravessar a ponte é uma decisão afetada por uma série de elementos, sendo que o custo do sistema, o tempo para atravessar a ponte e a variabilidade desse tempo se mostram essenciais no processo decisório. Assim, os atributos selecionados para o projeto do experimento foram *Horário que entra na pon*te (que representaria a demora horária), *Tempo para atravessar a ponte*, *Variabilidade do tempo de atravessar a ponte* e *Tarifa pedágio* (pago em ambos os sentidos, então o valor corresponde a unicamente um sentido do deslocamento). É importante ressaltar que a variabilidade do tempo foi apresentada como o maior tempo possível dessa viagem, durante algum dia da semana, nesse horário seguindo a abordagem utilizada por Arellana (2016).

Os níveis dos atributos utilizados para gerar o projeto experimental são apresentados a seguir (Tabela 6 e Tabela 7).

Tabela 8 – Atributos e níveis - sentido Niterói-Rio de Janeiro

Variáveis	Habitual			Cedo			Tarde		
Horário que entra na ponte (h)	Habitual (7:00 a 9:00)			05:30		05:50	10:10		10:30
***Tempo para atravessar a ponte* (min)**	Habitual (22 min)			13		16	13		15
Variabilidade do tempo de atravessar a ponte (min)	6	10	15	3		6	3		6
***Tarifa pedágio* (R$)**	3.1	4	5	0.3	1.2	2	0.3	1.2	2

Tabela 9 – Atributos e níveis - sentido Rio de Janeiro-Niterói

Variáveis	Habitual			Cedo			Tarde		
Horário que entra na ponte (h)	Habitual (16:00 a 19:00)			15:30		15:50	19:10		19:40
***Tempo para atravessar a ponte* (min)**	Habitual (27 min)			13		17	13		17
Variabilidade do tempo de atravessar a ponte (min)	10	14	20	5		10	5		10
***Tarifa pedágio* (R$)**	3.1	4	5	0.3	1.2	2	0.3	1.2	2

O tempo para atravessar a ponte foi baseado em dados da concessionária entre 01/01/2023 e 31/12/2023, analisando a média do tempo que os usuários demoram para atravessar a ponte durante o pico da manhã e da tarde. Para personalizar o experimento, foi pensado inicialmente em perguntar ao usuário o horário e tempo habitual de travessia da ponte, e elaborar um experimento *pivot* em relação ao horário informado. Esta opção foi modificada, devido às dificuldades e custos na coleta dos dados que esse formato de experimento traria, pois seria necessário o desenvolvimento de um aplicativo específico para a coleta de dados. Assim foi elaborado um projeto experimental usando os valores médios de tempo para atravessar a ponte, a partir dos dados mencionados anteriormente (01/01/2023 e 31/12/2023). Foram consideradas variações do tempo de viagem para atravessar a ponte de 13, 15 e 16 minutos. O tempo sem congestionamento é de 13 minutos, e 15 e 16 minutos correspondem a tempos de percurso com certo grau de congestionamento.

Além do tempo de viagem foi considerada a variabilidade do tempo de viagem, obtida também a partir da análise dos dados da ponte do ano 2023. Acidentes e ocorrências na ponte e/ou os acessos afetam diretamente o tempo de viagem, fazendo que o tempo de atravessar a ponte varie. A variabilidade do tempo de viagem foi considerada como 6, 10 e 15 minutos para a alternativa Habitual, que representa variações dentro dos valores existentes e, alguns dias e horários. Para as alternativas de viajar fora do pico (Cedo ou Tarde) foi considerada uma variabilidade menor.

O custo do sistema foi representado pelo valor pago no pedágio. Atualmente o pedágio é pago unicamente no sentido Rio de Janeiro-Niterói (valor R$ 6,20). No contexto da pesquisa PD, a qual envolve a apresentação de cenários hipotéticos, foi considerado um cenário onde pórticos com sistema *Multi-lane Free Flow* estariam operando, e o pedágio seria cobrado em ambos os sentidos da viagem, porém com um valor menor ao valor atual. Foram estabelecidas variações no valor do pedágio, tanto para a alternativa Habitual quando Cedo ou Tarde. Para a alternativa Habitual foi considerada além do valor atual, aumentos de 30% e 60% do valor da tarifa por sentido, resultando em valores de R$3,10, R$4,00 e R$5,00. Para as alternativas Cedo e Tarde foram considerados descontos de 30%, 60% e 90% a partir do valor atual por sentido. Essas variações foram utilizadas para possibilitar a análise de eventuais mudanças comportamentais dos usuários frente a variações nos valores dessas características. Os níveis selecionados permitem a análise da não linearidade dos atributos e representar de forma mais adequada o comportamento de escolha. O projeto experimental requer a definição do modelo econométrico a ser usado. O modelo utilizado correspondeu a um modelo logit multinomial (MNL), utilizando funções de utilidade lineares nos parâmetros.

6.4.2. PROJETO EXPERIMENTAL

A partir das informações identificadas no primeiro estágio, foi elaborado o projeto experimental. Foram definidas 6 situações de escolha para o sentido Niterói-Rio de Janeiro e outras 6 situações de escolha para o sentido Rio de Janeiro-Niterói. Em total, cada usuário da ponte responde a 12 situações de escolha (isto é, cenários diferentes). Essa quantidade foi definida seguindo os seguintes critérios: tamanho da amostra, natureza da escolha estudada, balance entre os níveis dos atributos, e graus de liberdade (número de situações de escolha não deve ser inferior aos graus de liberdade do experimento).

O projeto experimental foi elaborado utilizando desenhos eficientes, definidos como aqueles que resultam na estimação de modelos com parâmetros de erros padrão baixos, utilizando o *software* N-gene (Choice Metrics, 2013). Os desenhos eficientes surgiram a partir do ano 2000 como alternativa aos desenhos fatoriais ortogonais utilizados até então. Os desenhos ortogonais utilizam técnicas baseadas em princípios que se aplicam a modelos lineares, mas que não são relevantes para modelos de escolha (por exemplo, ortogonalidade), levando a resultados ineficientes. Os desenhos eficientes são mais apropriados para este tipo de estudo, pois permitem trabalhar com amostras menores e obter vantagens com este tipo de desenhos. Entretanto, desenhos eficientes requerem informações que geralmente não estão disponíveis inicialmente, como a estrutura das funções de utilidade e os valores dos parâmetros do modelo a estimar. Portanto, foi realizado um levantamento bibliográfico dos valores dos parâmetros a estimar, prática atual do planejamento deste tipo de desenhos.

Na geração do desenho foi adotada uma aproximação Bayesiana dos parâmetros ao invés de assumi-los fixos, considerando que eles seguem uma distribuição normal. Essa técnica, embora requeira maior esforço de estimação, permite incluir a incerteza em relação aos valores dos parâmetros iniciais, incerteza resultante dos valores serem provenientes de estudos realizados em outros contextos. A distribuição normal foi considerada para levar em consideração a incerteza associada à validez dos parâmetros iniciais utilizados. Os valores iniciais adotados são os provenientes de estudos reportados na revisão bibliográfica (Arellana *et al.*, 2012c; Castro, 2019). Os valores são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores iniciais dos parâmetros

Atributos		Valor inicial do parâmetro
Horário que entra na ponte (horas) **(Representado no projeto experimental como demoraras horárias-*SDE* e *SDL*)**	*SDE: Penalidade por sair cedo*	N(-0.013, 0.01)
	SDL: Penalidade por sair tarde	N(-0.016, 0.01)
Tempo para atravessar a ponte (min)		N(-0.008, 0.001)
Variabilidade do tempo de atravessar a ponte (min)		N(-0.0767, 0.01)
Tarifa pedágio (R$)		N(-0.0016, 0.001)

*N(a,b) se refere a uma distribuição normal com média a e desvio-padrão b.

A aproximação Bayesiana considera uma distribuição para os valores de cada parâmetro, gerando através de números quase aleatórios (foi utilizada a sequência Halton) diferentes desenhos e calculando o valor médio da eficiência de todos os desenhos. Foram utilizadas 500 extrações de cada parâmetro e avaliada a eficiência de cada desenho.

O indicador de ineficiência adotado, utilizado habitualmente em desenhos eficientes, é o D_error, calculado como o determinante da matriz Ω_1, que é a matriz de variância e covariância para apenas um indivíduo (Rose e Bliemer, 2009):

$$\mathbf{D_error = det(\Omega_1)^{1/L}} \qquad \textit{Equação 1}$$

Para o caso de distribuições de probabilidades para as aproximações dos parâmetros, como a aproximação bayesiana adotada neste estudo, tem-se o Bayesian D_error (Db_error) dado por:

$$\mathbf{D_b_error = \int_{\beta} det(\Omega_1)^{1/L}\ f(\beta)\ d\beta} \qquad \textit{Equação 2}$$

Um desenho D-eficiente busca minimizar este valor, e espera produzir modelos com baixos erros padrão para um tamanho de amostra dado. Assim, estimar modelos com o nível de precisão desejado utilizando uma amostra menor que com desenhos ortogonais. O valor de D_b_error (mediana) obtido foi de 0.33. O desenho final é apresentado nas tabelas a seguir (Tabela 9 e Tabela 10).

Tabela 11 – Desenho PD Niterói-Rio de Janeiro

			Habitual			**Cedo**			**Tarde**		
Situação de escolha	Tarifa Pedágio	Tempo	Variabilidade	Tarifa Pedágio	Tempo	Variabilidade	Horário (SDE:min)	Tarifa Pedágio	Tempo	Variabilidade	Horário (SDL:min)
1	3.1	22	15	2	13	3	05:30 (120)	2	15	3	10:10 (160)
2	5	22	15	0.3	16	3	05:50 (90)	0.3	13	3	10:30 (180)
3	4	22	6	1.2	16	6	05:50 (90)	1.2	15	6	10:10 (160)
4	3.1	22	10	2	16	6	05:50 (90)	2	13	3	10:30 (180)
5	5	22	10	0.3	13	3	05:30 (120)	0.3	15	6	10:10 (160)
6	4	22	6	1.2	13	6	05:30 (120)	1.2	13	6	10:30 (180)

Tabela 12 – Desenho PD Rio de Janeiro-Niterói

	Habitual			Cedo				Tarde			
Situação de escolha	Tarifa Pedágio	Tempo	Variabilidade	Tarifa Pedágio	Tempo	Variabilidade	Horário (SDE:min)	Tarifa Pedágio	Tempo	Variabilidade	Horário (SDL:min)
1	3.1	27	20	2	13	5	15:30 (120)	2	17	5	19:10 (100)
2	5	27	20	0.3	17	5	15:50 (100)	0.3	13	5	19:30 (130)
3	4	27	10	1.2	17	10	15:50 (100)	1.2	17	10	19:10 (100)
4	3.1	27	14	2	17	10	15:50 (100)	2	13	5	19:30 (130)
5	5	27	14	0.3	13	5	15:30 (120)	0.3	17	10	19:10 (100)
6	4	27	10	1.2	13	10	15:30 (120)	1.2	13	10	19:30 (130)

6.4.3. QUESTIONÁRIO DA PD

A partir do projeto experimental foi construído o questionário da pesquisa PD. Este questionário foi estruturado em duas partes: (i) Preferência declarada: apresentação da pesquisa PD (6 situações de escolha no sentido Rio de Janeiro e 6 no sentido Niterói) e (ii) Perguntas complementares (nome, idade, frequência de uso da rodovia, etc.). As perguntais complementares trataram a caracterização dos usuários, abordando questões relativas à idade, gênero, uso do sistema de cobrança automática, origem e destino da viagem que está sendo realizada, frequência de uso da rodovia.

A seguir, se apresenta um exemplo da pesquisa PD a ser aplicada, a contextualização (Figura 26) e situações de escolha 1 (cenário 1 com entrada na ponte entre 06h e 07h, sentido Rio de Janeiro) (Figura 27) e situação de escolha 7 (cenário 7 com entrada na ponte entre 16h e 17h, sentido Niterói) (Figura 28). A pesquisa completa para ambos os sentidos está apresentada no Apêndice 1.

Imagine um novo cenário, onde pórticos com sistema multilane free flow estariam operando, e o pedágio seria cobrado em ambos os sentidos da viagem, porém com um valor menor ao valor atual.
Suponha que que você tem a opção de atravessar a ponte em três momentos diferentes: no horário habitual, mais cedo ou mais tarde, assim como mostraremos em cada um dos 6 seguintes cenários. Solicitamos que você indique sua preferência para cada um dos cenários apresentados. Em relação a toda aquela informação omitida e que considera relevante para a sua decisão,

Habitual	**Cedo**	**Tarde**

Figura 26 – Contextualização da pesquisa PD

Cenário 1 (C1)

Horário ENTRA na ponte	**Habitual** **6:30**	**Cedo** **5:30**	**Tarde** **10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	16	18
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Figura 27 – Situação de escolha 1

Cenário 7 (C7)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**16:30**	**15:30**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	46	18	22
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Figura 28 – Situação de escolha 2

Inicialmente, a pesquisa pretendia perguntar aos usuários sobre o horário e tempo habitual de travessia na ponte, personalizando o questionário para cada entrevistado. No entanto, essa abordagem apresentava dificuldades e altos custos de coleta de dados. Para contornar esses desafios, foram elaborados sete questionários distintos, baseados nos seguintes horários de entrevistas:

(i) 6h-7h (travessia às 6h30, 19 minutos)

(ii) 7h-8h (travessia às 7h30, 24 minutos)

(iii) 8h-9h (travessia às 8h30, 24 minutos)

(iv) 9h-10h (travessia às 9h30, 19 minutos)

(v) 16h-17h (travessia às 16h30, 24 minutos)

(vi) 17h-18h (travessia às 17h30, 29 minutos)

(vii) 18h-19h (travessia às 18h30, 28 minutos)

Esses valores foram estimados a partir de dados fornecidos pela concessionária. A pesquisa completa para ambos os sentidos está apresentada no Apêndice 2.

6.4.4. MODELAGEM

Modelos de escolha discreta foram estimados para determinar a escolha do horário de atravessar a ponte. Foram consideradas três alternativas relativas ao horário para atravessar a ponte, aplicada a aqueles usuários que atravessam a ponte no horário de pico da manhã e/ou tarde. As alternativas consideradas foram: (i) atravessar a ponte no horário habitual (Habitual),

(ii) atravessar a ponte antes do início do pico (Cedo) e (iii) atravessar a ponte após fim do horário de pico (Tarde). O experimento de escolha utilizado na coleta de dados de preferência declarada correspondeu a uma série de escolhas entre estas três alternativas de horário apresentadas simultaneamente (*choice*). As situações de escolha consistiam em comparações entre as três alternativas, cada uma apresentada através de valores nos atributos considerados no experimento na seção anterior: foram *Horário que entra na ponte* (que representaria a demora horária), *Tempo para atravessar a ponte*, *Variabilidade do tempo de atravessar a ponte* e *Tarifa pedágio* (pago em ambos os sentidos, então o valor corresponde a unicamente um sentido do deslocamento).

A modelagem da escolha do início da viagem tem uma linha específica de pesquisa, sendo a formulação mais conhecida e no que se baseiam a maioria dos estudos realizados o *schedulling model* (SM), proposto por Small (1982). A função proposta por Small (1982) inclui o que este denominou demora horária (*schedule delay* em inglês) referindo-se a diferença entre a hora de saída (ou chegada) em um determinado período e a hora de saída (ou chegada) preferida. Assim, propus a inclusão nos modelos estimados dos atributos SDE, que corresponde a demora horaria por sair (ou chegar) cedo e SDL é a demora horaria por sair (ou chegar) tarde. Segundo Small (1982), chegar cedo (SDE <O) sugere perder tempo ou utilizá-lo em atividades menos produtivas do que as preferidas para aquele horário, o que diminui a utilidade de um indivíduo. Por outro lado, chegar atrasado (SDL >O) tem, para a maioria dos trabalhadores, repercussões mais graves do que chegar cedo. Essas demoras horárias foram transformadas em horários de início e/ou fim da viagem na pesquisa apresentada para a ponte Rio-Niterói, a qual é uma abordagem usual na literatura. Por exemplo, para um usuário que habitualmente entra na ponte às 7:00 hrs no sentido Rio de Janeiro (considerada esta como sua hora preferida), apresentar a alternativa de passar pela ponte às 5:50 implicaria numa penalidade por sair cedo (SDE) de 70 minutos. Entretanto, a alternativa de passar pela ponte às 10:10 hrs implicaria numa penalidade por chegar tarde (SDL) de 190 minutos. Assim, ao invés de apresentar aos entrevistados como demoras horárias que seria um conceito de mais difícil interpretação, se apresentaram como horário que atravessaria a ponte.

No presente estudo, foram estimados modelos logit multinomial(modelos MNL), prática usual na modelagem de demanda de transporte (Ben Akiva e Lerman, 1995). A estimação dos modelos foi realizada utilizando o software Apollo software (Hess e Palma, 2019).

6.4.4.1. FORMULAÇÕES ECONOMÉTRICAS

Os modelos de escolha discreta utilizados na modelagem da demanda de transportes baseiam-se na teoria da utilidade aleatória (McFadden, 1974). Esta teoria se fundamenta no princípio da maximização da utilidade, onde é postulado que o indivíduo q associa a cada alternativa i uma utilidade do tipo estocástica U_{iq}, escolhendo aquela alternativa que maximiza sua utilidade. A incapacidade de apreciar, por parte do analista, todos os atributos e variações de preferências que determinam o comportamento dos indivíduos, bem como erros de medição, torna necessário considerar que a utilidade é uma variável aleatória (Ben Akiva e Lerman, 1995). A utilidade aleatória de uma alternativa é expressa como a soma dos componentes observáveis

ou sistemáticos (denotados como V_{iq}) e componentes não observáveis (denotados como ε_{iq}) conforme Equação 3 (Domencich e McFadden, 1972).

$$\boldsymbol{U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq}} \qquad \textit{Equação 3}$$

O componente aleatório é necessário para capturar deficiências na especificação de atributos não observados, erros de medição, diferenças entre indivíduos, percepções incorretas de atributos e aleatoriedade inerente à natureza humana (Manski, 1977).

De acordo com a teoria da maximização da utilidade, o indivíduo *q* escolhe a alternativa *i*, sempre que a utilidade desta alternativa seja maior que a associada a quaisquer das restantes *j*, ambas pertencentes ao conjunto de alternativas disponíveis *A(q)* para o indivíduo *q* Equação 4):

$$U_{iq} \geq U_{jq}, \forall j \in A(q), \quad i \neq j \qquad \textit{Equação 4}$$

isto é,

$$V_{iq} + \varepsilon_{iq} \geq V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad \Rightarrow \quad V_{iq} - V_{jq} \geq \varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq} \qquad \textit{Equação 5}$$

Considerando que o analista não conhece $(\varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq})$, não pode ter certeza se a expressão (Equação 5) é satisfeita ou não e, portanto, só pode postular a probabilidade de ocorrência.

Assim, a probabilidade de escolher a alternativa i é dada por (Equação 6):

$$P_{iq} = Prob\left\{\varepsilon_{jq} \leq \varepsilon_{iq} + (V_{iq} - V_{jq}), \forall j \in A(q)\right\} \qquad \textit{Equação 6}$$

Os resíduos são variáveis aleatórias com média zero. Dependendo da distribuição estatística que seja considerada para os resíduos, foi possível determinar distintos modelos probabilísticos.

Frequentemente, a componente determinística da utilidade é definida como uma função linear nos atributos e parâmetros (Equação 7),

$$V_{iq} = \sum_{k=1}^{K} \beta_{ik} x_{ikq} \qquad \textit{Equação 7}$$

sendo x_{ikq} o valor que adota o atributo *k*-ésimo para o indivíduo *q e* β_{ik} o parâmetro ligado a este atributo.

A especificação da função utilidade do modelo proposto por Small (1982) pode então ser escrita como (Equação 8):

$$V_i = \beta_{TT} \cdot TT_i + \beta_{SDE} \cdot SDE_i + \beta_{SDL} \cdot SDL_i + \delta_L \cdot d_L \qquad \textit{Equação 8}$$

onde i refere-se à alternativa (período de início da viagem, no estudo atual seria o horário habitual, mais cedo ou mais tarde) e V_i à sua utilidade representativa; β_j são os parâmetros a serem estimados para cada atributo j e TT_i indica o tempo de viagem do indivíduo ao sair no período i. De acordo com a formulação apresentada, assume-se que todos os coeficientes têm sinal negativo devido à desutilidade que ocorre ao chegar ao destino num horário diferente do desejado. Em relação aos outros elementos, SDE_i representa o atraso antecipado (chegada antes do horário ideal); SDL_i o atraso tardio (chegada após o horário ideal), d_i é uma variável indicadora (*dummy*) para condições específicas da alternativa i (ex.: custos adicionais ou mudanças de modal) e δ_i é o coeficiente da variável *dummy*, indicando seu impacto na utilidade.

Na modelagem da escolha do horário no contexto do experimento, foi proposta a seguinte formulação genérica para a função de utilidade determinística:

$$V_i = ASC_I + \beta_{TT} \cdot TT_i + \beta_{SDE} \cdot SDE_i + \beta_{SDL} \cdot SDL_i + \beta_{Custo} \cdot Custo_i + \beta_{Var} \cdot VarT_i \qquad \textit{Equação 9}$$

onde o subscrito *i* refere-se às três alternativas do experimento, ASC representam as constantes associadas a cada alternativa, TT_i indica o tempo de viagem do indivíduo q ao atravessar o tempo no período indicado em i, $Custo_i$ o custo da viagem ao iniciar a viagem no período *i*. SDE_i e SDL_i referem-se aos atrasos caso o indivíduo chegue cedo ou atrasado e β_{Var} representa a incerteza associada à variabilidade do tempo de viagem, captada através da diferença entre o tempo de viagem 'normal' apresentado e aquele que ocorre "uma vez por semana". Especificar o modelo requer a especificação do V_{iq} e suposições sobre a distribuição conjunta da componente aleatória ε_{iq}. Diferentes hipóteses sobre a distribuição de probabilidade adotada para a componente aleatória ε_{iq} leva a diversos modelos de escolha discreta (Ortúzar e Willumsen, 2011).

O logit multinomial (multinomial logit - MNL) (McFadden, 1974) é um dos modelos mais simples de escolha discreta e o mais utilizado. Ele se baseia na hipótese que o termo aleatório εiq da função utilidade é identicamente e independentemente distribuído conforme uma distribuição de Gumbel (Valor Extremo tipo I). Este modelo é caracterizado pela simplicidade no seu processo de estimação, entretanto, impõe uma série de restrições (McFadden, 1973 e 1978; Train, 1986):

- Os coeficientes das variáveis (βik) são os mesmos para toda a população. Isto implica que as diferentes pessoas com as mesmas características atribuem o mesmo valor a cada uma das variáveis do modelo, embora possam variar entre alternativas;

- Verificam a propriedade da independência de alternativas irrelevantes (IIA). Esta propriedade implica que a razão entre as probabilidades de duas alternativas que fazem parte de um conjunto de escolha A_n é constante e independente da existência de alternativas no conjunto. Assim, o modelo MNL é apropriado para situações em que as alternativas apresentem esta característica. Caso contrário, ele poderá gerar resultados falsos, superestimando ou subestimando a probabilidade de escolha das alternativas, como ocorre com alternativas que têm correlações não observadas entre si. Quando o componente sistemático da utilidade é bem especificado, explicitando todas as variáveis explicativas do comportamento e o termo de erro é apenas ruído branco, a IIA é geralmente respeitada (Train, 2009).

6.4.4.2. ELASTICIDADES

Para comparar a importância das variáveis explicativas com diferentes escalas e conhecer os efeitos quantitativos de mudanças da política de transporte na demanda foi calculada a elasticidade direta de escolha do sistema de pagamento em relação às variáveis explicativas.

A elasticidade é definida como a mudança percentual na probabilidade de escolha de uma alternativa, pertencente ao conjunto de alternativas, a consequência de variações no valor dos atributos da mesma alternativa (Elasticidade direta). As elasticidades permitem comparar o impacto das variáveis explicativas e conhecer os efeitos de mudanças da política de transporte na demanda.

A elasticidade da probabilidade de escolha mede a sensibilidade da escolha dos indivíduos em relação a uma variável explicativa. Indica qual a mudança percentual na probabilidade de o indivíduo escolher uma alternativa em função de uma mudança marginal no valor da variável explicativa da função utilidade da mesma alternativa (Elasticidade direta) (Ortúzar e Willumsen, 2011). O cálculo de elasticidades utilizou as equações propostas por Ortúzar e Willumsen (2011) (Equação 10). Os valores foram calculados para cada indivíduo e logo agregados utilizando o método de enumeração amostral.

$$E_{Piq,\,Xikq} = \theta_{ik} \,.X_{ikq}\,(1\text{-}P_{iq}) \qquad \textit{Equação 10}$$

em que $E_{Piq,Xikq}$: é a elasticidade da probabilidade de escolha da alternativa A_i em relação a uma mudança marginal do atributo k da alternativa A_i para o indivíduo q; θ_{ik}: valor do coeficiente da variável X_i na opção de troca; X_{ikq}: valor da variável na alternativa i oferecida; e P_{iq} : probabilidade da alternativa i a ser escolhida.

6.4.4.3. APLICAÇÃO DO MODELO PARA PREVISÃO E SIMULAÇÃO DE DEMANDA

Os modelos obtidos são úteis para prever a variação da demanda em cenários alternativos, sendo utilizados na simulação de tráfego na ponte. Analisaram-se diversos cenários no simulador de tráfego VISSIM, incluindo situações em que a demanda permanecia inalterada (utilizando a demanda atual) e outras em que era ajustada com base nos modelos estimados. Esses cenários permitiram avaliar o impacto da intervenção estrutural que substitui o sistema atual de cobrança por um sistema de livre passagem.

Os modelos consideraram a antecipação do horário de saída em 15 e 30 minutos, com base nas alternativas de escolha de horário de viagem. Foram avaliadas inicialmente três alternativas: manter o horário atual, sair mais cedo ou sair mais tarde. No entanto, os resultados dos modelos estimados, apresentados na seção posterior, indicaram que os respondentes demonstraram maior disposição para antecipar suas viagens (sair mais cedo), enquanto poucos estavam dispostos a postergar (sair mais tarde). Assim, para maior precisão, analisaram-se cenários reduzidos a duas alternativas: manter o horário atual ou sair mais cedo.

Essa simplificação é possível devido às características dos modelos MNL, particularmente pela propriedade de Independência das Alternativas Irrelevantes (IIA), conforme descrito por Ben-Akiva e Lerman (1985). A aplicação do modelo foi feita utilizando os valores atuais dos atributos no horário de pico para cada respondente e considerando que cada pessoa anteciparia sua viagem em 15 minutos em relação ao horário usual declarado. Por exemplo, se um respondente indicou que cruzava a ponte às 9h, assumiu-se que, ao antecipar a viagem, ele a realizaria às 8h45.

Para cada respondente, calculou-se a probabilidade de escolha com base no modelo estimado para o horário ajustado. Em seguida, essas probabilidades foram agrupadas em intervalos de 15 minutos, considerando o horário ajustado como o novo horário de saída. Assim, no exemplo

citado, o horário original das 9h seria ajustado para 8h45, e esse novo horário seria incluído no respectivo intervalo.

Com base nesses cálculos, obteve-se o percentual de usuários que manteriam seus horários habituais e o percentual que anteciparia a viagem em cada intervalo de 15 minutos. Esse perfil de demanda, que detalha a proporção de usuários que permanecem no horário habitual e a que opta por sair mais cedo, permitiu a construção de uma nova curva de demanda para a ponte após a intervenção. Essa nova curva foi utilizada em alguns dos cenários de simulação, enquanto outros consideraram a manutenção da demanda atual, possibilitando a comparação do impacto da mudança no sistema de cobrança e na distribuição da demanda ao longo do tempo.

7. ETAPA 5: ESTUDOS E RELATÓRIOS

A presente seção, referente à Etapa 5, apresenta os resultados, estudos e relatórios elaborados a partir das coletas de dados realizadas na Etapa 4 apresentada anteriormente. Primeiramente é apresentado o *dashboard* elaborado a partir dos dados de demanda do pedágio e em seguida são apresentados os resultados das pesquisas de Origem e Destino e de Preferência Declarada. Por fim, é apresentado o desenvolvimento da simulação de tráfego.

7.1. DASHBOARD ANÁLISE DA DEMANDA

Para analisar visualmente os dados volumétricos da praça de pedágio da Ecovias Ponte no período entre junho de 2015 e agosto de 2023, foi elaborado um dashboard interativo que pode ser visualizado através do link. A interface permite a seleção do tipo de cabine (AVI ou Manual) e do mês/ano desejado, além de filtrar as informações por praça de pedágio e sentido (crescente ou decrescente). As informações estão divididas em várias seções visuais, cada uma focando em diferentes aspectos dos dados de pedágio.

Em um dos gráficos, é exibida a evolução do volume de praças por sentido ao longo do tempo, destacando um crescimento consistente. À direita, a proporção de veículos que utilizam o sistema AVI por mês/ano é mostrada, revelando uma leve tendência de aumento. A localização das praças de pedágio é mapeada visualmente para referência geográfica. Na parte inferior esquerda, a variação do VDM (Volume Diário Médio) por categoria de veículo é ilustrada com uma série temporal empilhada, mostrando a distribuição de diferentes categorias de veículos. Por fim, a variação volumétrica diária é dividida entre os sentidos crescente e decrescente, permitindo a análise das flutuações diárias de tráfego em cada direção.

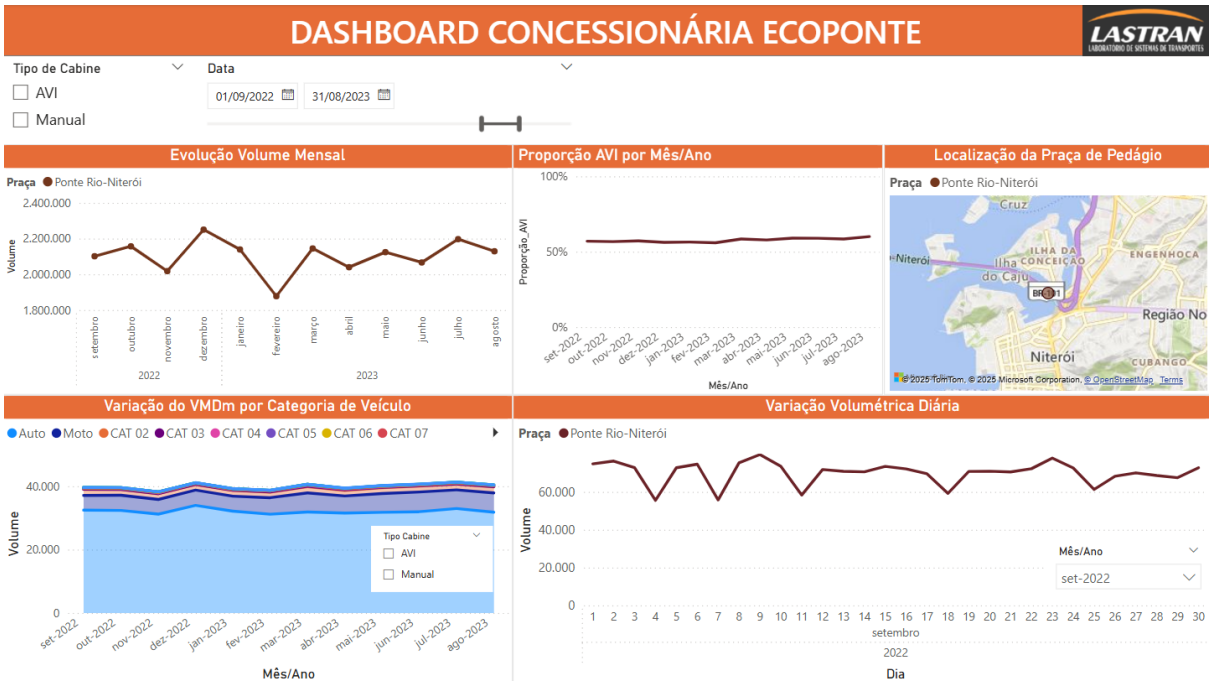

Figura 29 – Dashboard

7.2. RESULTADOS DA PESQUISA OD

Os resultados da pesquisa de origem e destino (OD) foram analisados por classe de veículo e levando em consideração a divisão de zonas de tráfego. A divisão das zonas foi estruturada de forma a captar as variações territoriais e específicas de cada área. No caso dos municípios do Rio de Janeiro e Niterói, a divisão foi feita com base na delimitação territorial dos bairros, pois os entrevistados informaram o bairro de origem ou destino de suas viagens. Assim, cada bairro foi considerado uma zona individual. Para os municípios da região metropolitana do RJ, cada município foi tratado como uma zona distinta, permitindo uma análise detalhada e regionalizada. Para os demais municípios do estado do RJ, a divisão foi simplificada em duas grandes zonas: Leste e Oeste, com a linha de separação passando entre os municípios de Petrópolis e Teresópolis. Para as viagens interestaduais, cada estado foi considerado uma zona independente.

Desse modo, a Figura 30 ilustra as zonas de origem e destino (OD) utilizadas na análise de tráfego. No município do Rio de Janeiro e em Niterói, onde a divisão das zonas foi baseada nos bairros, foram totalizadas 212 zonas distintas. Essa abordagem reflete a granularidade necessária para capturar as especificidades locais reportadas pelos entrevistados, permitindo uma visão detalhada das origens e destinos dentro desses municípios.

Para os municípios da região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), nos quais cada município foi tratado como uma zona individual, totalizou-se 19 zonas. Nos demais municípios do estado, onde a divisão foi simplificada em duas grandes zonas: Leste-RJ e Oeste-RJ, cada uma representando uma zona e separadas pela linha de demarcação entre Petrópolis e Teresópolis. Adicionalmente, para viagens interestaduais, cada estado foi considerado uma zona distinta, somando 26 zonas. A metodologia de divisão resultou no total de 261 zonas de tráfego.

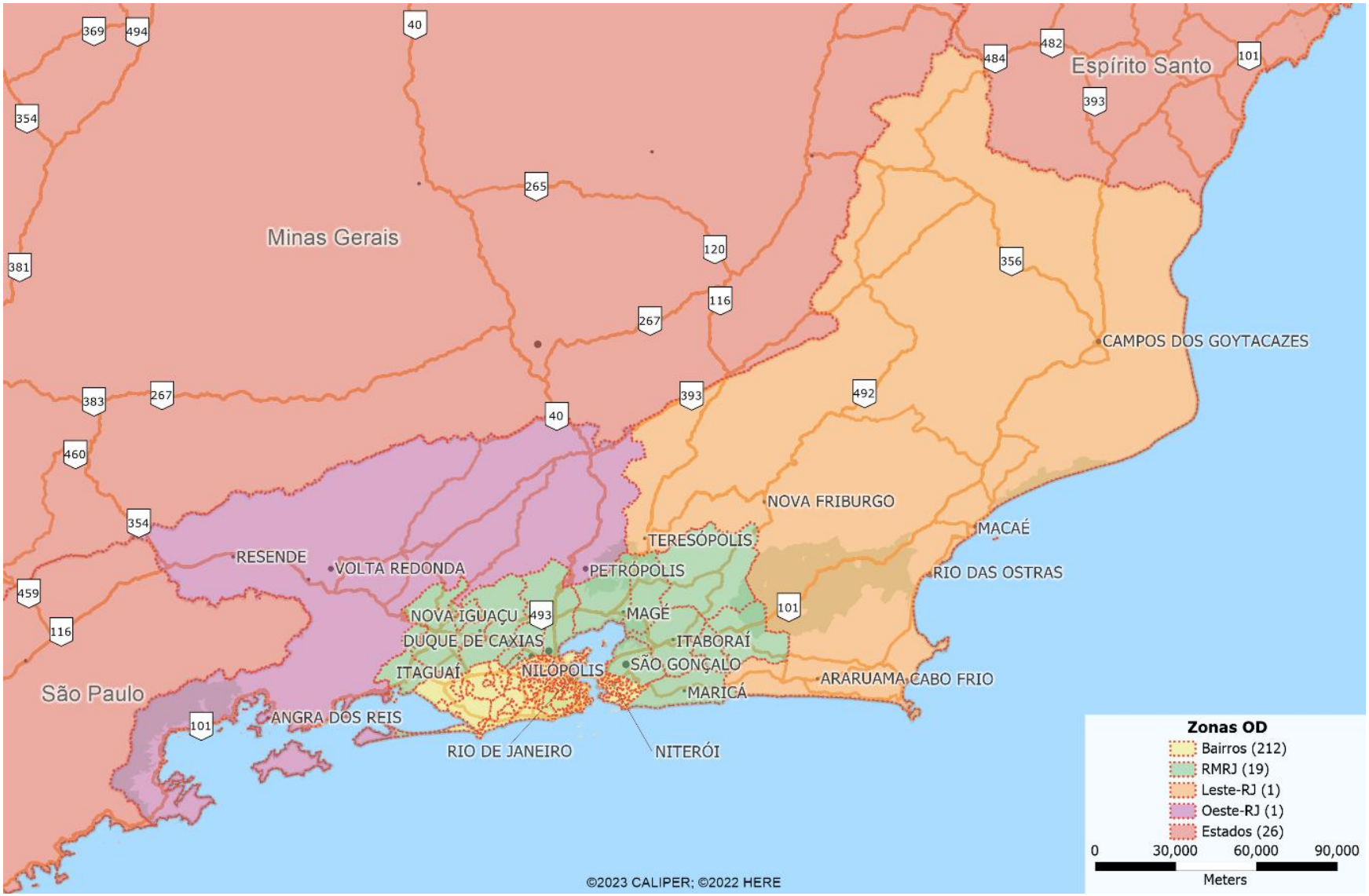

Figura 30 – Zonas OD

7.2.1. VEÍCULOS LEVES

A Figura 31 apresenta a distribuição do número de entrevistas conforme o tipo de local de origem e destino das viagens para a categoria de veículos leves. Os dados mostram que o "Local de trabalho" é o principal ponto de origem, com aproximadamente 900 entrevistas, seguido por "Residência", com cerca de 600 entrevistas. Isso indica que uma grande parte das viagens analisadas tem início no local de trabalho, refletindo padrões de deslocamento típicos dos dias úteis.

Quanto aos destinos, a "Residência" é o destino mais frequente, com cerca de 700 entrevistas, seguida pelo "Local de trabalho" com aproximadamente 450 entrevistas. Outros tipos de locais, como "Passeio/Visita/Lazer", "Compras", "Negócios", "Estudo" e "Saúde", apresentam números significativamente menores tanto para origens quanto para destinos, destacando a predominância de deslocamentos casa-trabalho e trabalho-casa na amostra analisada.

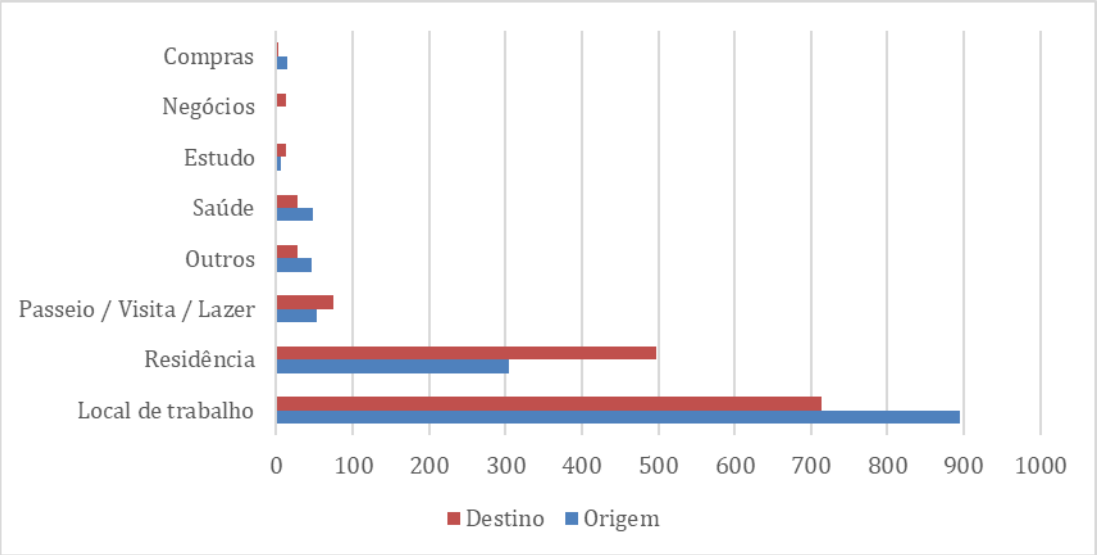

Figura 31 – Tipo de local de origem e destino

A Figura 32 mostra a distribuição da frequência de viagens realizadas pelos entrevistados em veículos leves, categorizada em cinco intervalos. Cada barra representa um número específico de viagens dentro desses intervalos, com as cores indicando diferentes quantidades de viagens.

Observa-se que a categoria "Por Dia" possui um destaque significativo com a maior quantidade de entrevistados realizando viagens diárias (indicada pela barra azul). A categoria "Por Semana" também apresenta uma alta frequência de viagens, com picos significativos nas barras representando viagens de 2 a 5 vezes por semana. A frequência mensal mostra um número moderado de viagens, enquanto a frequência anual possui poucas ocorrências, refletindo viagens menos comuns. A categoria "Eventual" tem uma alta concentração de entrevistados, indicando que muitos realizam viagens de forma esporádica.

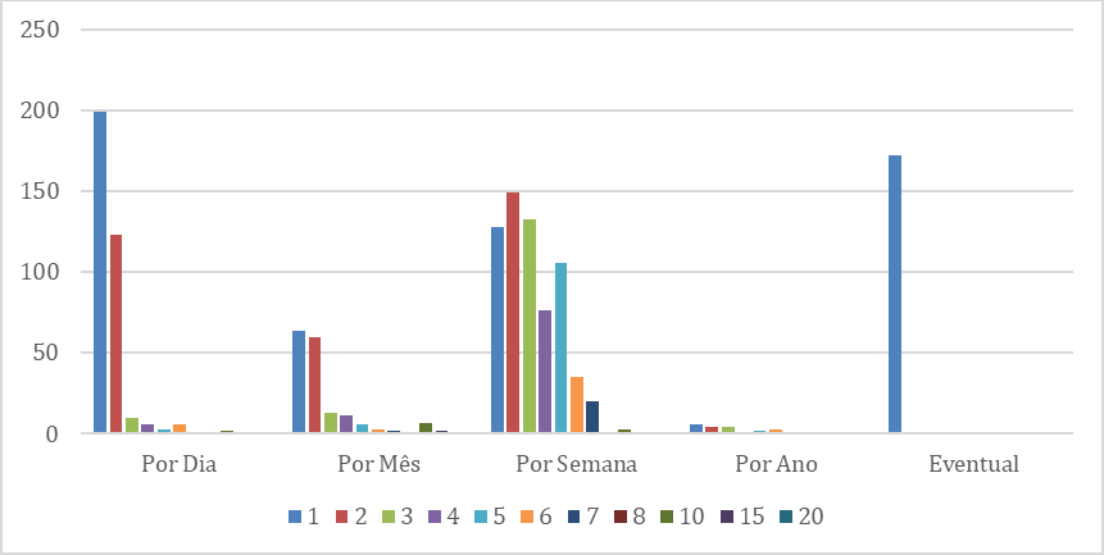

Figura 32 – Frequência de viagem

A Figura 33 ilustra o uso e o interesse em cobrança automática entre os entrevistados. O gráfico à esquerda mostra que 62% dos entrevistados (847 pessoas) não possuem cobrança automática, enquanto 38% (520 pessoas) utilizam essa ferramenta. Os resultados indicam que, embora uma parcela significativa da população ainda não utilize a cobrança automática, há uma adoção considerável dessa tecnologia entre os usuários.

O gráfico à direita revela o interesse em cobrança automática entre aqueles que atualmente não a utilizam. Dos 847 entrevistados que não possuem cobrança automática, 25% (215 pessoas) manifestaram interesse em adotar essa tecnologia, enquanto 75% (632 pessoas) não têm interesse. Esses resultados são importantes para identificar potenciais usuários e desenvolver estratégias para aumentar a adesão à cobrança automática.

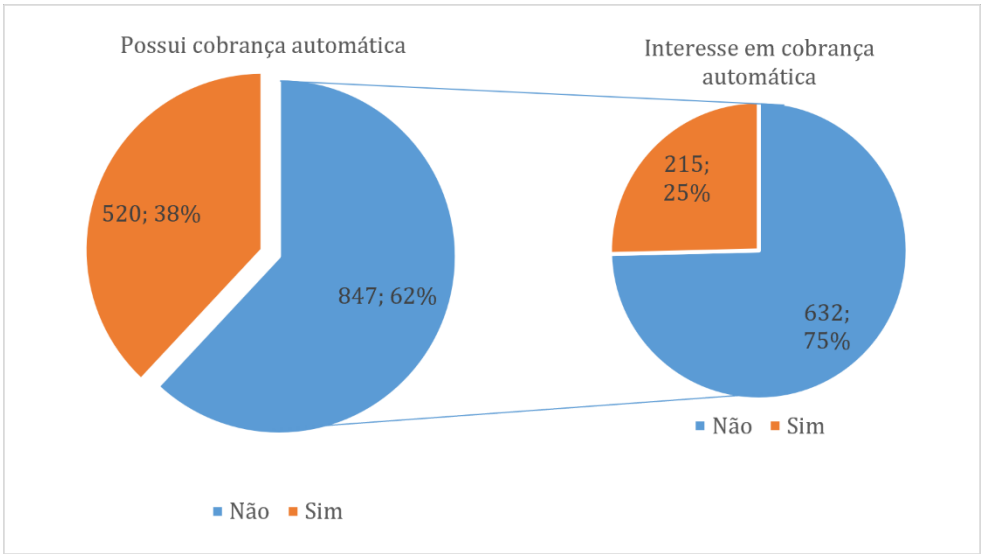

Figura 33 – Uso de cobrança automática

A Tabela 13 apresenta o número de viagens por tipo de deslocamento, já considerando os Fatores de Expansão (FE), incluindo os percentuais em relação ao total de viagens. O tipo de deslocamento mais representativo foi observado entre bairros do RJ e Niterói (48,1%), seguido das viagens com origem em bairros do RJ e destino à municípios da Região Metropolitana (30,3%) e das viagens realizadas entre os bairros do RJ e os municípios da região Leste-RJ (7,0%). As viagens com origem nos municípios da RMRJ com destino aos bairros de Niterói também são representativas, com 6,7%.

Tabela 13 – Viagens por tipo de deslocamento entre zonas para veículos leves

Origem/Destino	Bairro	RMRJ	Leste-RJ	Oeste-RJ	Estados
Bairro	**48,1%**	**30,3%**	**7,0%**	0,1%	0,7%
RMRJ	**6,7%**	3,4%	1,8%	0,1%	0,1%
Leste-RJ		0,1%			
Oeste-RJ	0,7%	0,2%	0,1%		
Estados	0,1%	0,4%	0,2%		0,1%

O mapa apresentado na Figura 34 ilustra as zonas geradoras (origem) e atratoras (destino) de viagens, destacando as áreas do Rio de Janeiro (RJ) e Niterói. As zonas são representadas por círculos, onde o tamanho do círculo é proporcional ao número de viagens registradas, com as zonas de origem em azul e as zonas de destino em vermelho.

As maiores concentrações de viagens originam-se e destinam-se ao Centro do RJ, Centro de Niterói, e bairros como Tijuca, Icaraí e São Gonçalo. Essas áreas são polos significativos tanto para o início quanto para o término das viagens, refletindo sua importância no fluxo diário de deslocamentos. A predominância de grandes círculos em regiões centrais indica uma alta densidade de viagens nessas zonas, influenciando diretamente a demanda por infraestrutura e serviços de transporte.

Além dessas áreas principais, outras localidades como Duque de Caxias, Nova Iguaçu e Itaboraí também aparecem como importantes pontos de origem e destino de viagens. Enquanto as entrevistas incluíram dados de outros estados como Maranhão, Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Pernambuco e Alagoas, a representatividade dessas regiões foi baixa e, portanto, não foram incluídas no mapa.

A Figura 35, Figura 36 e Figura 37 apresentam as linhas de desejo dos veículos leves entre os pares origem-destino para os seguintes deslocamentos, respectivamente:

- Viagens internas (origem em bairros do RJ e destino em bairros de Niterói);
- Viagens com origem em bairros do RJ e destino em municípios da RMRJ;
- Viagens entre municípios da RMRJ;
- Viagens com origem em municípios da RMRJ e destino em bairros de Niterói.

A Figura 35 apresenta as linhas de desejo das viagens internas entre os bairros do Rio de Janeiro e os bairros de Niterói para veículos leves. As linhas de desejo representam as principais rotas de deslocamento, com a espessura das linhas indicando o volume de tráfego entre essas regiões. Observa-se que as rotas mais densas conectam o Centro do Rio de Janeiro ao Centro de Niterói, destacando-se como o principal eixo de deslocamento entre as duas cidades. Esta rota é seguida por outras conexões significativas entre bairros centrais e adjacentes, como Icaraí e Santa Rosa em Niterói e bairros como Tijuca e Botafogo no Rio de Janeiro.

As áreas mais afastadas, como Jacarepaguá, Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes, apresentam menor densidade de deslocamentos diretos para Niterói, refletindo uma menor demanda de viagens entre essas regiões específicas. No entanto, ainda são visíveis conexões importantes, destacando a interdependência e a necessidade de uma infraestrutura eficiente de transporte entre os bairros do Rio de Janeiro e Niterói.

A Figura 36 apresenta as linhas de desejo das viagens de veículos leves, mostrando as conexões entre os bairros do Rio de Janeiro (RJ) e os municípios da Região Metropolitana (RM). As linhas de desejo indicam as rotas mais frequentes, com a espessura das linhas representando o volume de tráfego.

O mapa destaca que as conexões mais intensas ocorrem entre o Centro do Rio de Janeiro e o município de São Gonçalo, seguido por outras rotas significativas entre o Centro do RJ e Niterói. As linhas mais espessas indicam um alto volume de viagens, refletindo a importância desses eixos de deslocamento para o fluxo diário de veículos leves.

Além dessas principais rotas, também é possível observar conexões relevantes entre bairros do RJ, como Tijuca, Botafogo, e Copacabana, e municípios como Itaboraí e Maricá. Embora a maioria das viagens se concentre nas áreas centrais, há uma notável dispersão de tráfego em direção aos municípios periféricos da Região Metropolitana.

Por fim, a Figura 37 apresenta as linhas de desejo das viagens de veículos leves, mostrando as conexões entre os municípios da Região Metropolitana (RM) e os bairros de Niterói. O mapa destaca que as rotas mais densas partem de São Gonçalo e Duque de Caxias em direção a Niterói, refletindo a importância dessas conexões no fluxo diário de veículos leves. As linhas mais espessas indicam um alto volume de viagens, principalmente para o Centro de Niterói, Fonseca e Icaraí, que são os principais destinos dentro da cidade. Observa-se também rotas significativas partindo de outros municípios da RM, como Nova Iguaçu e São João de Meriti, em direção aos bairros de Niterói.

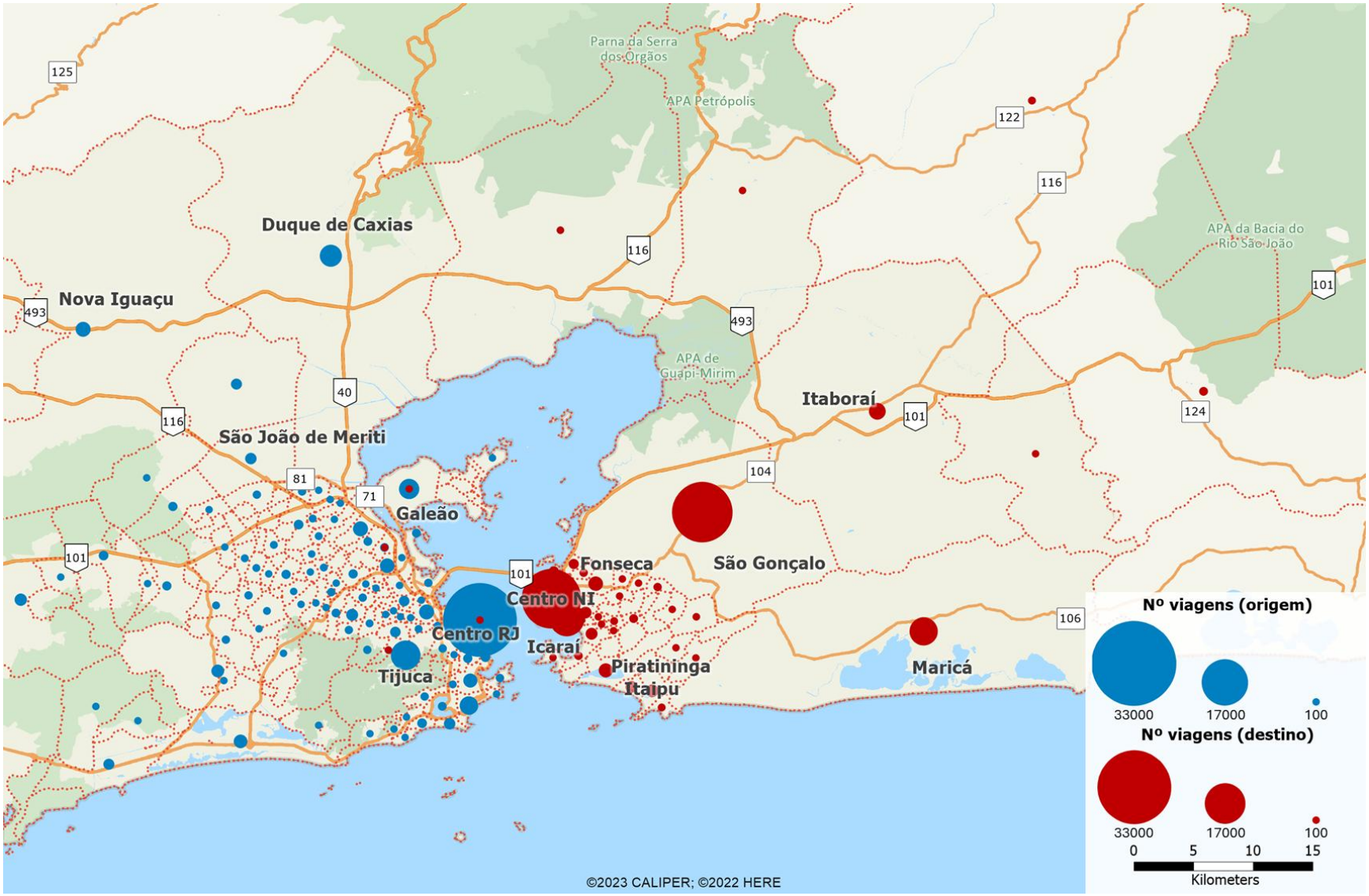

Figura 34 – Locais de origem e destino

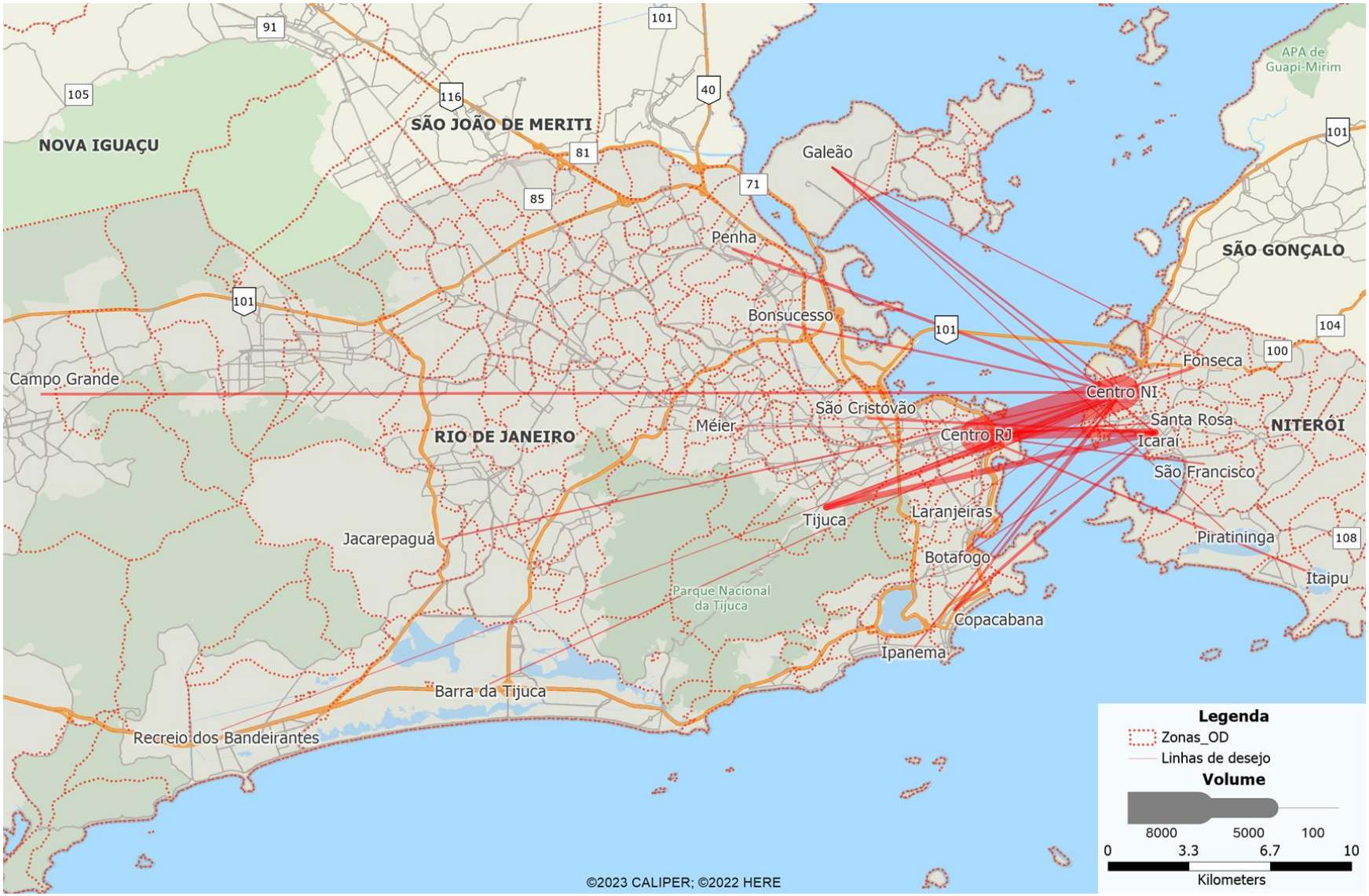

Figura 35 – Linhas de desejo das viagens internas (bairros RJ - bairros Niterói) para veículos leves

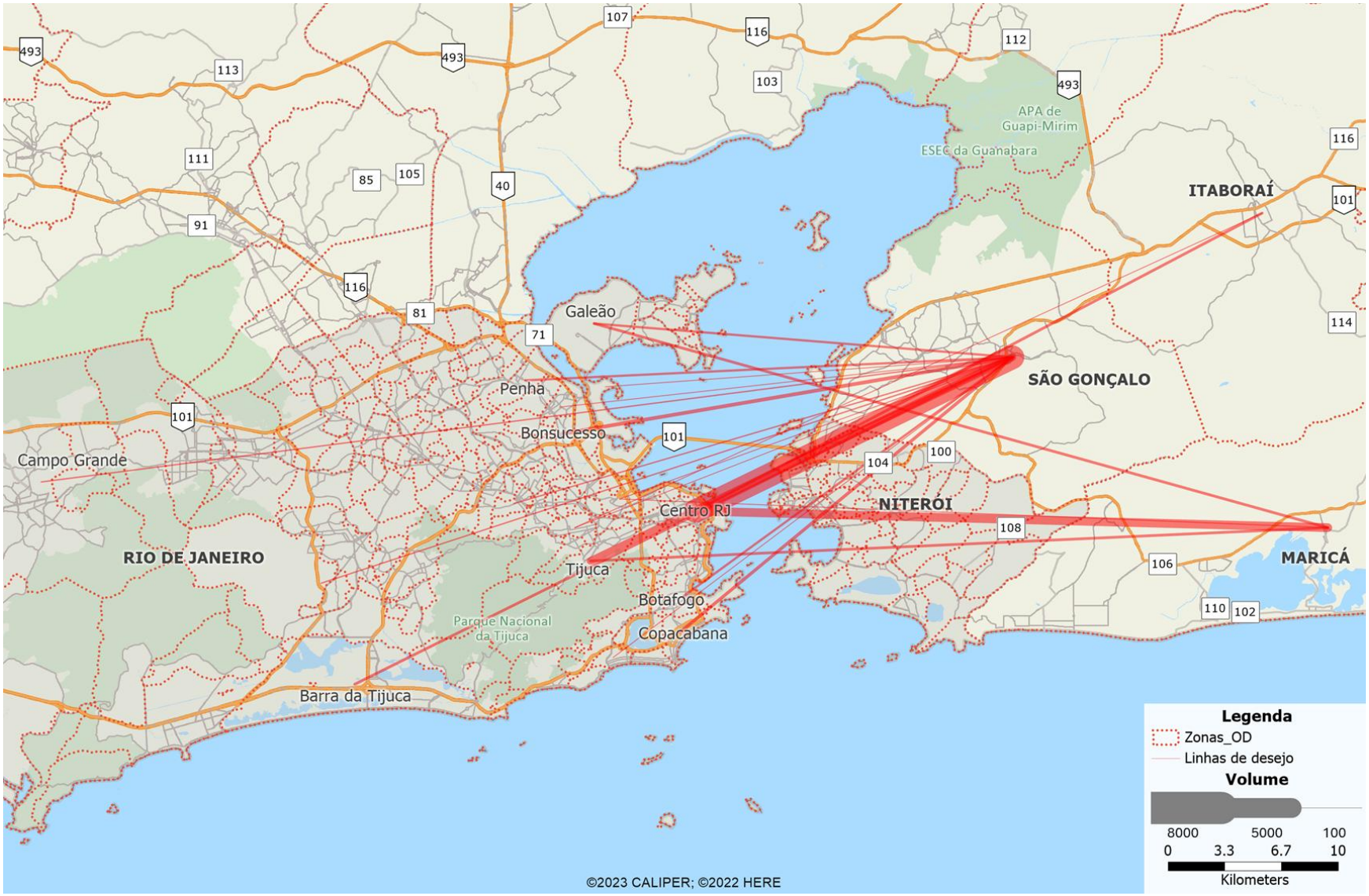

Figura 36 – Linhas de desejo das viagens de bairros do RJ para municípios da RM para veículos leves

Figura 37 – Linhas de desejo das viagens de municípios da RM para bairros de Niterói para veículos leves

A Figura 38 apresenta a distribuição de viagens entre os bairros do Rio de Janeiro e os municípios classificados na zona Leste-RJ. Entre os principais pares de viagens, destacam-se as rotas entre o Centro do Rio de Janeiro e Saquarema e a conexão entre o Centro do Rio e Cabo Frio, refletindo o fluxo considerável entre o centro da cidade e um importante destino turístico e residencial na região dos Lagos. A rota entre Penha e Araruama, com 560 viagens, mostra Araruama como um destino frequente para os residentes do bairro da Penha. O gráfico detalha ainda a distribuição de viagens entre outros bairros do Rio de Janeiro e suas respectivas frequências, destacando a predominância do Centro do Rio como ponto de origem ou destino, seguido por Tijuca, Copacabana e Penha.

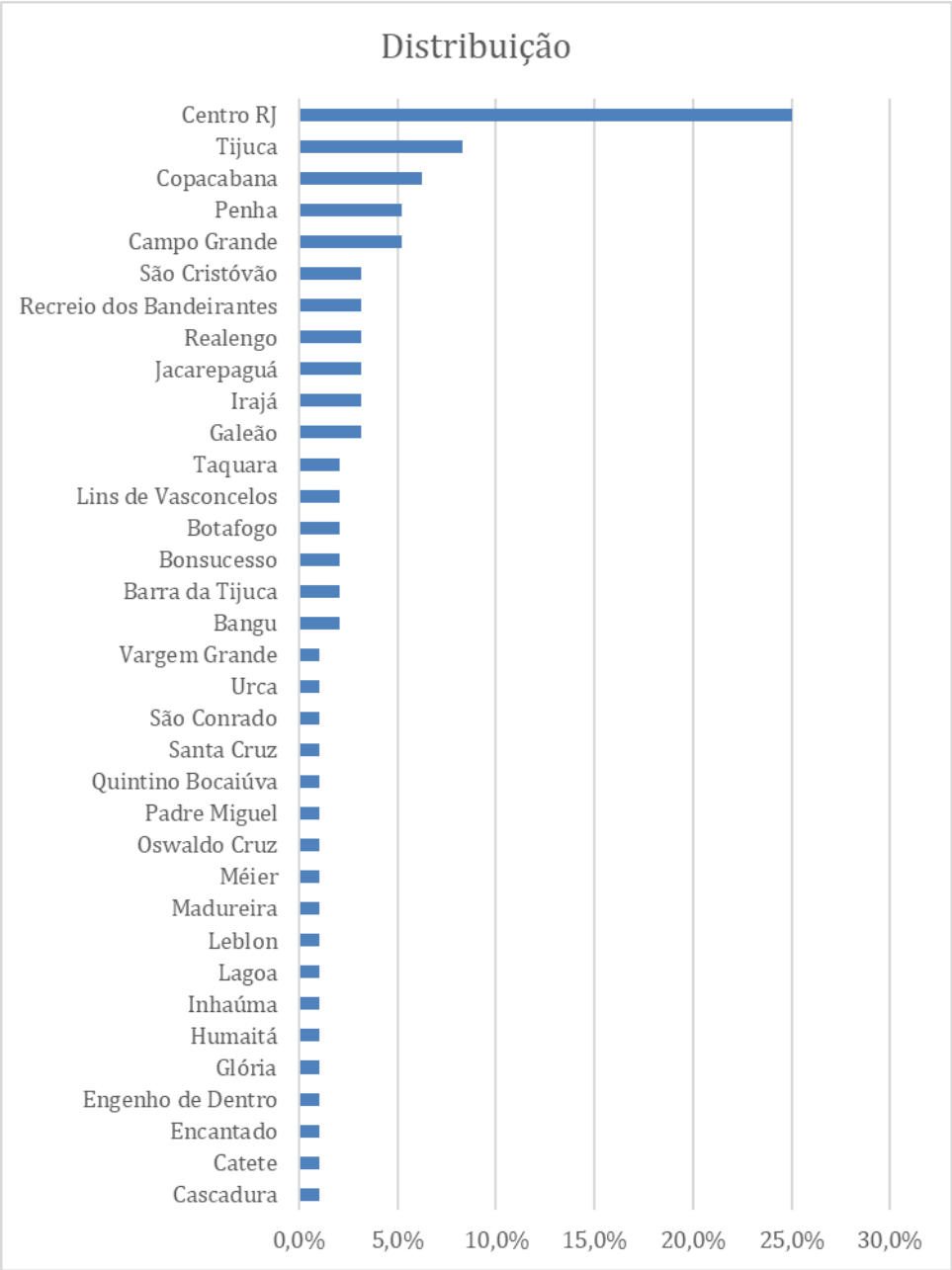

Figura 38 – Viagens por bairros de origem (destino a municípios da região Leste do RJ)

A Figura 39 apresenta o gráfico das viagens por município de destino na região Leste do RJ. Os destinos mais frequentes são Araruama, seguido por Saquarema e Cabo Frio. Outros destinos significativos incluem Macaé, Rio das Ostras e Armação dos Búzios.

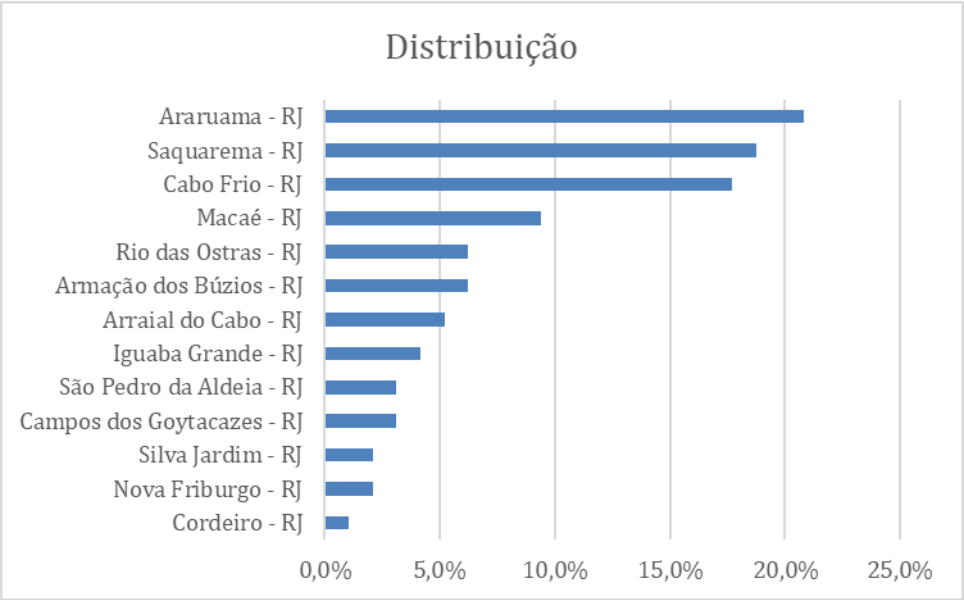

Figura 39 – Viagens por município de destino na região Leste do RJ

Quanto às viagens entre diversos municípios da Região Metropolitana (RM) e a Região Leste do RJ, destacam-se as viagens entre Belford Roxo e São Gonçalo, a rota entre Duque de Caxias e São Gonçalo, as viagens realizadas entre Nova Iguaçu e São Gonçalo e entre Duque de Caxias e Maricá.

7.2.2. CAMINHÕES COM 2 EIXOS

Conforme apresentado anteriormente, foram obtidas 287 entrevistas de caminhões com 2 eixos, que representam um volume médio diário de 4.394 veículos nessa classe. Além da localização da origem e destino da viagem em curso, os motoristas responderam também qual o tipo de local da origem e destino, conforme apresentado na Figura 40. A maior parte das viagens teve origem nas fábricas/depósitos e destino nos centros de distribuição. As lojas e supermercados também aparecem em destaque.

Quanto à carga transportada, cerca de 21% dos veículos estavam vazios, 13% transportavam alimentos e 10% material de construção. Além disso, 27% dos caminhões entrevistados estavam transportando outro tipo de carga não especificada nas opções da entrevista, conforme apresentado na Figura 41.

A frequência de viagem não foi perguntada para todos os 287 entrevistados, visto que foi necessário reduzir a entrevista para que as perguntas essenciais (local de origem e destino, informações sobre a classe do veículo, etc.) fossem perguntadas no tempo disponível para a entrevista.

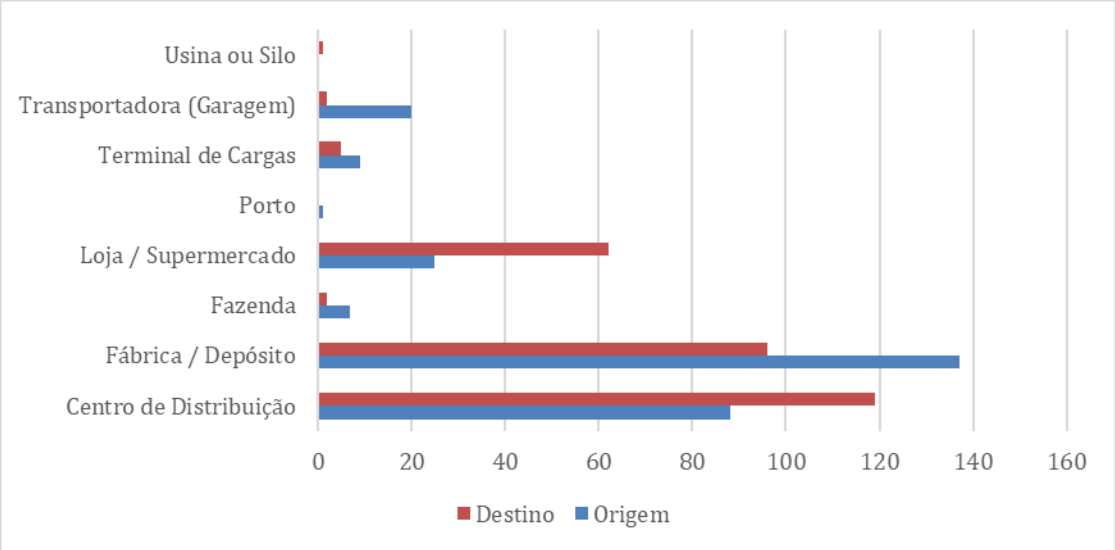

Figura 40 – Tipo de origem e destino das viagens dos caminhões de 2 eixos

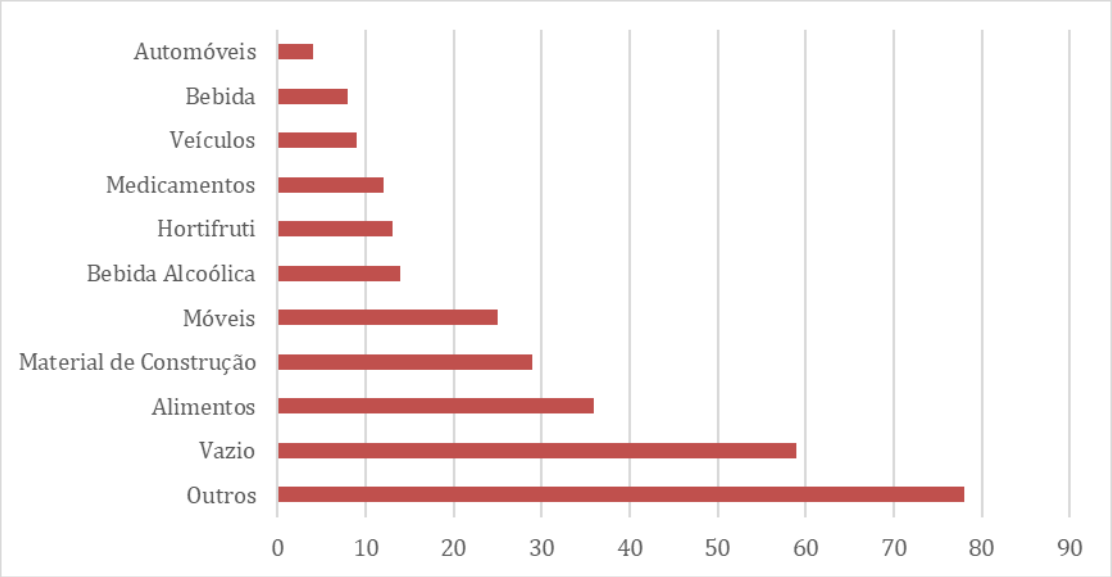

Figura 41 – Tipo de carga transportada

Quanto à cobrança automática, cerca de 40% dos caminhões de 2 eixos entrevistados declararam possuir o sistema AVI. Dos 174 entrevistados que negou possuir o sistema, somente 20% informou ter interesse em utilizar a *tag* de cobrança automática. Essa informação é importante para o dimensionamento do sistema *Multi-lane Free Flow* e planejamento da transição do sistema manual para o MLFF.

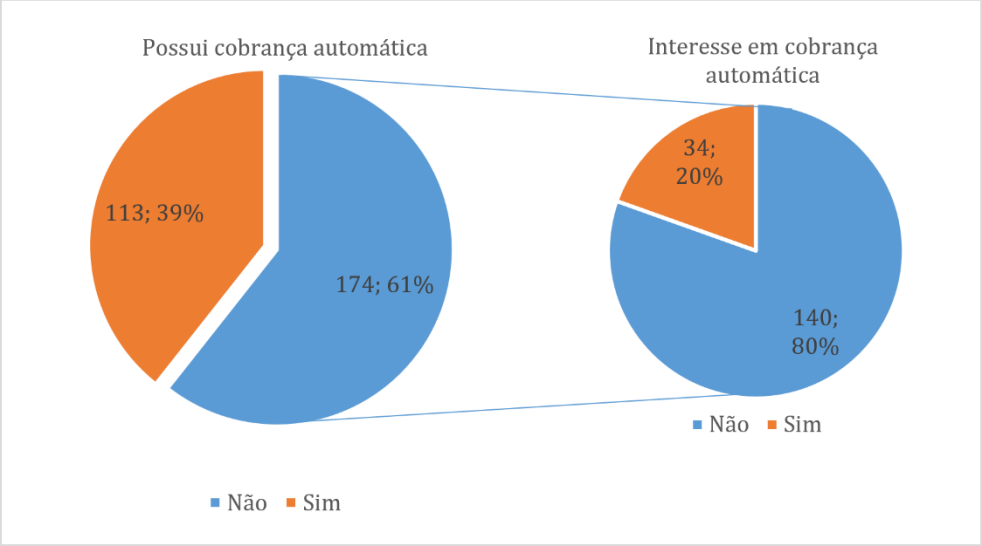

Figura 42 – Uso de cobrança automática

Com a classificação das zonas de tráfego em Bairro, RMRJ, Leste-RJ, Oeste-RJ e Estados, foi possível obter uma matriz origem-destino simplificada considerando essas zonas, conforme exibido na Tabela 14. As viagens informadas nessa tabela representam o número médio de viagens realizadas por caminhões com 2 eixos diariamente entre essas zonas, e foi calculado a partir do número de entrevistas e o fator de expansão detalhado no item 5.3.

O tipo de deslocamento mais representativo foi observado entre bairros do RJ e Niterói (34,5%), seguido das viagens com origem em bairros do RJ e destino à municípios da Região Metropolitana (22%) e das viagens realizadas entre os municípios da RMRJ (12,5%). As viagens com origem em bairros do RJ com destino à município da região Leste do Estado e com origem nos municípios da RMRJ com destino aos bairros de Niterói também são representativas, com 9,4% cada.

Tabela 14 – Viagens por tipo de deslocamento entre zonas para caminhões com 2 eixos

Origem/Destino	Bairro	RMRJ	Leste-RJ	Oeste-RJ	Estados
Bairro	34,5%	22,0%	9,4%	0,7%	2,4%
RMRJ	9,4%	12,5%	1,4%		0,3%
Oeste-RJ					
Estados	0,3%	0,3%			

O mapa a seguir (Figura 43) apresenta a geração e atração de viagens de caminhões com 2 eixos por zona de tráfego. Observa-se que a principais origens são os bairros Centro (RJ), Campo Grande (RJ) e o município de Duque de Caxias. Já os principais destinos são o bairro Centro (Niterói) e o município de São Gonçalo.

A Figura 44, Figura 45, Figura 46 e Figura 47 apresentam as linhas de desejo entre os pares origem-destino para os seguintes deslocamentos, respectivamente:

- Viagens internas (origem em bairros do RJ e destino em bairros de Niterói);
- Viagens com origem em bairros do RJ e destino em municípios da RMRJ;
- Viagens entre municípios da RMRJ;

- Viagens com origem em municípios da RMRJ e destino em bairros de Niterói.

Para as viagens internas, observa-se que as linhas de desejo mais acentuadas estão nos pares Centro (RJ) – Centro (Niterói), Campo Grande – Centro (Niterói), Campo Grande – Icaraí, Campo Grande – São Francisco, Tijuca – Centro (Niterói) e Freguesia (Jacarepaguá) – Santa Rosa. Os pares com menos de 20 viagens diárias (equivalente a um veículo entrevistado) não são exibidas no mapa.

Nas viagens com origem em bairros do RJ e destino aos municípios da RMRJ, o principal destino observado é São Gonçalo, com as principais origens sendo Vigário Geral e Centro (RJ). Outros bairros como Madureira, Benfica e Colégio também são representativos nessa amostra.

O par OD com maior volume de viagens entre municípios da Região Metropolitana é o par Duque de Caxias – São Gonçalo, seguido pelo par Duque de Caxias – Maricá e São João de Meriti – São Gonçalo.

Por fim, as viagens com origem em municípios da RMRJ e destino a bairros de Niterói tem como pares principais Duque de Caxias – Centro (Niterói), Duque de Caxias – Icaraí, Nova Iguaçu – Centro (Niterói) e Japeri – Itaipu.

As viagens com origens em bairros do RJ e destino a municípios da região leste não foram apresentadas em mapas com linhas de desejo visto que todos esses municípios foram condensados em uma única zona de tráfego. Para analisar minuciosamente os principais pares OD desse tipo de deslocamento, foi necessário voltar para a base inicial de dados. Os resultados apontam para os pares Campo Grande – Macaé e Bangu – Macaé. Os demais pares observados apresentaram cerca de 30 viagens cada (ou seja, 2 entrevistados) e foram: Campo Grande – Araruama, Jacarepaguá – Araruama e Estácio – Cabo Frio.

Os demais tipos de deslocamentos não são apresentados no mapa pois não possuem grandes volumes de viagens.

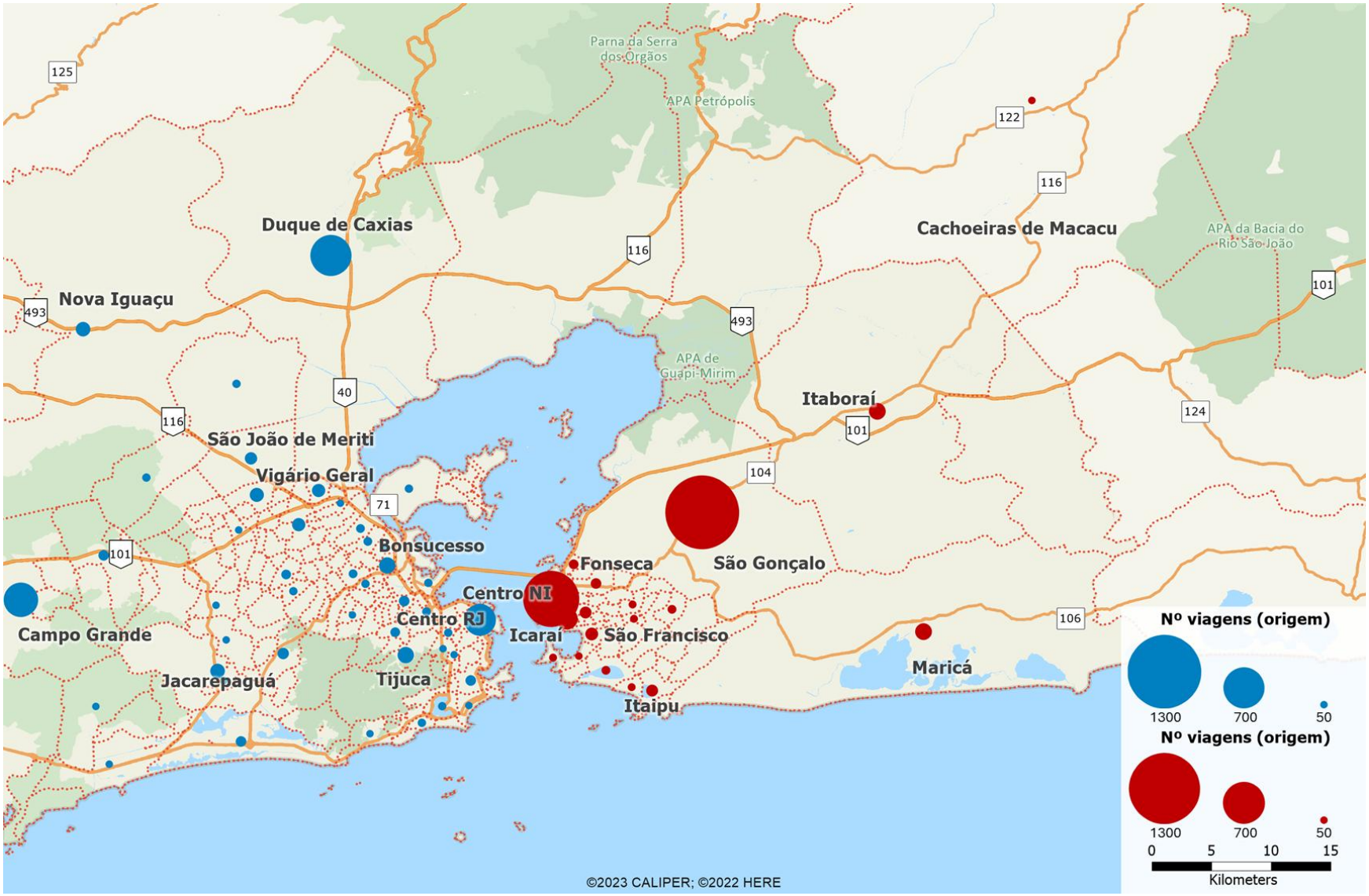

Figura 43 – Locais de origem e destino para caminhões com 2 eixos

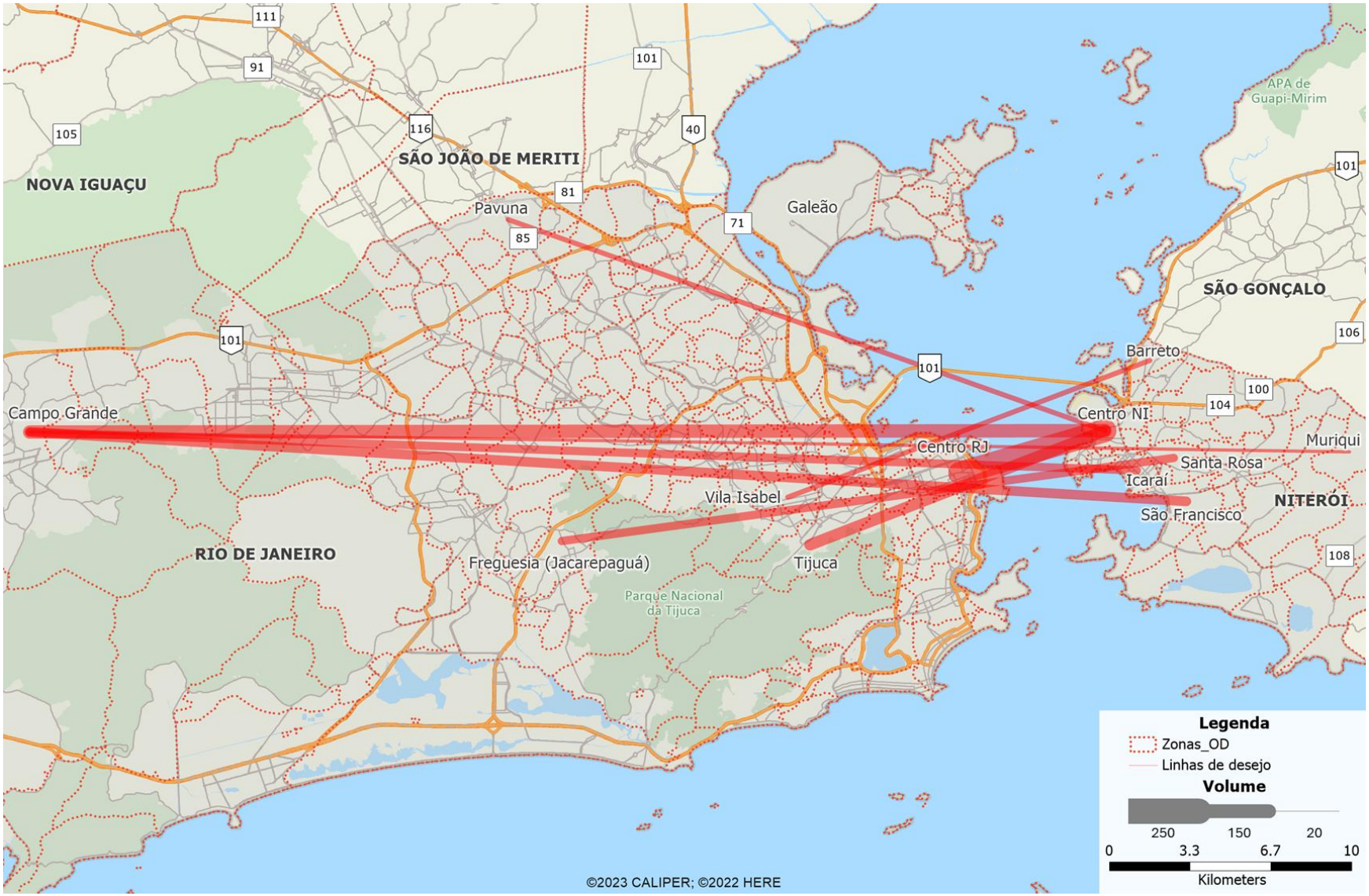

Figura 44 – Linhas de desejo das viagens internas (bairros RJ - bairros Niterói) para caminhões com 2 eixos

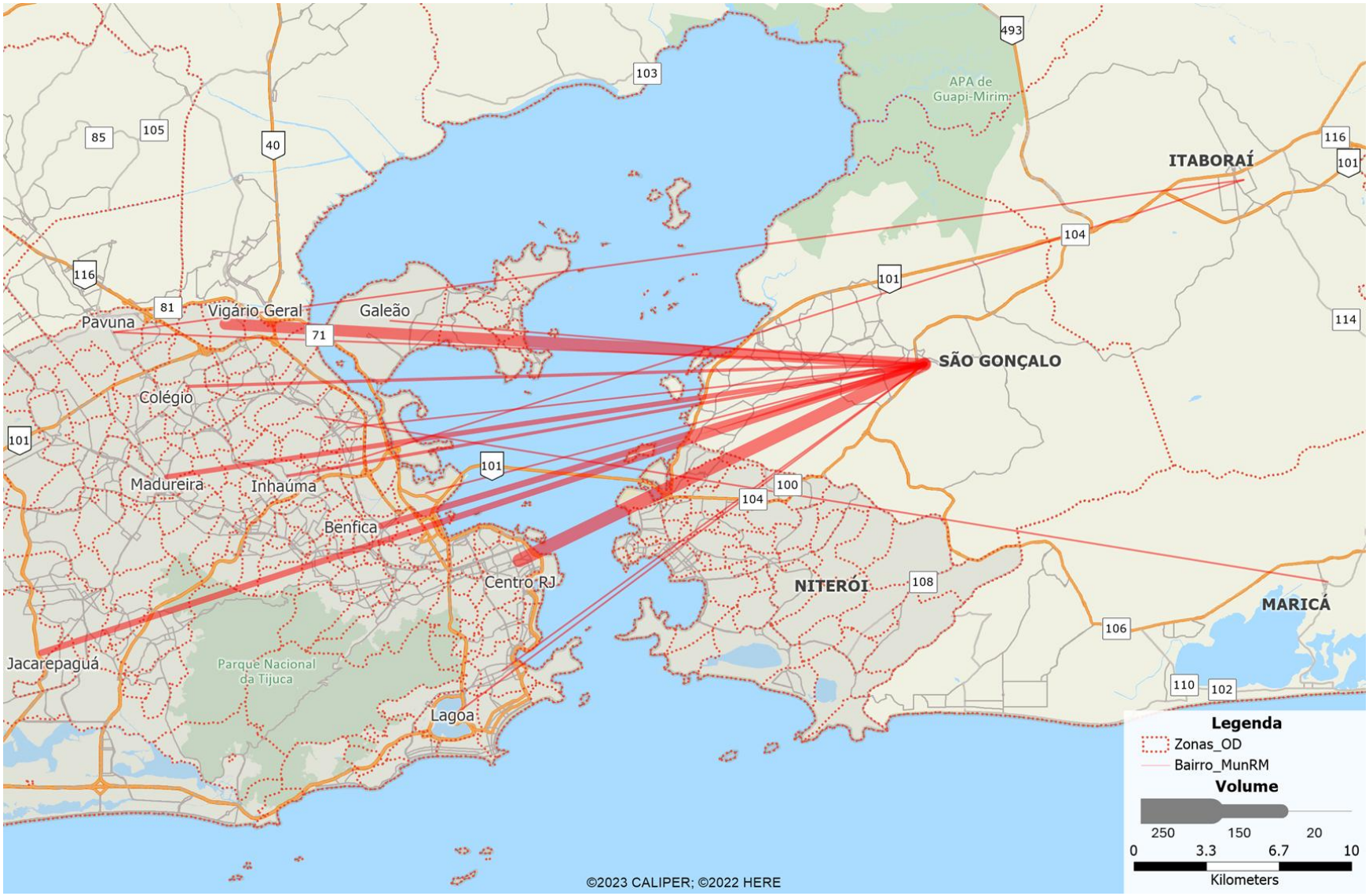

Figura 45 – Linhas de desejo das viagens de bairros do RJ para municípios da RM para caminhões com 2 eixos

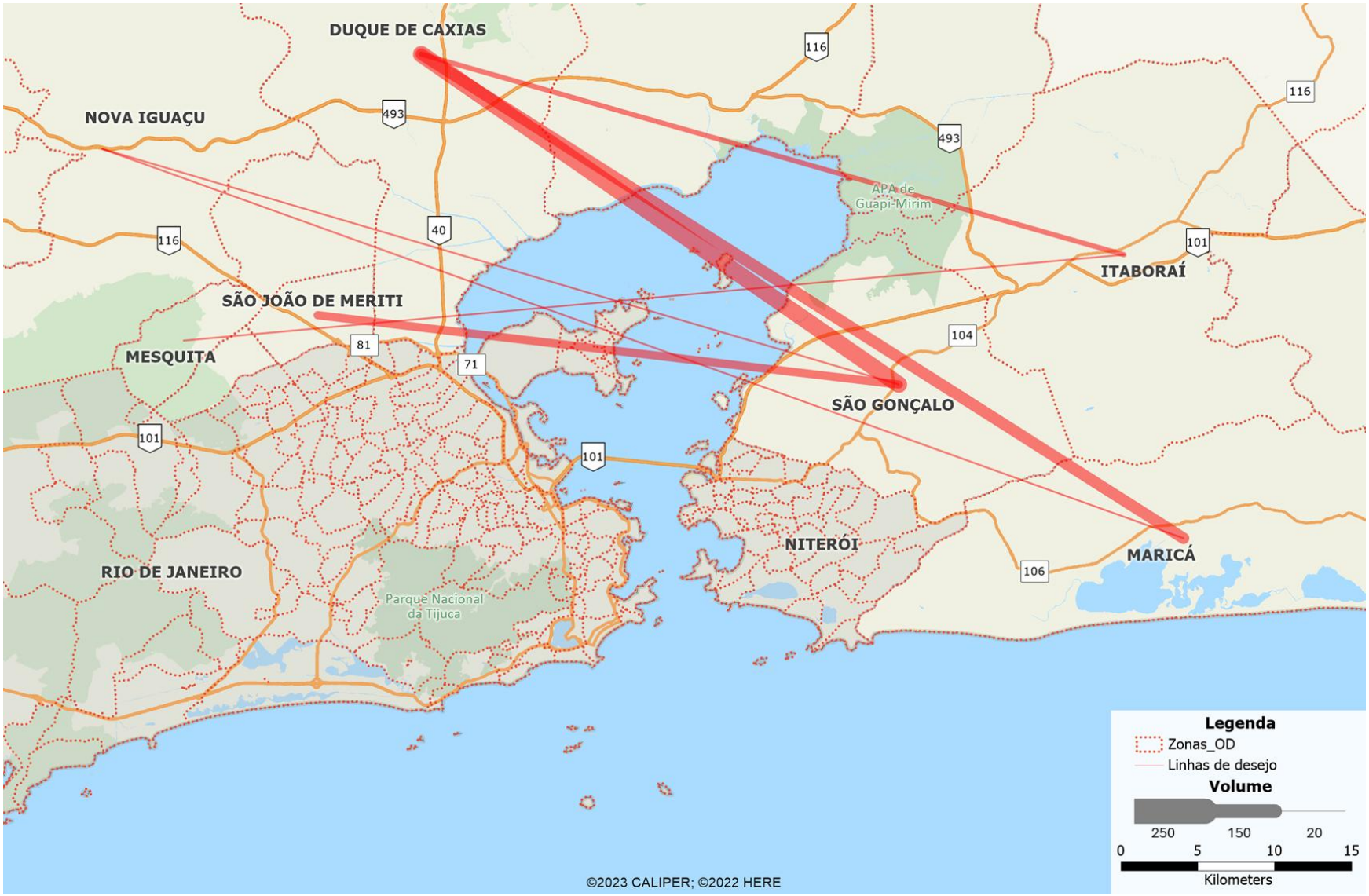

Figura 46 – Linhas de desejo das viagens entre municípios da RM para caminhões com 2 eixos

Figura 47 – Linhas de desejo das viagens entre municípios da RM e bairros de Niterói para caminhões com 2 eixos

7.2.3. CAMINHÕES COM MAIS DE 2 EIXOS

A Figura 48 apresenta o tipo de local de origem e destino para os caminhões com mais de 2 eixos conforme o número de entrevistas obtidas. Assim como para os caminhões de 2 eixos, os locais mais citados são as Fábricas/Depósitos, Centros de Distribuição e Lojas/Supermercados. Entretanto, no caso dos caminhões com mais de 2 eixos tanto a origem como o destino mais comum são as Fábricas/Depósitos (para caminhões menores, o destino mais frequente são os Centros de Distribuição).

Assim como apresentado para os caminhões com 2 eixos, grande parte dos caminhões maiores não transportavam nenhuma carga no momento da entrevista. As cargas mais transportadas entre as citadas foram Bebidas e Alimentos, além de Outros (itens não listados nas opções da entrevista).

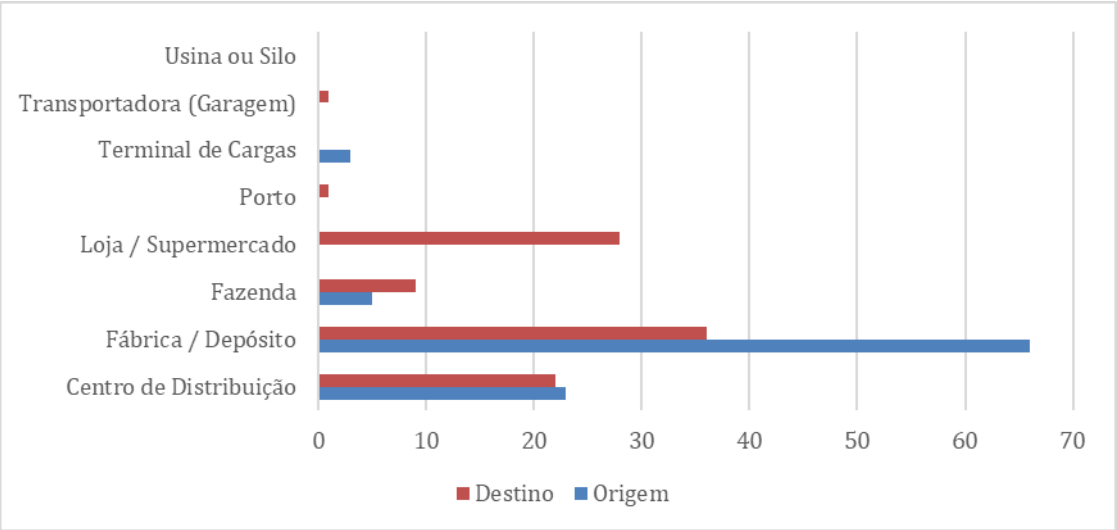

Figura 48 – Tipo de origem e destino para caminhões com mais de 2 eixos

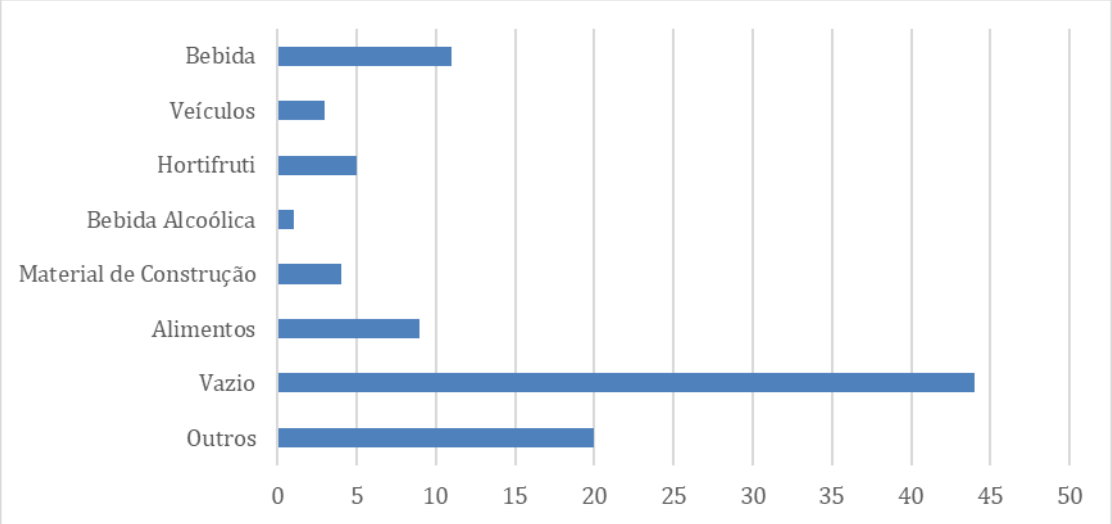

Figura 49 – Tipo de carga transportada para caminhões com mais de 2 eixos

Cerca de 76% dos veículos entrevistados possuem *tag* de cobrança automática, percentual superior aos caminhões de 2 eixos (somente 40% possuíam o sistema). Entretanto, todos os usuários que não fazem uso do sistema atualmente informaram não possuir interesse em aderir à cobrança automática. Esses usuários representam cerca de 1.241 viagens diárias de caminhões com mais de 2 eixos, ou o equivalente a 1,8% do volume médio diário dentre todas as classes (63.510 leves; 4.394 cam. 2 eixos e 1.241 cam. com mais de 2 eixos, conforme item 5.3).

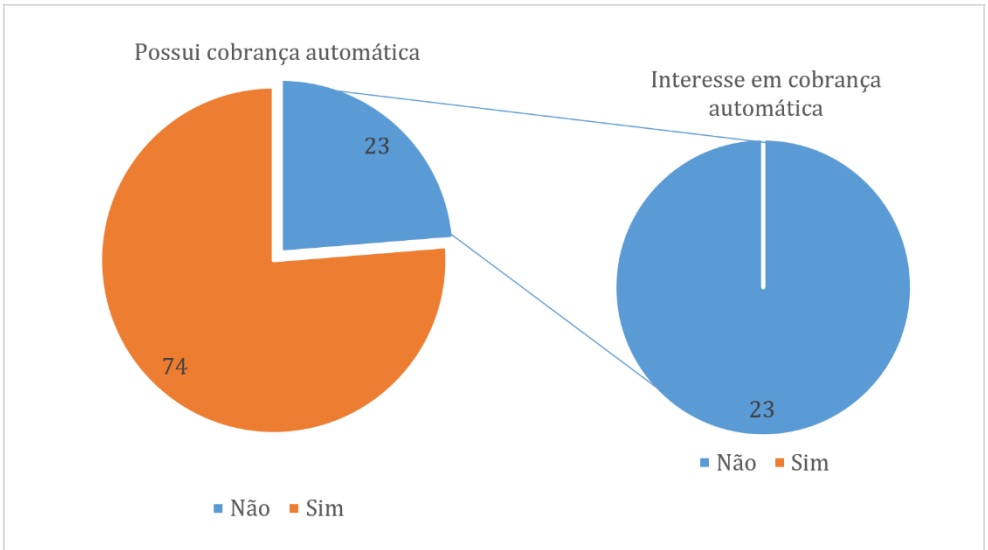

Figura 50 – Tipo de carga transportada para caminhões com mais de 2 eixos

A tabela abaixo apresenta a matriz origem/destino simplificada para as viagens realizadas por caminhões com mais de 2 eixos. Os volumes mais representativos estão nas viagens com origem nos bairros do RJ e destino aos municípios da RMRJ (29,9%) e nas viagens com origem nos bairros do RJ e destino aos bairros de Niterói (21,6%). Em menor escala, estão as viagens com origem nos bairros do RJ e destino aos municípios da região Leste do estado (10,3%) e com origem nos bairros do RJ e destino a outros estados do Brasil.

Tabela 15 – Viagens por tipo de deslocamento entre zonas para caminhões com 2 eixos

Origem/Destino	Bairro	RMRJ	Leste-RJ	Estados
Bairro	21,6%	29,9%	10,3%	7,2%
RMRJ	6,2%	1,0%	6,2%	4,1%
Estados		3,1%	10,3%	

A Figura 51 apresenta as zonas geradoras e atratoras de viagens. Identificou-se como principais origens os bairros de Irajá e Centro – RJ, além do município de Duque de Caxias. Como principais destinos estão o município de São Gonçalo e o bairro Centro – Niterói.

As linhas de desejo para os dois tipos de deslocamentos mais representativos para os caminhões com mais de 2 eixos são apresentadas no mapa da Figura 52, sendo eles os deslocamentos do tipo Bairro – Bairro e Bairro – RMRJ. Os principais pares para o primeiro tipo de deslocamento foram Irajá – Centro (Niterói), Bonsucesso – Ilha da Conceição e Caju – Centro (Niterói). Para os deslocamentos do tipo Bairro – RMRJ, as viagens acontecem principalmente saindo dos bairros Centro – RJ, Pavuna, Jacarepaguá e Vila Isabel com destino à São Gonçalo.

Dentre as viagens entre os bairros do Rio de Janeiro e os municípios da Zona Leste (ZL), a rota Irajá-Campos dos Goytacazes destaca-se, além da conexão entre Irajá e Cabo Frio e o trajeto entre o Centro do Rio de Janeiro e Saquarema. Os resultados das viagens interestaduais têm como principais origens os estados de São Paulo e Minas Gerais, com destinos concentrados no Espírito Santo. Dentro da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), o principal par de viagens é entre Nova Iguaçu e Araruama. Por fim, as viagens de municípios da RMRJ para os bairros de Niterói têm como principais origens Belford Roxo e Duque de Caxias, com destino ao Centro de Niterói.

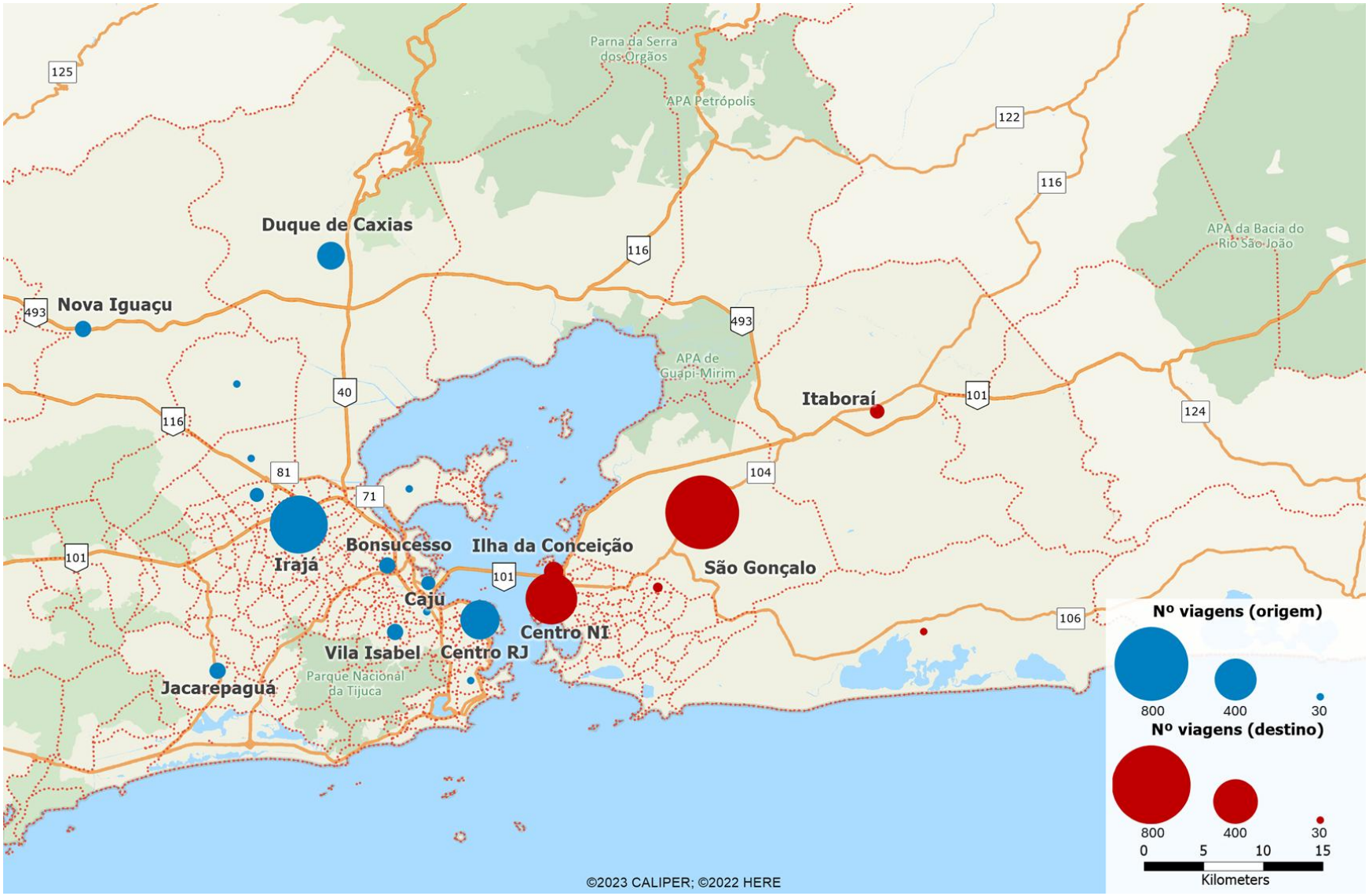

Figura 51 – Locais de origem e destino para caminhões com mais de 2 eixos

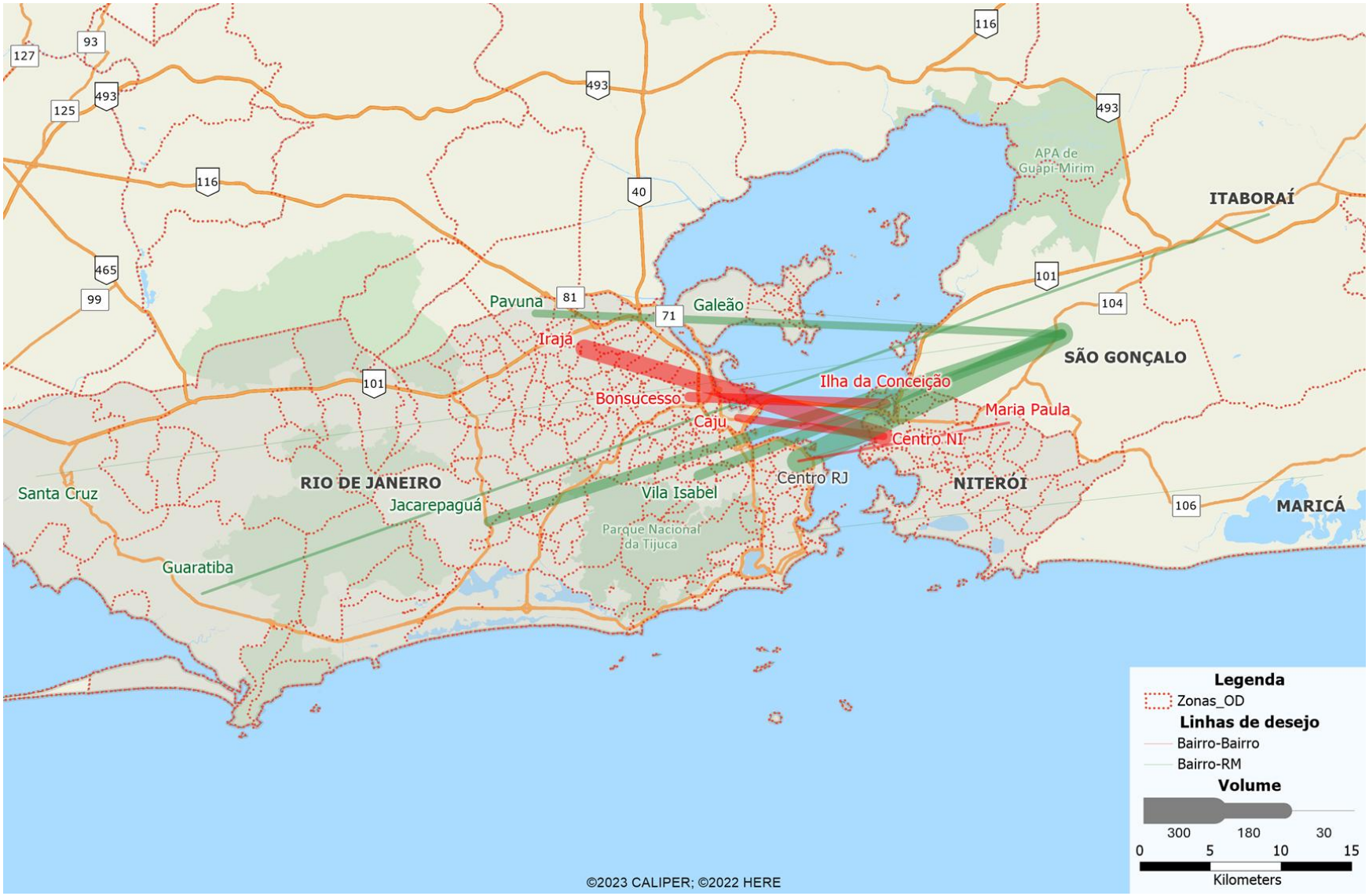

Figura 52 – Linhas de desejo das viagens para caminhões com mais de 2 eixos

7.2.4. DISTÂNCIAS E TEMPOS DAS VIAGENS

Após a análise dos principais pares origem-destino para cada classe de veículo analisado, foi realizada também uma análise dos tempos e distâncias dessas viagens utilizando o sistema viário existente. Para esse procedimento, foi utilizado o software de geoprocessamento *Maptitude*, que possui uma ferramenta específica para roteirização. A Figura 53 mostra um exemplo de uma rota criada entre os centroides de duas zonas de tráfego (Tijuca e Centro – Niterói). Essa rota é gerada a partir do caminho mais rápido entre os dois pontos selecionados.

Para calcular o tempo de viagem, o programa utiliza as velocidades de cada link (trecho de via) do sistema viário. A velocidade de cada link está presente na base de vias elaborada pelo próprio software e corresponde à velocidade média do trecho. Como exemplo, o trecho entre o Centro do RJ e o Centro de Niterói (considerando os centroides) possui uma distância de 20km. O *Maptitude* apresentou um tempo de 27 minutos para essa viagem (velocidade média de 44km/h). Esse mesmo trecho foi consultado no Google Maps no dia 03/07 (quarta-feira) às 15h30 e o tempo de viagem previsto era de 43 minutos, ligeiramente superior devido ao trânsito que começa a se intensificar nesse horário.

Os gráficos a seguir apresentam a distribuição do número de viagens por distância e por tempo de viagem para veículos leves, caminhões com 2 eixos e caminhões com mais de 2 eixos (Figura 54 a Figura 59).

Para os veículos leves, a maioria das viagens se concentra em trechos com distância de até 40km (56%), com um pico concentrando nas viagens entre 200 e 300km ("até 300km"). Já os tempos de viagem se concentram em até 50 minutos (52%). Para os caminhões de 2 eixos, cerca de 55% das viagens possuem distância de até 60km, mas o crescimento do percentual acumulado é mais constante e menos acentuado comparado aos veículos leves. Menos de 50% das viagens de caminhões de 2 eixos dura menos de 1h, com a maioria das viagens levando entre 1h e 1h30. Para os caminhões com mais de 2 eixos, a maioria das viagens está concentrada em distâncias menores, com um acúmulo rápido até 40 km. Entretanto, também ocorrem picos nas viagens entre 50 e 60km ("até 60km") e entre 60 e 70km ("até 70km"). Para os tempos de viagem, menos de 50% duram menos de 1h e observa-se um percentual considerável de viagens com mais de 10h de duração, correspondentes às viagens mais longas.

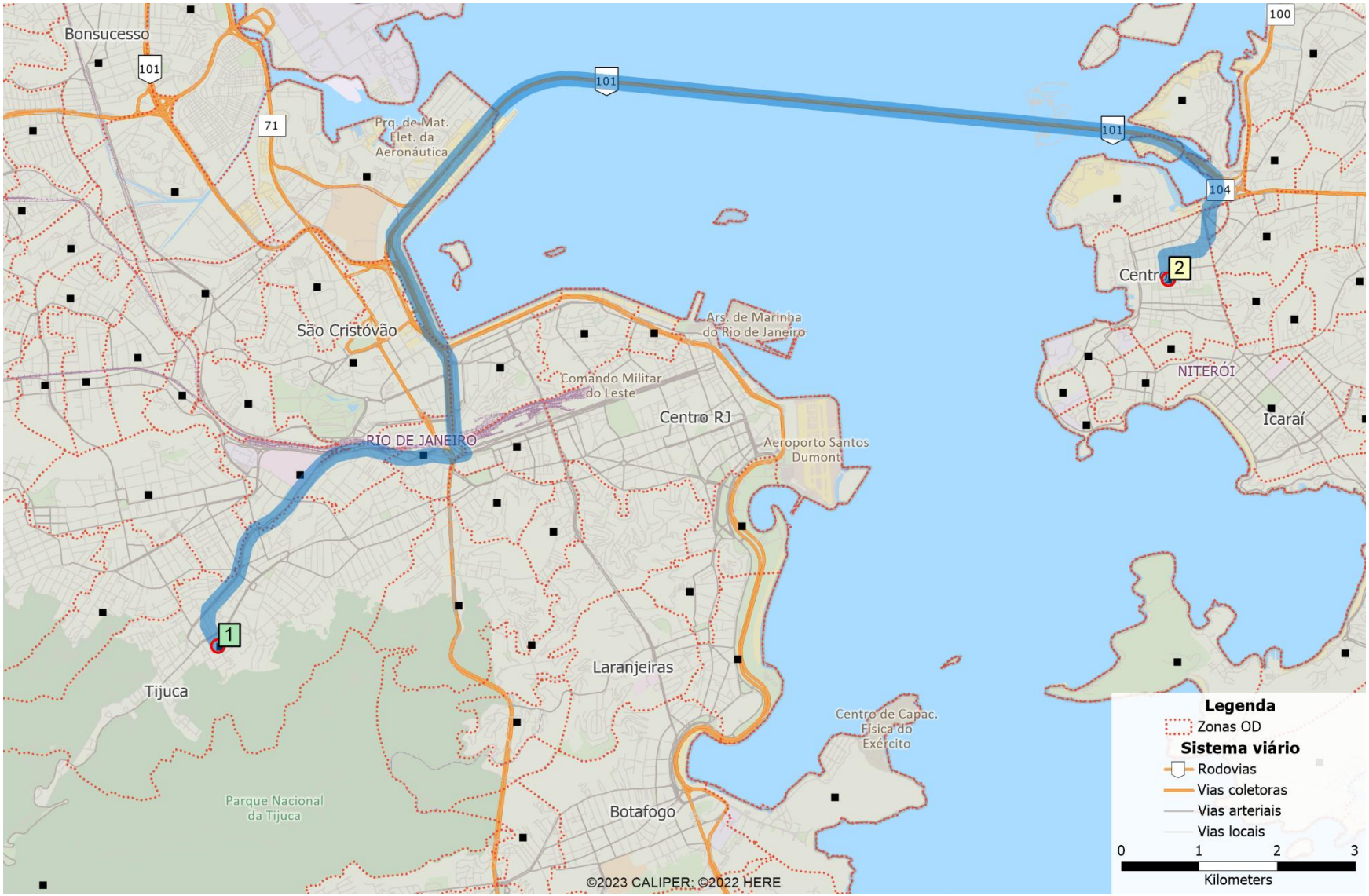

Figura 53 – Exemplo de rota entre os centroides de um par origem--destino

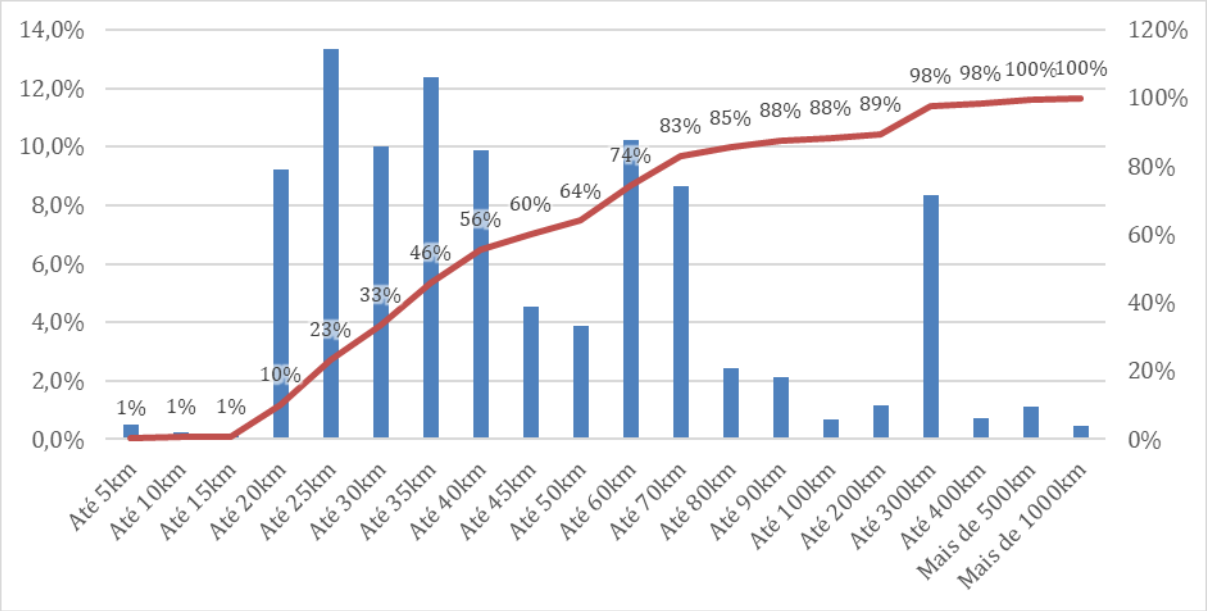

Figura 54 – Distribuição das distâncias de viagem dos veículos leves

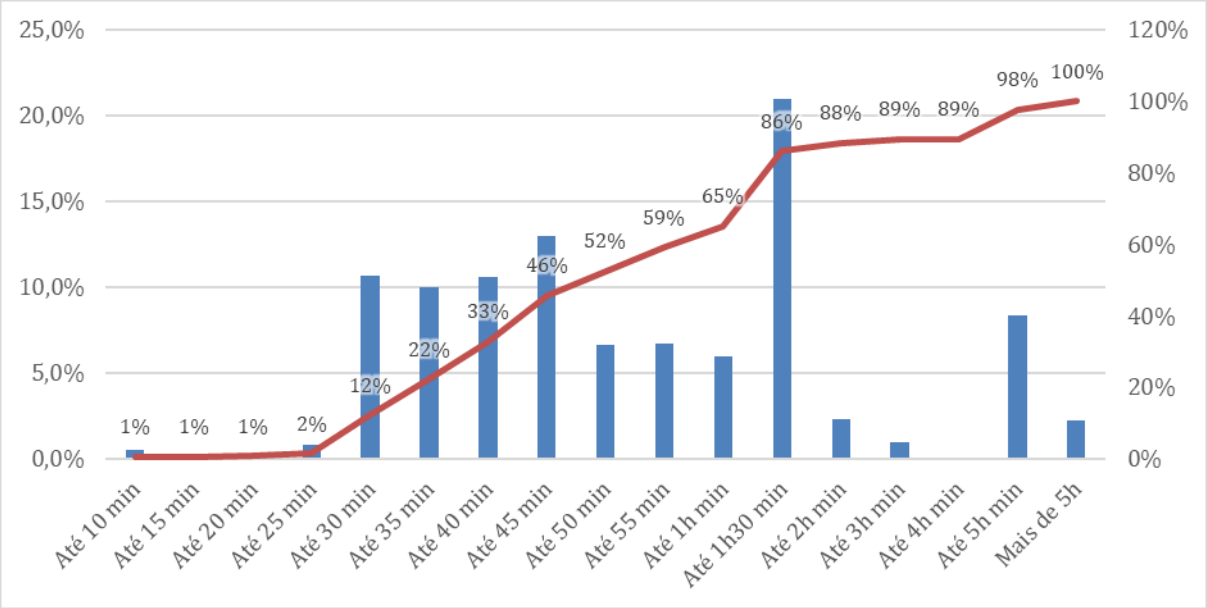

Figura 55 – Distribuição dos tempos de viagem dos veículos leves

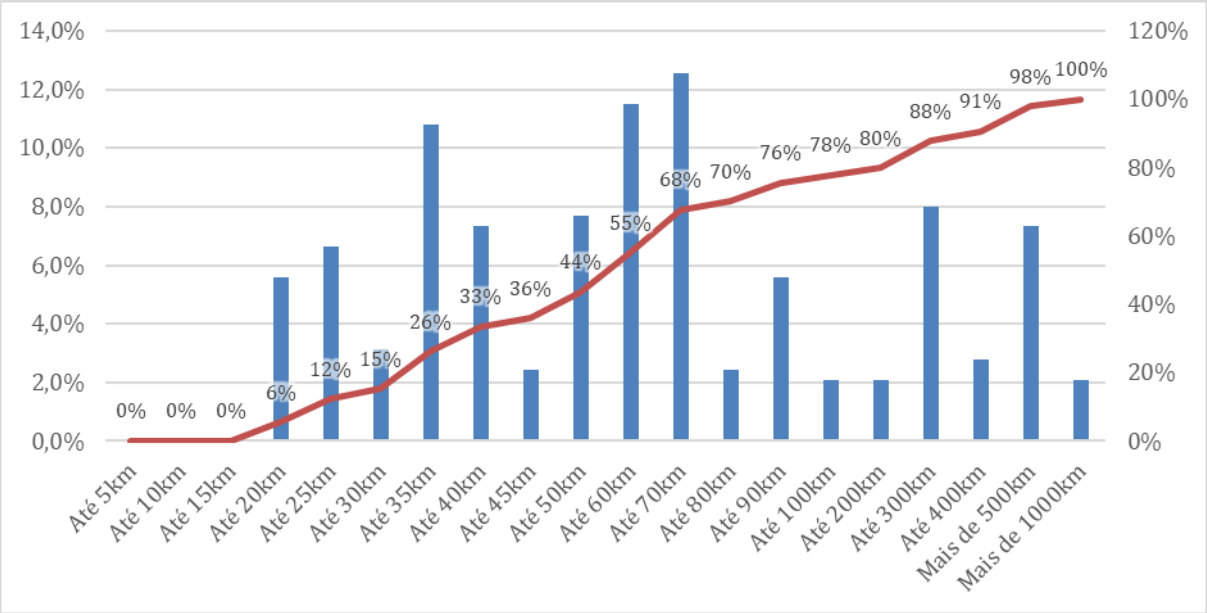

Figura 56 – Distribuição das distâncias de viagem dos caminhões com 2 eixos

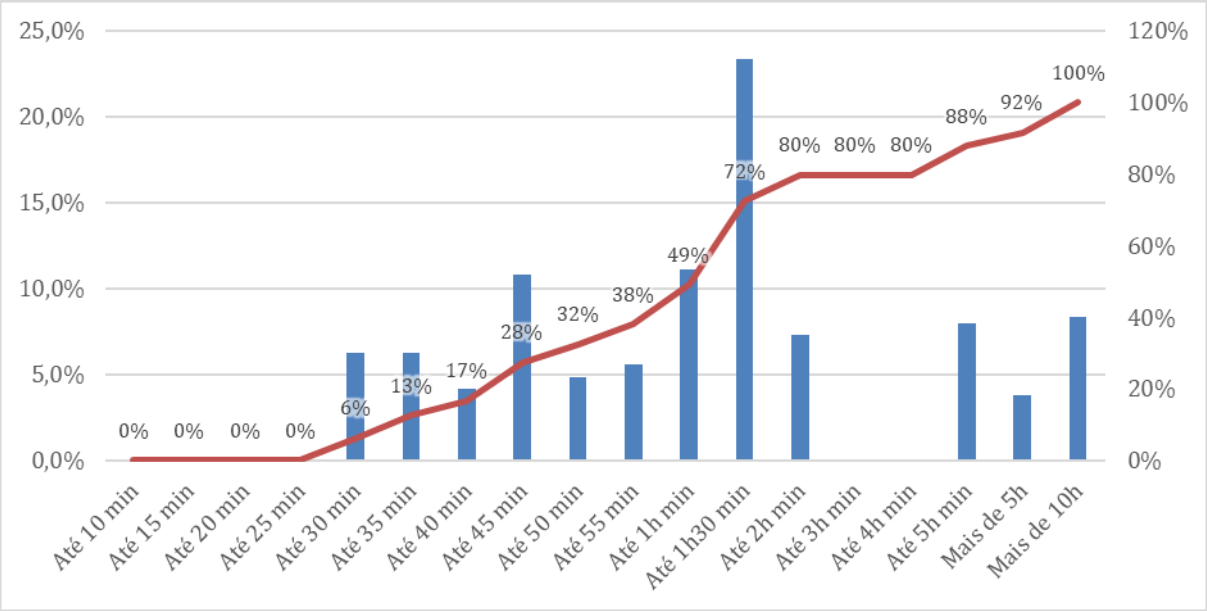

Figura 57 – Distribuição dos tempos de viagem dos caminhões com 2 eixos

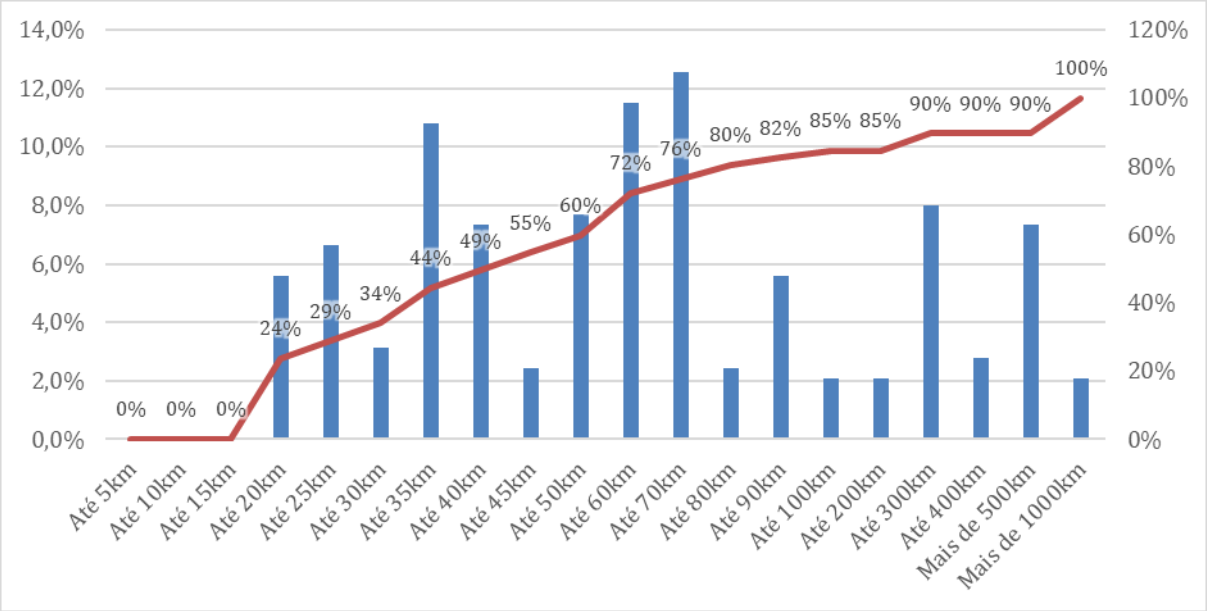

Figura 58 – Distribuição das distâncias de viagem dos caminhões com mais de 2 eixos

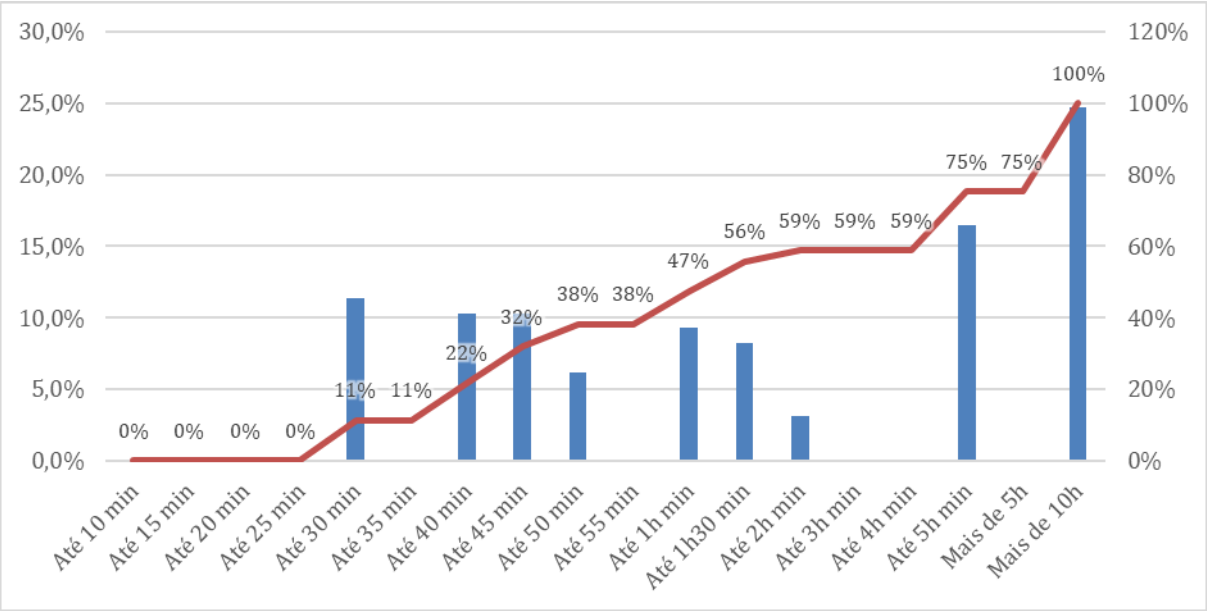

Figura 59 – Distribuição dos tempos de viagem dos caminhões com mais de 2 eixos

7.3. RESULTADOS DA PESQUISA PD

A partir da pesquisa elaborada foi realiza a coleta dos dados pela empresa Perplan nos dias 13 e 14 de junho de 2024. A seguir, são apresentados os resultados das pesquisas relacionadas às viagens nos sentidos Niterói-Rio de Janeiro e Rio de Janeiro-Niterói.

7.3.1. NITERÓI-RIO DE JANEIRO

7.3.1.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS

A seguir são apresentados os resultados da pesquisa realizada no sentido Niterói-Rio de Janeiro durante o pico da manhã, com base nas respostas de 176 participantes. A Figura 60 ilustra a distribuição dos respondentes quanto ao tempo de viagem neste período. Observa-se que a maioria dos entrevistados (cerca de 80%) relatou tempos de viagem entre 6 e 7 horas, enquanto uma proporção significativamente menor indicou tempos entre 7 e 8 horas. Os intervalos de 8 a 9 horas e 9 a 10 horas apresentam ainda menos ocorrências, representando a menor parcela dos respondentes.

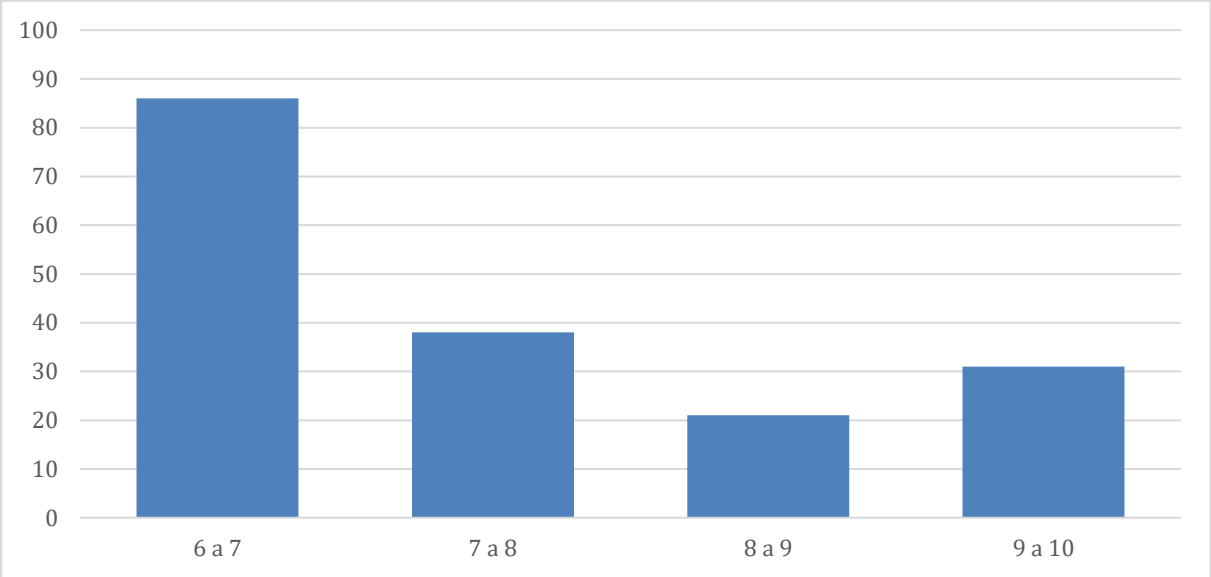

Figura 60 – Distribuição de respondentes - Manhã

A Figura 61 apresenta a distribuição dos respondentes em relação ao horário de passagem pela ponte Rio-Niterói no pico da manhã. Nota-se que o maior volume de deslocamentos ocorre entre 6h e 6h10, representando cerca de 45 respondentes, o que indica uma concentração significativa de viagens no início do período de pico. Após esse horário, observa-se uma redução progressiva no número de viagens, com pequenos picos em intervalos como 6h30, 7h e 9h.

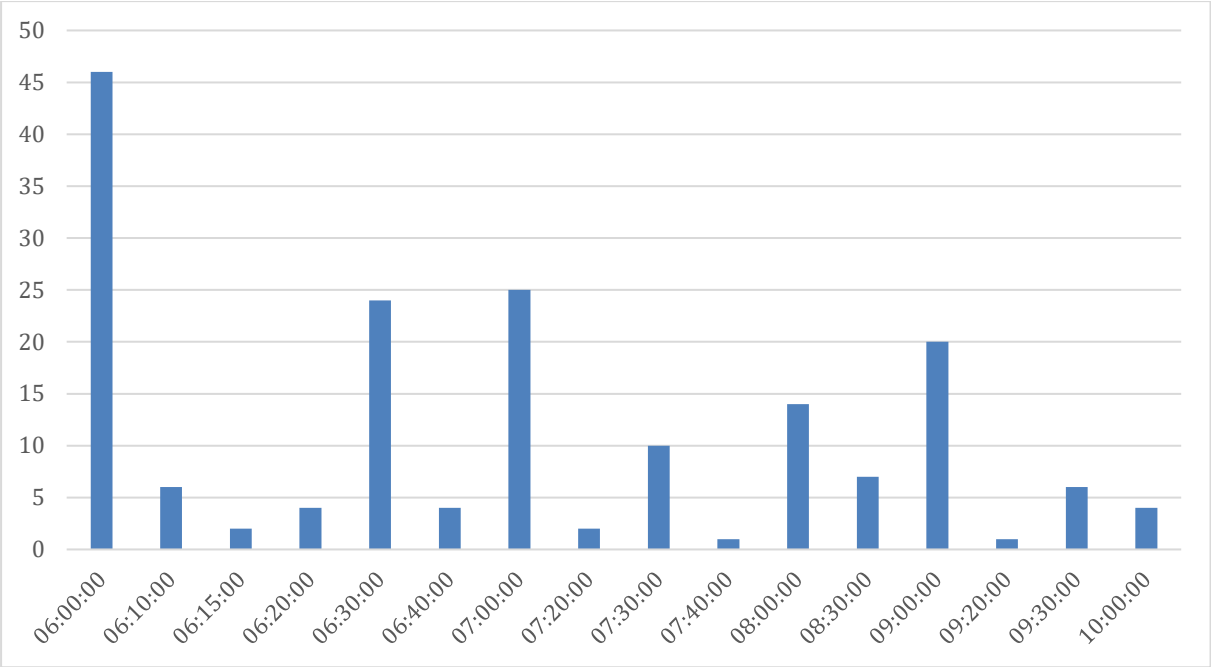

Figura 61 – Distribuição de respondentes em relação ao horário de passagem pela ponte - Manhã

A Figura 62 apresenta a frequência de passagem pela ponte Rio-Niterói dos respondentes da pesquisa. Nota-se que a maioria dos participantes atravessa a ponte de segunda a sexta-feira, representando o maior grupo, com aproximadamente 60 pessoas. Em seguida, aparecem os respondentes que realizam a travessia três dias por semana e aqueles que fazem a passagem de segunda a sábado, destacando uma frequência semanal elevada entre os usuários. Por outro lado, uma menor parcela de indivíduos realiza a travessia apenas uma vez por semana ou eventualmente.

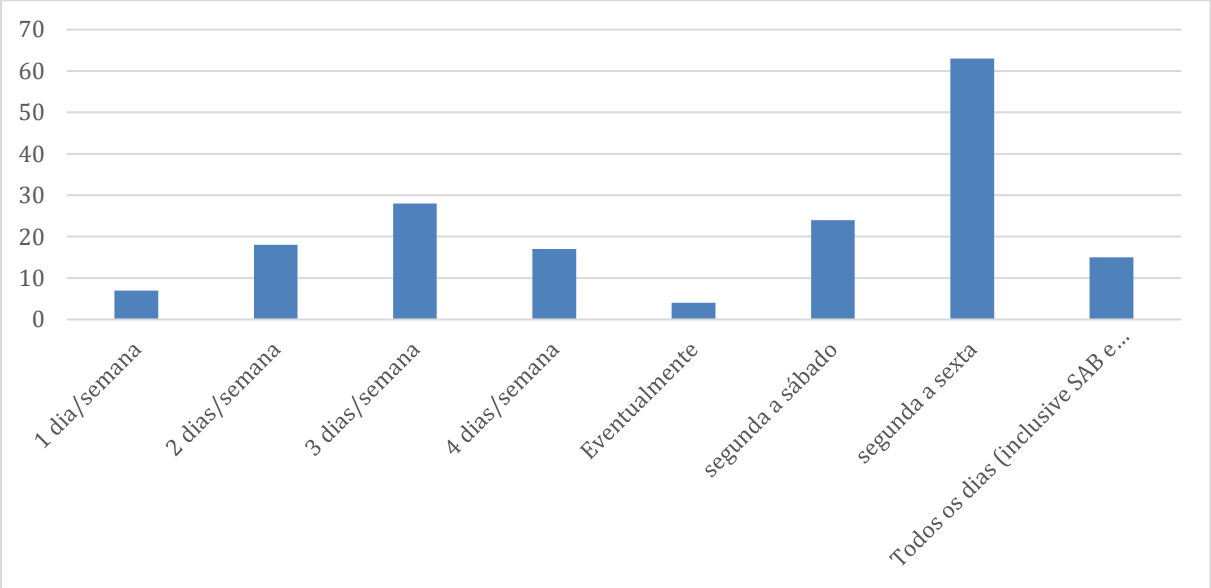

Figura 62 – Frequência de passagem pela ponte

Já a Figura 63 apresenta a frequência de passagem pela ponte Rio-Niterói agrupada em três categorias: *Pouco frequente*, *Frequente* e *Muito frequente*. Observa-se que a maioria dos respondentes classifica sua frequência de uso como *Muito frequente*, totalizando aproximadamente 110 pessoas, abrangendo aqueles que atravessam a ponte de segunda a sábado, de segunda a sexta-feira, ou todos os dias da semana. Cerca de 60 indivíduos indicaram uma frequência *Frequente*, que inclui aqueles que realizam a travessia 1, 2, 3 ou 4 vezes por semana. Já a categoria *Pouco frequente*, representando usos eventuais, corresponde a uma parcela muito pequena dos participantes.

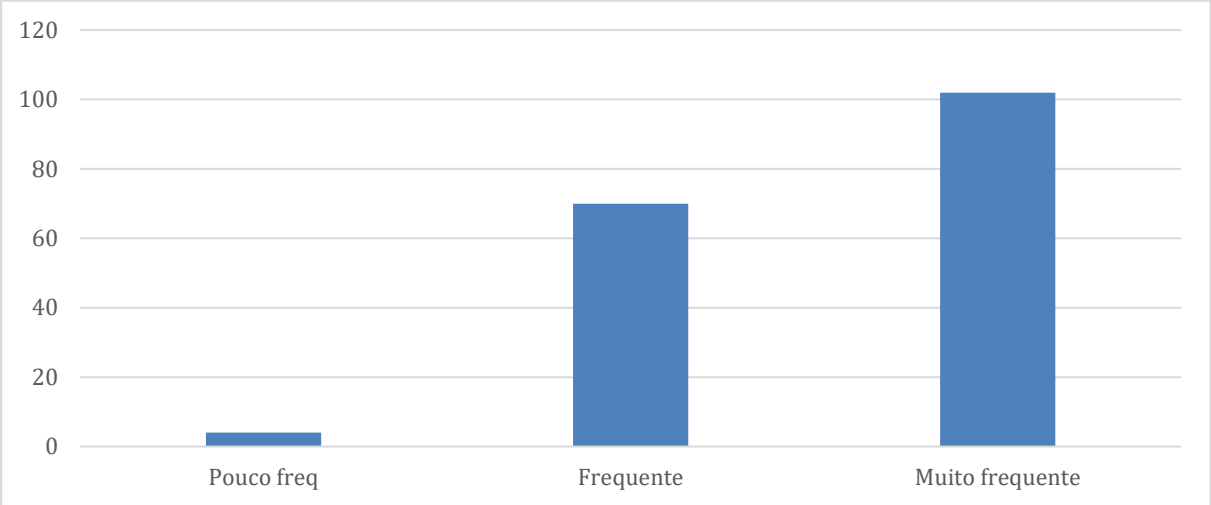

Figura 63 – Frequência de passagem pela ponte agrupado

A Figura 64 apresenta os resultados relacionados à flexibilidade de horário dos respondentes para chegar e sair de seus compromissos. Observa-se que a maior parte dos participantes (cerca de 35%) relatou ter flexibilidade tanto para chegar quanto para sair. Em seguida, 30% indicaram não ter qualquer flexibilidade de horário, evidenciando uma rotina fixa e rígida. Cerca de 15% possuem flexibilidade apenas para chegar, enquanto outros 15% apontaram flexibilidade apenas para sair.

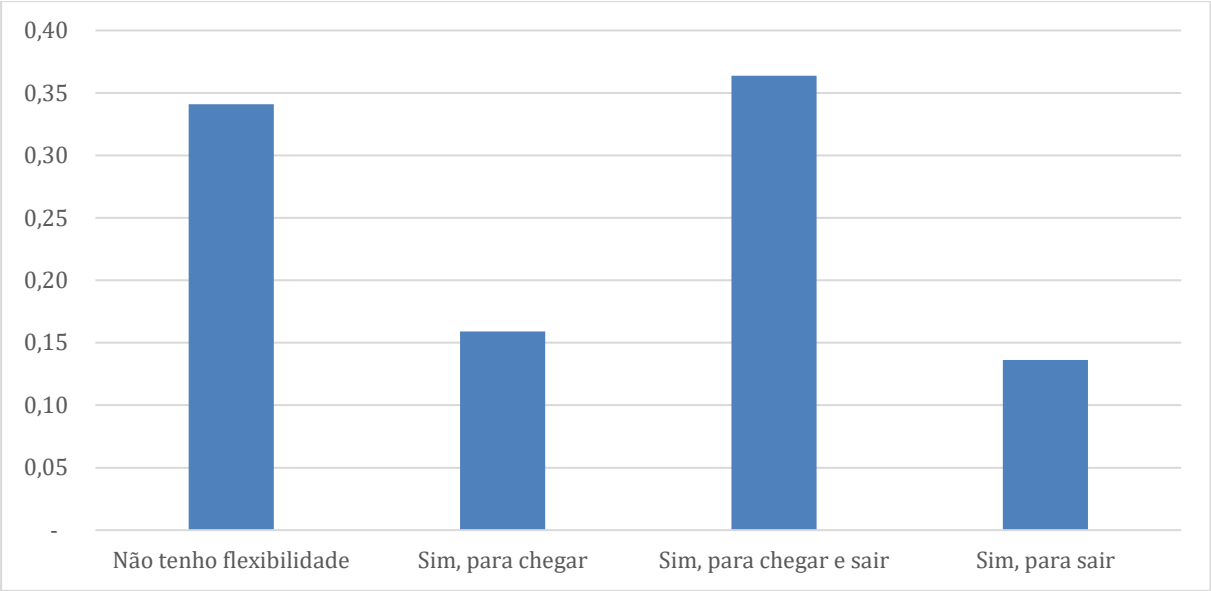

Figura 64 – Flexibilidade para chegar e sair

A Figura 65 apresenta a distribuição das escolhas de horário de passagem pela ponte Rio-Niterói, considerando três categorias: *Habitual*, *Cedo* e *Tarde*. Observa-se que o maior número de viagens ocorre entre 6h e 7h, com predominância na escolha do horário *Cedo*, representando mais de 50 respondentes, seguido por cerca de 30 respondentes no horário habitual e poucos optando por horários mais tardios. Entre 7h e 8h, há uma diminuição no número de viagens, mas ainda com preferência por horários mais cedo, acompanhada por uma menor proporção de escolhas habituais e quase nenhuma escolha por horários mais tardios. Nos intervalos de 8h a 9h e 9h a 10h, observa-se uma tendência semelhante, com maior presença de escolhas habituais e menor predominância de horários mais cedo ou mais tarde.

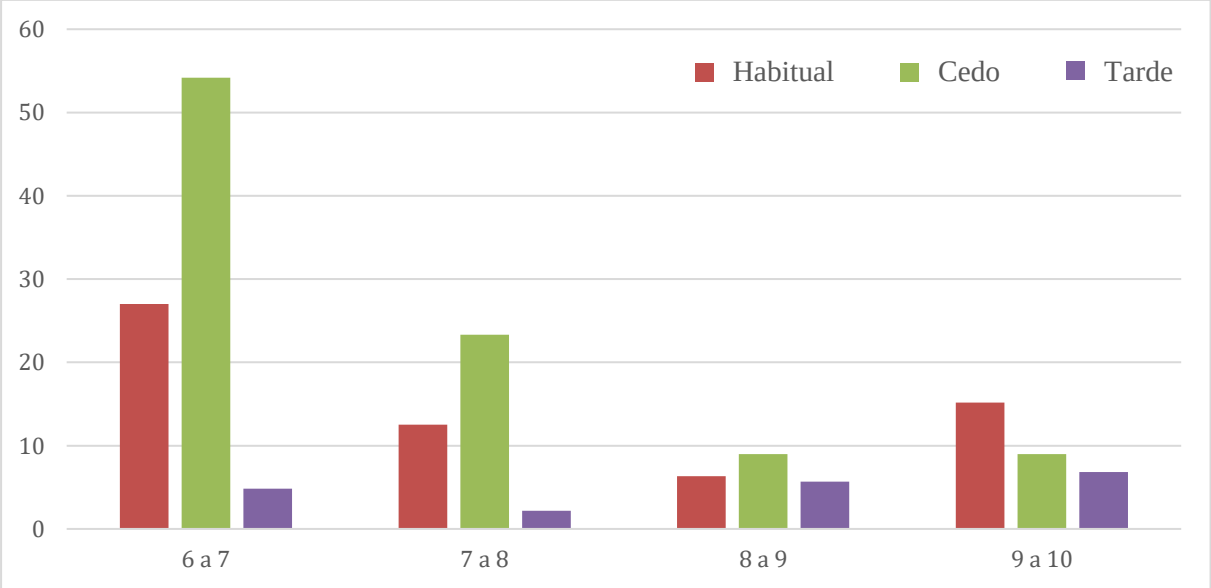

Figura 65 – Distribuição de escolhas de horário de passagem

A Figura 66 apresenta a distribuição das escolhas de horário de passagem pela ponte Rio-Niterói em termos percentuais em relação ao total de respondentes para cada faixa horária. Observa-se que, em todas as faixas horárias, a escolha por horários *Cedo* é predominante, com maior destaque nos intervalos de 6h a 7h e 7h a 8h, onde ultrapassa 10% do total em cada horário. A preferência pelo horário *Habitual* também é significativa, especialmente entre 8h e 9h e 9h e 10h, onde se equipara ou ultrapassa ligeiramente a escolha *Cedo*. A categoria *Tarde* apresenta a menor representatividade em todas as faixas horárias, permanecendo abaixo de 5% em cada intervalo.

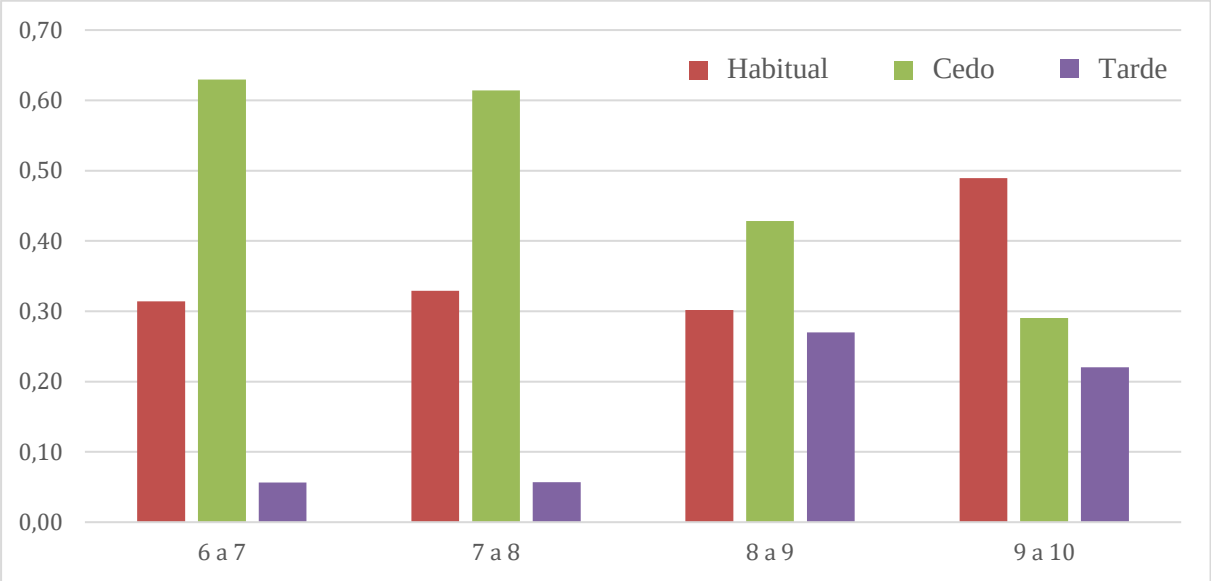

Figura 66 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% do total horário)

A Figura 67 apresenta a distribuição percentual das escolhas de horário de passagem pela ponte Rio-Niterói, categorizadas por frequência de uso. Entre os respondentes classificados como *Pouco frequente*, a maior proporção opta pelo horário *Cedo*, representando mais de 70% das escolhas, enquanto os horários *Habitual* e *Tarde* possuem percentuais menores. Para os usuários *Frequentes*, há um equilíbrio maior, com aproximadamente 50% das escolhas concentradas no horário *Cedo* e cerca de 40% no horário *Habitual*, enquanto *Tarde* permanece com uma representatividade baixa. Entre os usuários *Muito frequentes*, a preferência por horários *Cedo* também é predominante, seguida de cerca de 40% das escolhas para horários *Habitual*, enquanto *Tarde* mantém uma participação limitada.

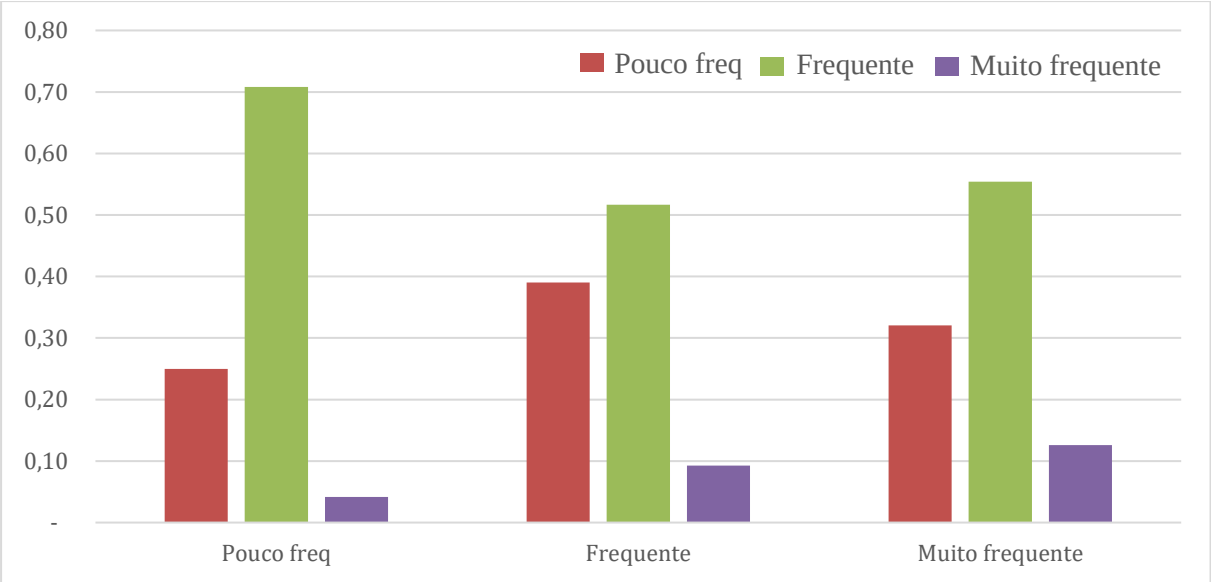

Figura 67 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% de cada frequência)

A Figura 68 apresenta a distribuição percentual das escolhas de horário de passagem pela ponte Rio-Niterói, segmentadas de acordo com os níveis de flexibilidade dos respondentes. Para aqueles que afirmaram *Não tenho flexibilidade*, observa-se uma predominância de escolhas no horário *Habitual* (cerca de 60%), seguido por uma proporção significativa de escolhas *Cedo*, enquanto *Tarde* é pouco representado. Entre os respondentes que possuem flexibilidade *Sim, para chegar*, as escolhas são amplamente dominadas pelo horário *Cedo*, representando quase 80%, com participações reduzidas de *Habitual* e praticamente nenhuma para *Tarde*. Aqueles que indicaram flexibilidade *Sim, para chegar e sair* mostram uma distribuição mais equilibrada, com uma predominância do horário *Cedo*, seguido por *Habitual* e uma pequena parcela optando por *Tarde*. Por fim, para os que possuem flexibilidade *Sim, para sair*, o horário *Cedo* continua sendo o mais escolhido, seguido de uma menor proporção para *Habitual* e *Tarde*.

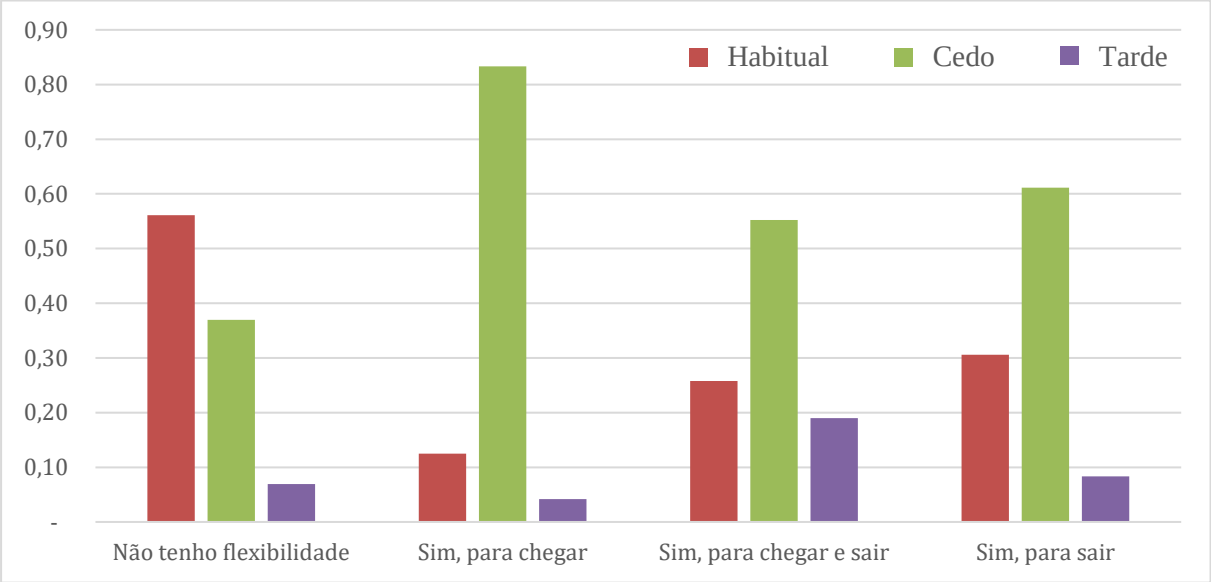

Figura 68 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% de flexibilidade)

7.3.1.2. RESULTADOS MODELOS NITERÓI-RIO DE JANEIRO

A Tabela 14 apresenta os resultados da estimativa do modelo MNL para o sentido Niterói-Rio de Janeiro, indicando as variáveis explicativas incluídas, seus coeficientes estimados e os respectivos valores do teste t robusto (Rob. t-rat.). O modelo utiliza uma constante base (ASC_1) para a alternativa *Habitual* e outras constantes (ASC_2 e ASC_3) associadas às alternativas específicas, cujos coeficientes estimados são negativos (-2.18 e -3.40) e estatisticamente significativos, sugerindo uma menor preferência relativa pelas alternativas de mudança de horário. As variáveis contínuas, como B_Custo (-0.07) e B_Tempo (-0.06), possuem coeficientes negativos e significativos, indicando que aumentos no custo do pedágio e no tempo de viagem reduzem a probabilidade de escolha da alternativa. Já a variável B_FlexE (1.35), com um coeficiente positivo e significativo, sugere que usuários com maior flexibilidade no horário de chegada são mais predispostos a mudar de horário. Outras variáveis como B_SDE e B_SDL têm efeitos menores, mas significativos, enquanto B_DistC (0.82) e B_DistM (0.75) indicam que distâncias curtas e médias afetam positivamente as escolhas de mudança de horário.

O modelo apresenta um ajuste aceitável, com rho-quadrado ajustado (0.22) indicando que o modelo explica uma proporção razoável da variabilidade nas escolhas dos indivíduos. Dependendo do contexto, valores de 0.4 podem ser considerados bons ajustes (Ortuzar e Willumnsen, 2024).

Tabela 16 - Modelo estimado para o sentido Niterói-Rio de Janeiro

	Parâmetro estimado	**Rob.t.rat.(0)**
ASC_1	0.00	NA
ASC_2	-2.18	-1.86
ASC_3	-3.40	-2.69
B_Custo	-0.068	-2.65
B_FlexE	1.35	4.25
B_Tempo	-0.06	-1.75
B_SDE	-0.007	-2.61
B_SDL	-0.006	2.02
B_DistC	0.82	1.98
B_DistM	0.75	-1.95
LL(final)	-898.07	
Rho-quadrado ajustado	0.22	
AIC	1814.15	
BIC	1858.81	

7.3.1.3. ELASTICIDADES NITERÓI-RIO DE JANEIRO

Já a Tabela 15 apresenta as elasticidades médias calculadas para o modelo Niterói-Rio de Janeiro, indicando como os indivíduos reagiriam, em média, a pequenas mudanças nas variáveis analisadas. As elasticidades foram calculadas individualmente para cada respondente, com base nos valores atuais das variáveis (SDE, SDL, custo, entre outras) e nas probabilidades de escolha associadas, e posteriormente agregadas para toda a amostra usando a técnica de enumeração amostral.

Os resultados revelam que as maiores elasticidades estão associadas ao tempo de viagem no pico, com um valor de -1.71 para a escolha do horário habitual, indicando uma alta sensibilidade das pessoas a mudanças no tempo de viagem durante o pico. A elasticidade da escolha *Depois* em relação à SDL também é significativa (-1.15), demonstrando que alterações nesta variável impactam substancialmente as decisões de escolha de horários mais tardios. Outras variáveis, como SDE (-0.52) e tarifas fora do pico (-0.06 para *Antes ou Depois* e -0.01 para *Antes*), apresentam elasticidades menores, indicando uma resposta menos intensa a mudanças nessas condições. Já a elasticidade em relação à tarifa de pico para o horário habitual (-0.09) sugere que alterações na tarifa de pico têm um impacto limitado nas escolhas de horário.

Tabela 17 – Elasticidades Niterói-Rio de Janeiro

Descrição	Valor
1. Elasticidade da prob de escolha Depois em relação a SDL	- 1.15
2. Elasticidade da prob de escolha Antes em relação a SDE	- 0.52
3. Elasticidade da prob de escolha Horario habitual em relação a tarifa pico	- 0.09
4. Elasticidade da prob de escolha Antes ou Depois em relação a tarifa fora do pico	- 0.06
5. Elasticidade da prob de escolha Horário Habitual em relação a tempo pico	- 1.71
6. Elasticidade da prob de escolha Antes em relação a tarifa fora do pico	- 0.01

Os resultados das elasticidades estimadas fornecem informações sobre os comportamentos e preferências dos usuários no sentido Niterói-Rio de Janeiro. De maneira geral, as pessoas penalizam mais atrasos do que a antecipação da viagem, demonstrando uma preferência por ajustar seus horários para mais cedo em vez de aceitar sair mais tarde. Essa preferência reflete uma percepção de impacto mais negativo associado ao atraso, o que é corroborado pelos valores das elasticidades.

A elasticidade de -1.15 em relação ao SDL indica que a probabilidade de escolher a alternativa *Sair Depois* diminui 1,15% para cada aumento de 1% no atraso em relação ao horário preferido. Esse resultado evidencia que os atrasos são fortemente penalizados pelos usuários, que percebem a necessidade de sair mais tarde como uma situação altamente negativa. Quanto maior o atraso necessário, maior a resistência dos indivíduos, levando-os a evitar esta alternativa. Por outro lado, embora as pessoas também penalizem a antecipação do horário de saída, a elasticidade de -0.52 em relação ao SDE mostra que a sensibilidade a essa penalização é menor do que à penalização por atrasos. A probabilidade de escolher *Sair Antes* diminui 0,52% para cada aumento de 1% no tempo de antecipação. Isso sugere que, embora a

antecipação seja vista como um custo, ela é preferida em relação ao atraso, uma vez que o impacto negativo percebido é menor.

As elasticidades em relação à tarifa de pedágio no pico (-0.09) e fora do pico (-0.01) indicam uma baixa sensibilidade ao custo. Um aumento de 1% na tarifa de pico reduz a probabilidade de escolha do horário habitual em apenas 0,09%, enquanto as tarifas fora do pico apresentam um impacto ainda menor. Além disso, o tempo de viagem parece ser um fator mais relevante do que uma pequena economia no custo, o que explica a falta de atratividade de tarifas mais baixas fora do pico. No entanto, caso o pedágio no horário habitual aumente significativamente, ele pode começar a impactar as escolhas dos usuários, forçando-os a considerar alternativas como sair antes ou depois.

A elasticidade de -1.71 em relação ao tempo de viagem no pico destaca a importância desse fator nas decisões de horário. Um aumento de 1% no tempo de viagem reduz em 1,71% a probabilidade de escolha pelo horário habitual, indicando uma alta sensibilidade dos usuários ao tempo de deslocamento. Este é o impacto mais significativo observado entre as variáveis analisadas, reforçando que o tempo de viagem é um fator crítico para as decisões de escolha do horário. A percepção negativa de longos tempos de viagem no pico leva os usuários a abandonarem a escolha pelo horário habitual, optando por alternativas que lhes permitam evitar esse custo.

Esses resultados apontam que o tempo de viagem é o principal determinante das escolhas de horário, seguido pelos atrasos (SDL), enquanto custos possuem menor relevância. Isso implica que intervenções voltadas à redução dos tempos de viagem, especialmente durante o pico, podem ser mais eficazes para influenciar comportamentos do que estratégias baseadas apenas na alteração de tarifas. Ainda que, políticas busquem minimizar atrasos e oferecer alternativas viáveis para antecipação podem encontrar maior aceitação entre os usuários. Por outro lado, a baixa sensibilidade ao custo sugere que tarifas mais baixas fora do pico podem não ser suficientes para atrair usuários sem outras melhorias associadas, como menor tempo de viagem nesses períodos.

As equações apresentadas permitem calcular o impacto de variações em variáveis-chave, como preço e tempo de viagem, sobre a demanda. Por exemplo, uma variação percentual no preço do pedágio no horário de pico de R$3 para R$4, representando um aumento de 33% ($\triangle X / X = (4 - 3) / 3 = 0,33$), aplicada a uma demanda atual de 1000 veículos e considerando uma elasticidade de -0.09, resultaria em uma nova demanda de 1000 x (1 – 0,09 x 0,33) = 970 veículos. Este exemplo demonstra uma redução de 30 veículos na demanda devido ao aumento do preço, evidenciando a sensibilidade moderada dos usuários a alterações na tarifa.

Essa metodologia pode ser estendida para simular políticas, como a redução de tarifas fora do pico para atrair mais usuários ou o impacto de aumentos no tempo de viagem durante horários de congestionamento. Ao ajustar variáveis como preço ou tempo de viagem, é possível prever mudanças na demanda e avaliar a eficácia de diferentes estratégias. Por exemplo, uma redução no preço pode atrair novos usuários, enquanto o aumento do tempo de viagem pode

desestimular deslocamentos em horários críticos. Assim, as elasticidades são utilizadas para estimar a variação na demanda em resposta a mudanças pontuais ou marginais em atributos específicos, como preço ou tempo de viagem, utilizando a seguinte equação:

$$Nova\ Demanda = Demanda\ Atual \cdot \left(1 + Elasticidade \cdot \frac{\Delta X}{X}\right) \qquad \textit{Equação 11}$$

7.3.1.4. APLICAÇÃO DO MODELO

A seguir, são apresentados os gráficos que mostram como variações nos atributos influenciam a escolha de horário de viagem, permitindo visualizar os impactos dessas mudanças nos diferentes cenários analisados. Posteriormente, são detalhados os resultados da aplicação do modelo para a previsão de demanda, cujos cenários foram utilizados na simulação de tráfego realizada por meio da microssimulação no software VISSIM.

A Figura 69 apresenta a participação de mercado das opções de horário de saída em função de variações no custo do pedágio fora do pico. Observa-se que a participação da escolha *Habitual* se mantém estável ao longo das diferentes faixas de preço, com uma leve tendência de aumento conforme o custo do pedágio fora do pico se eleva, especialmente a partir de valores acima de R$6,00. Este comportamento sugere que os usuários que preferem o horário habitual são menos sensíveis a mudanças no custo fora do pico. No entanto, as opções *Antes* e *Depois* apresentam uma leve queda na participação de mercado à medida que o custo do pedágio fora do pico aumenta. A escolha *Antes* apresenta uma redução mais consistente em comparação à *Depois*, indicando que a antecipação do horário é mais sensível ao custo adicional fora do pico. O que reflete a percepção dos usuários de que a economia em tempo e conveniência no horário habitual é mais relevante do que a possível redução de custos fora do pico.

Já a Figura 70 mostra como a participação de mercado das opções de horário de saída varia em função do custo do pedágio no pico. Observa-se uma tendência inversa à da análise do pedágio fora do pico. À medida que o custo do pedágio no pico aumenta, a participação de mercado do horário habitual diminui gradativamente, com uma queda acentuada a partir de R$6,00, momento em que as opções de mudança de horário (*Antes* e *Depois*) ganham representatividade. Na faixa mais alta de preços (R$9,30), a soma de *Antes e Depois* ultrapassa *Habitual*, indicando que um pedágio muito elevado no pico força os usuários a ajustarem seus horários de saída.

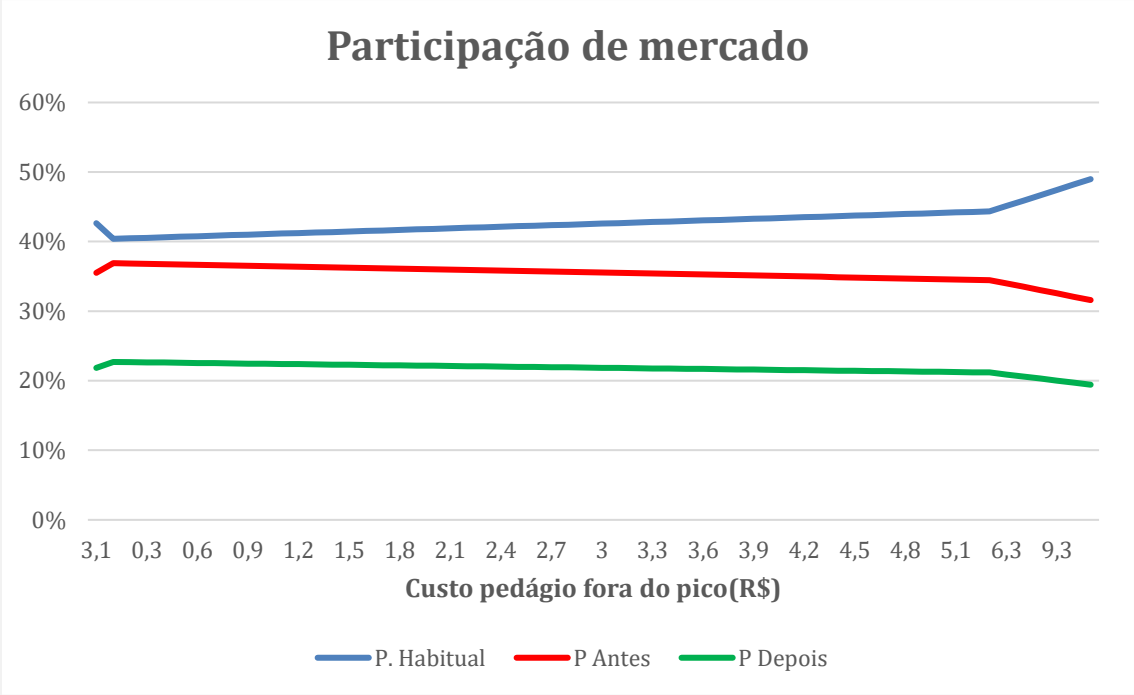

Figura 69 – Variando o custo do pedágio fora do pico

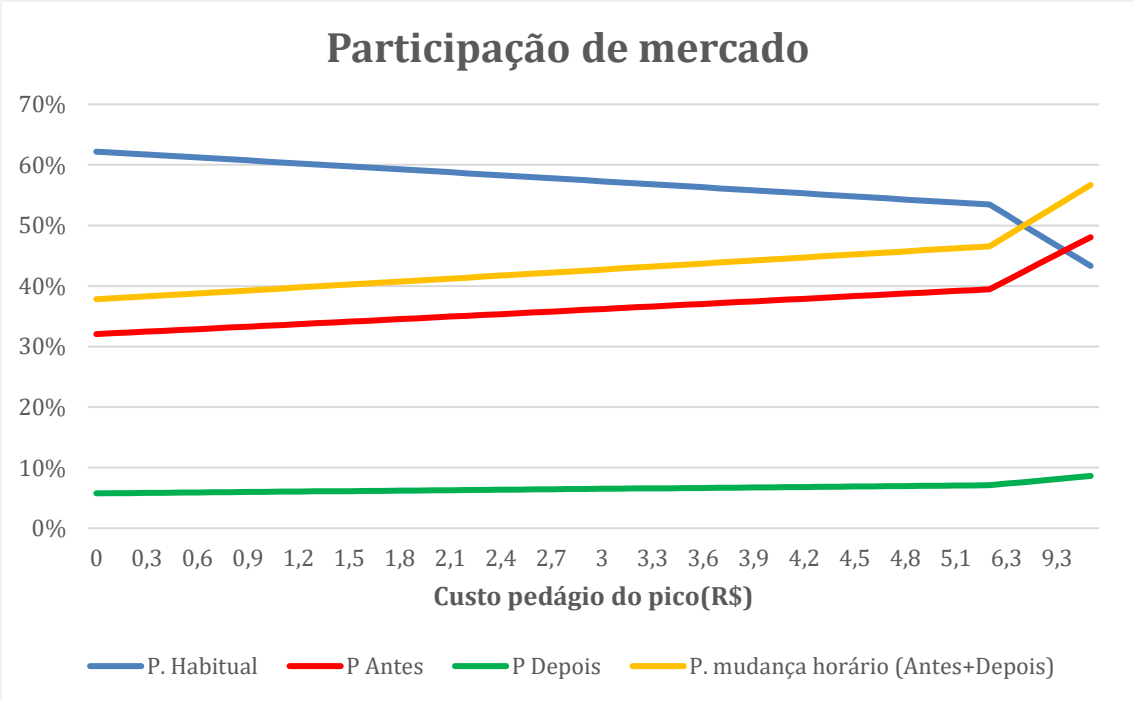

Figura 70 – Variando o custo do pedágio no pico

A Figura 71 mostra como a participação de mercado das diferentes alternativas de horário varia em função de incrementos no tempo de viagem no horário habitual, expressos como percentual em relação ao tempo fora do pico. Observa-se que, à medida que o tempo de viagem no horário habitual aumenta, a participação de mercado do *Habitual* diminui, caindo de aproximadamente 80% para níveis próximos de 0% em incrementos superiores a 100%. Já as alternativas de mudança de horário ganham participação significativa. A opção *Antes* apresenta crescimento

constante, cruzando com Habitual em torno de 48% de incremento no tempo de viagem e estabilizando-se em níveis próximos a 50%. A opção *Depois* também apresenta um leve aumento, mas permanece em níveis relativamente baixos, demonstrando que a antecipação é preferida em relação ao atraso. Quando combinadas (*Mudança de Horário*), as alternativas *Antes e Depois* atingem 100% de participação à medida que o tempo no horário habitual se torna inviável.

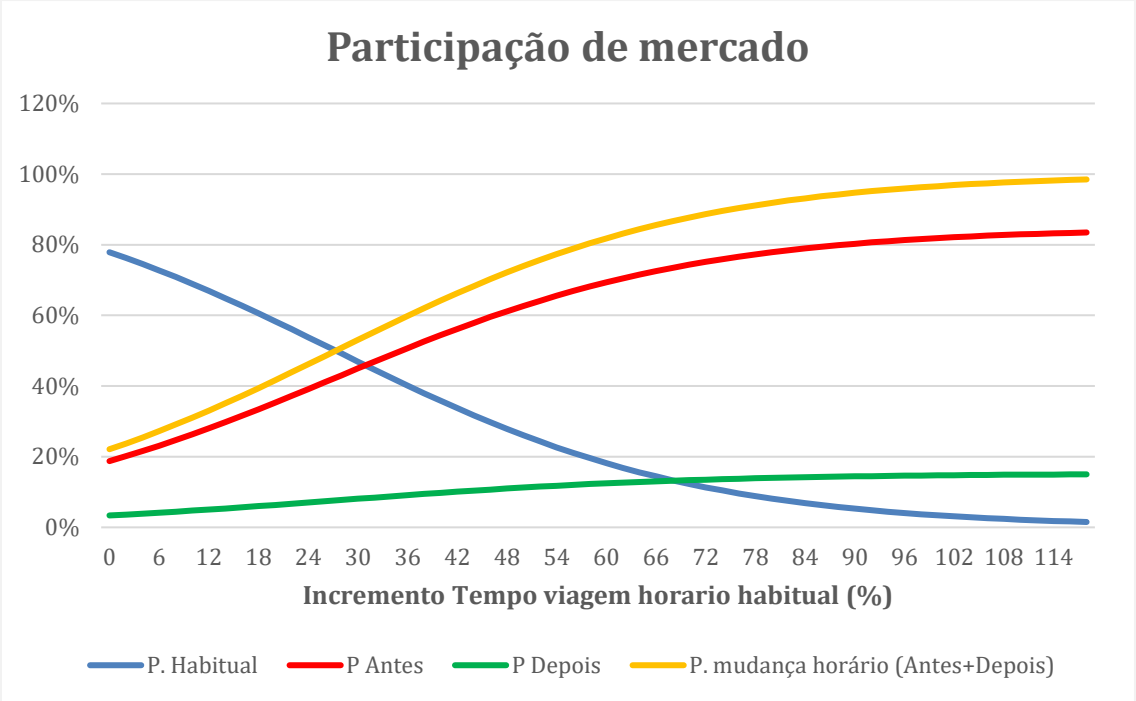

Figura 71 – Variando tempo de viagem no pico (expresso como % em relação ao horário fora do pico)

A Figura 72, conforme o SDE aumenta (ou seja, as pessoas precisam sair cada vez mais cedo), observa-se um crescimento significativo na probabilidade de manter o horário habitual, especialmente após o SDE atingir cerca de 40 minutos. Este comportamento reflete o fato de que, quando o custo de sair mais cedo se torna elevado em termos de tempo e conveniência, as pessoas preferem não mudar seu horário. Por outro lado, a probabilidade de escolher sair *Antes* diminui de forma acentuada à medida que o SDE aumenta, pois o custo de sair muito cedo se torna cada vez mais inconveniente. A opção sair *Depois* permanece praticamente constante, indicando que o aumento do SDE afeta diretamente apenas a antecipação, sem grande impacto na escolha por atrasar a viagem.

Já na Figura 73, conforme o SDL aumenta (as pessoas precisam sair cada vez mais tarde), a probabilidade de manter o horário habitual cresce gradualmente, enquanto a probabilidade de sair *Depois* diminui, refletindo a penalidade percebida por atrasar o horário de saída além do preferido. A probabilidade de sair *Antes* apresenta um leve aumento, sugerindo que algumas pessoas preferem antecipar a viagem para evitar os inconvenientes associados ao atraso. Esse comportamento destaca como o custo de sair tarde pode motivar uma parcela de usuários a buscar alternativas como antecipar a saída.

Ambas as figuras reforçam que espalhar a demanda ao longo do dia, especialmente para reduzir o pico, exige intervenções direcionadas. Apenas reduzir o custo do pedágio fora do pico não é suficiente, dado o impacto significativo do tempo de viagem e das penalidades percebidas por alterações nos horários preferidos. Outras estratégias podem incluir:

(i) A redução de pedágios combinada com melhorias nos tempos de viagem fora do pico pode tornar a antecipação mais atrativa. Pode ser complementado por campanhas que informem os motoristas sobre os benefícios de viajar fora do pico, incluindo economia de tempo, custo e impactos ambientais.

(ii) Parcerias com empresas para oferecer vantagens, como cupons de desconto, acesso a serviços de conveniência ou exclusividade em pistas menos congestionadas, poderiam aumentar a adesão ao deslocamento fora do pico.

(iii) A introdução de faixas reversíveis ou preferenciais para os horários fora do pico pode atrair mais usuários, oferecendo uma experiência mais eficiente e confortável.

(iv) Aumentar o pedágio durante o pico pode desencorajar os deslocamentos nesse período, forçando a redistribuição da demanda.

(v) Implementar políticas de horário flexível em conjunto com grandes empregadores pode reduzir a concentração de viagens nos horários de pico, contribuindo para uma distribuição mais uniforme ao longo do dia.

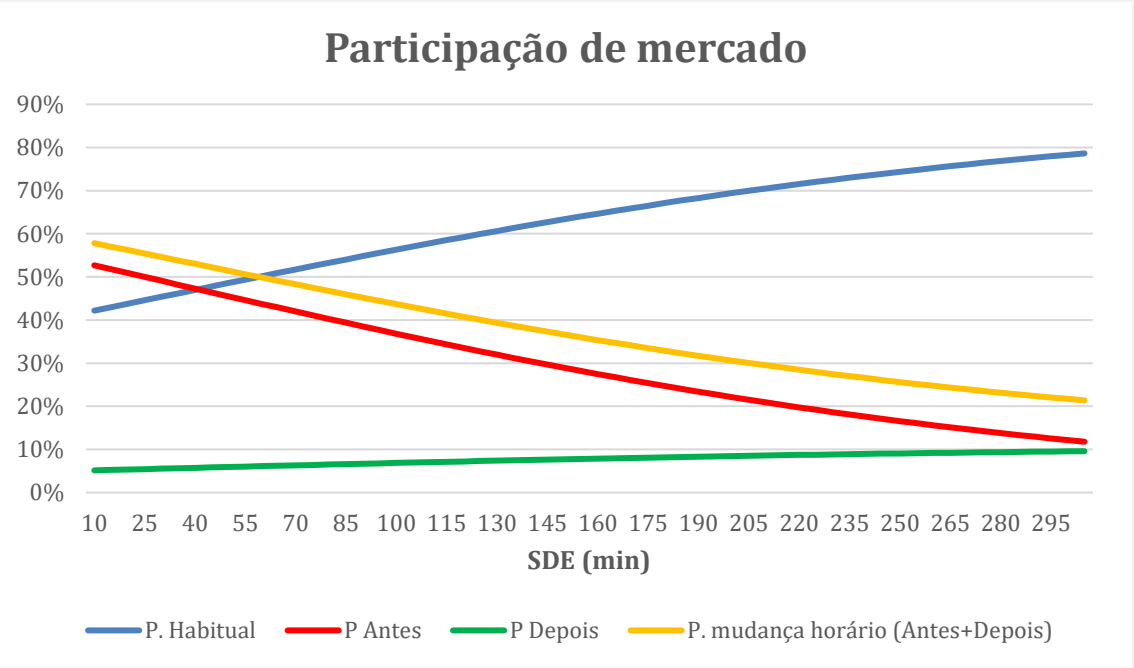

Figura 72 – Variando SDE, ou seja, o tempo antes em relação ao horário preferido

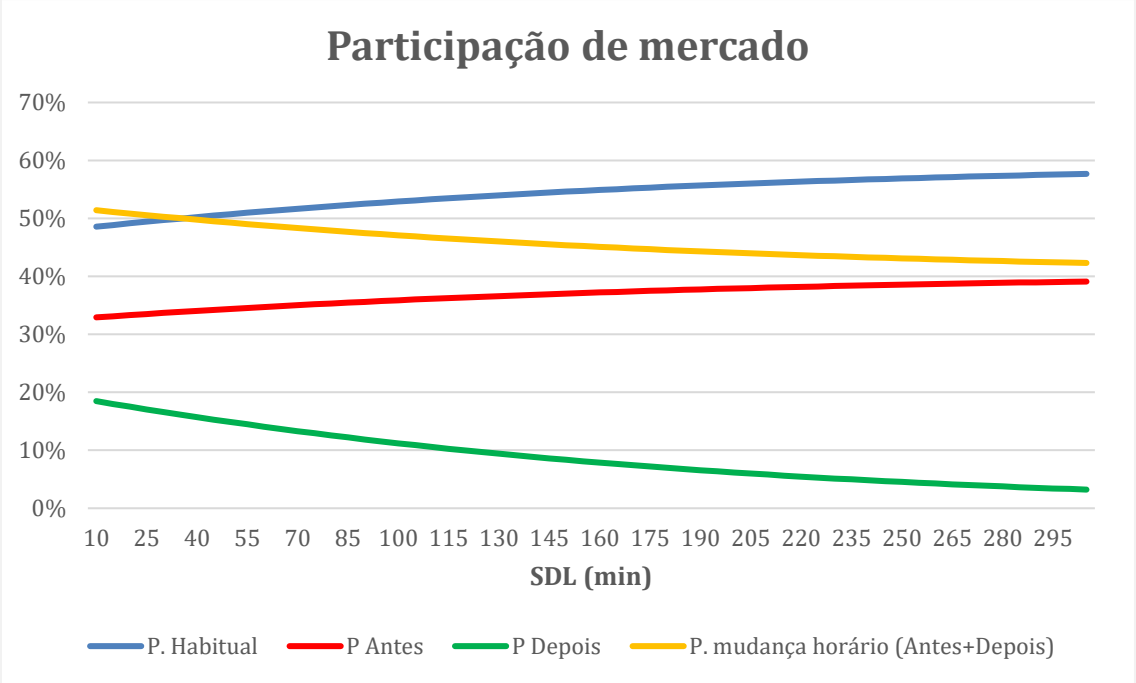

Figura 73 – Variando SDL, ou seja, o tempo depois em relação ao horário preferido

Os modelos estimados foram aplicados considerando a antecipação do horário de saída em 15 e 30 minutos, com base nas alternativas de escolha de horário de viagem. Inicialmente, foram avaliadas três alternativas: manter o horário atual, sair mais cedo ou sair mais tarde. No entanto, os resultados apresentados na seção anterior indicaram que os respondentes demonstraram maior disposição para antecipar suas viagens (sair mais cedo), enquanto poucos estavam dispostos a postergar (sair mais tarde). Assim, para maior precisão, as análises foram realizadas em cenários reduzidos a duas alternativas: manter o horário atual ou antecipar o horário de saída.

Os resultados da aplicação do modelo mostraram que, para uma antecipação de 15 minutos, entre 32% e 40% dos condutores estariam dispostos a ajustar seus horários no período entre as 5:00 e 8:00 para sair mais cedo, dependendo do horário habitual. Os percentuais estimados para as probabilidades de escolha do horário habitual e de antecipação de 15 minutos são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 18 – Antecipação de 15 minutos

Horário de saída	P. Habitual	P Antes
6:00	0.60	0.40
6:15	0.63	0.37
6:30	0.63	0.37
7:00	0.68	0.32
7:15	0.67	0.33
7:30	0.60	0.40
8:00	0.64	0.36
8:30	0.59	0.41
9:00	0.67	0.33
9:15	0.77	0.23
9:30	0.63	0.37
10:00	0.59	0.41

De forma similar, para uma antecipação de 30 minutos, entre 30% e 38% dos condutores demonstraram disposição para ajustar seus horários no período entre as 5:00 e 8:00. Os resultados detalhados para essa antecipação são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 19 – Antecipação de 30 minutos

Horário de saída	P. Habitual	P Antes
6:00	0.62	0.38
6:15	0.65	0.35
6:30	0.65	0.35
7:00	0.70	0.30
7:15	0.69	0.31
7:30	0.62	0.38
8:00	0.66	0.34
8:30	0.62	0.38
9:00	0.69	0.31
9:15	0.79	0.21
9:30	0.65	0.35
10:00	0.61	0.39

Os resultados reforçam a preferência dos usuários por manter o horário habitual em grande parte dos casos, especialmente em horários mais próximos do pico (7:00 e 8:00), mas indicam uma parcela significativa disposta a antecipar suas viagens, dependendo do cenário analisado. Essa disposição à antecipação pode ser explorada em políticas de redistribuição de demanda, especialmente em horários de maior congestionamento.

7.3.2. RIO DE JANEIRO-NITERÓI

7.3.2.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS

A Figura 74 apresenta a distribuição de 288 respondentes no sentido Rio de Janeiro-Niterói durante o período da tarde. Observa-se uma concentração significativa de viagens entre 16h e 19h, com os maiores volumes de deslocamentos registrados entre 16h e 17h e 17h e 18h, ambos alcançando quase 100 respondentes. O intervalo de 18h a 19h mantém um número relevante de participantes, mas apresenta uma leve redução em relação aos períodos anteriores. No entanto, no intervalo de 19h a 20h, o número de viagens diminui.

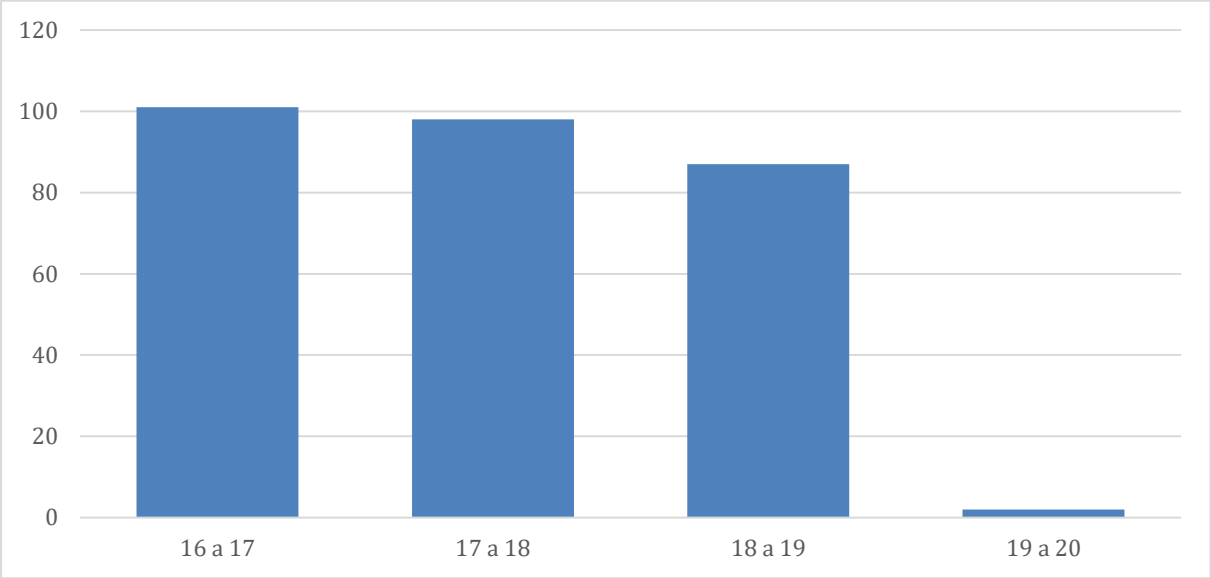

Figura 74 – Distribuição de respondentes -Tarde

A Figura 75 apresenta a distribuição dos respondentes em relação ao horário de passagem pela ponte no sentido Rio de Janeiro-Niterói durante o período da tarde. Observa-se que os horários com maior concentração de deslocamentos são 16h30, 17h e 18h, cada um atingindo cerca de 40 respondentes. Esses picos evidenciam a preferência por horários próximos ao final do expediente e início da noite, caracterizando o período de maior demanda de retorno. Entre esses picos, os deslocamentos são mais dispersos, com menos respondentes distribuídos em intervalos variados. A partir de 18h30, há uma redução no número de viagens, indicando que a maior parte dos deslocamentos já ocorreu antes desse horário.

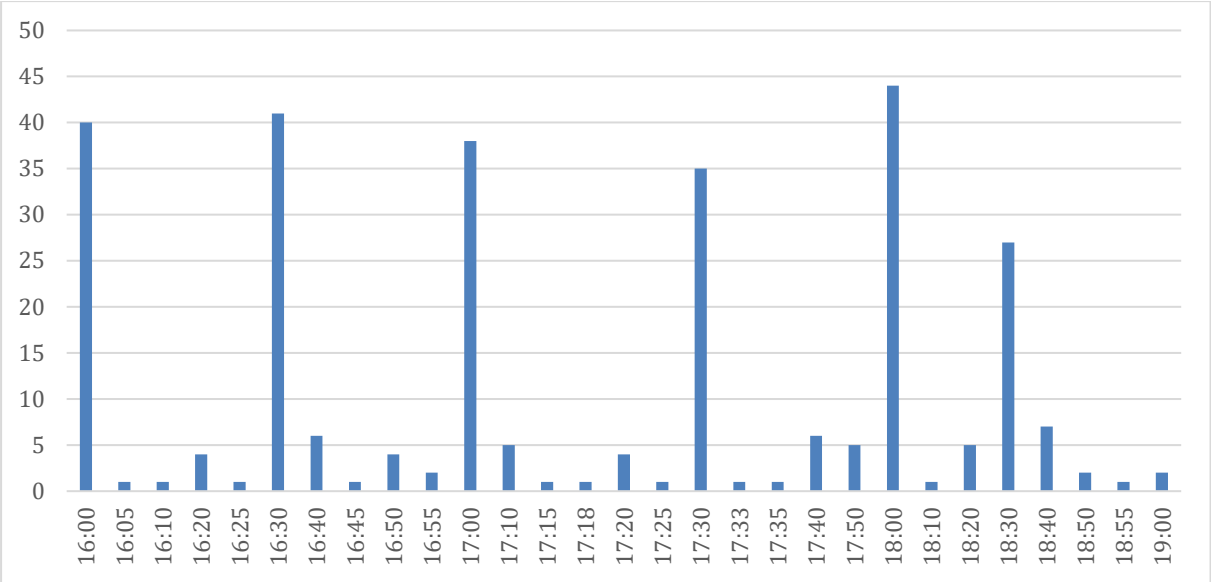

Figura 75 – Distribuição de respondentes em relação ao horário de passagem pela ponte - Tarde

A Figura 76 apresenta a distribuição percentual das escolhas de horário de passagem pela ponte Rio-Niterói durante a tarde, considerando as categorias *Habitual*, *Cedo* e *Tarde*. Observa-se que, nos intervalos de maior movimentação, como entre 16h e 17h e 17h e 18h, a escolha do horário habitual é predominante, representando aproximadamente 40% das preferências, com *Cedo* alcançando uma participação relevante, enquanto *Tarde* permanece menos representativo. Entre 18h e 19h, a escolha pelo horário habitual segue como a mais escolhida, mas apresenta redução em comparação aos períodos anteriores. No entanto, no intervalo de 19h a 20h, observa-se uma mudança acentuada, com o horário habitual dominando completamente as escolhas, possivelmente devido à redução geral no volume de viagens e à preferência por horários já estabelecidos.

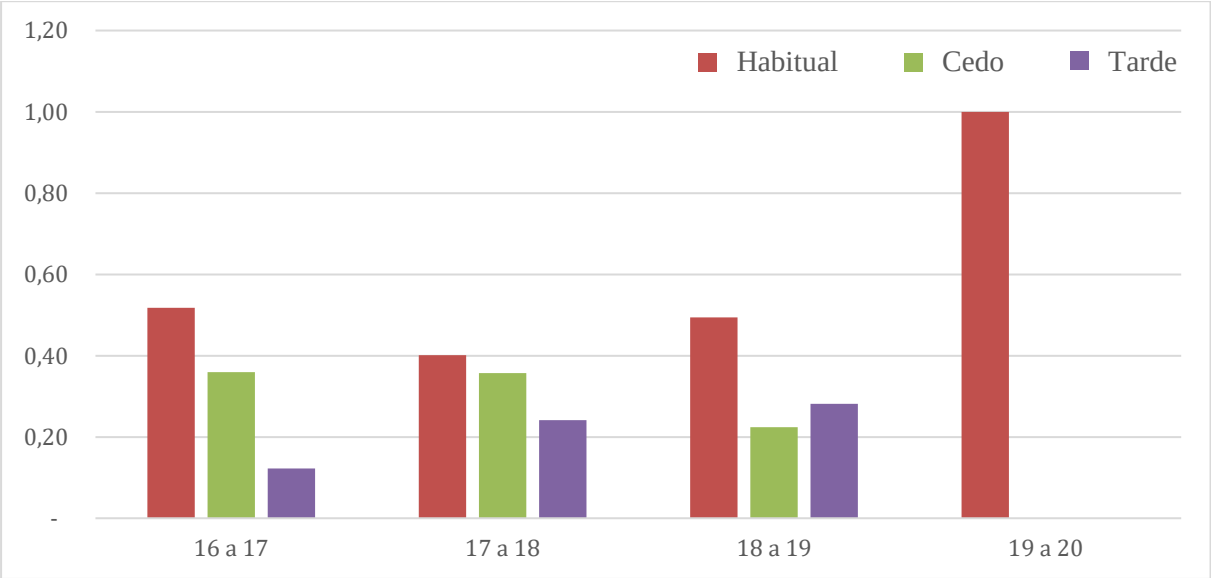

Figura 76 – Distribuição de escolhas de horário de passagem (% do total horário)

A Figura 77 apresenta a frequência de passagem no sentido Rio de Janeiro-Niterói reportada pelos respondentes. Observa-se que a maior parte dos deslocamentos ocorre de segunda a sexta-feira, com quase 100 respondentes indicando essa rotina, evidenciando um padrão relacionado a compromissos regulares, como trabalho ou estudo. O segundo maior grupo corresponde àqueles que realizam a travessia três dias por semana, seguido por usuários que atravessam quatro dias por semana, indicando um volume considerável de viagens em dias úteis. Outras categorias, como deslocamentos eventuais ou aqueles que ocorrem de segunda a sábado, apresentam uma participação menor, mas ainda significativa. No entanto, os respondentes que realizam a travessia todos os dias, incluindo sábados e domingos, ou apenas uma vez por semana, correspondem às menores parcelas, destacando um perfil mais específico de uso da ponte.

Já a Figura 78 apresenta a frequência de passagem pela ponte Rio-Niterói agrupada em três categorias: *Pouco frequente*, *Frequente* e *Muito frequente*. Nota-se que a maioria dos respondentes pertence à categoria *Muito frequente*, representando mais de 140 usuários, o que evidencia a predominância de deslocamentos regulares e constantes pela ponte. A categoria *Frequente* também é significativa, com mais de 100 respondentes, refletindo um uso consistente, mas menos intenso do que o grupo *Muito frequente*. A categoria *Pouco frequente* inclui menos de 30 respondentes.

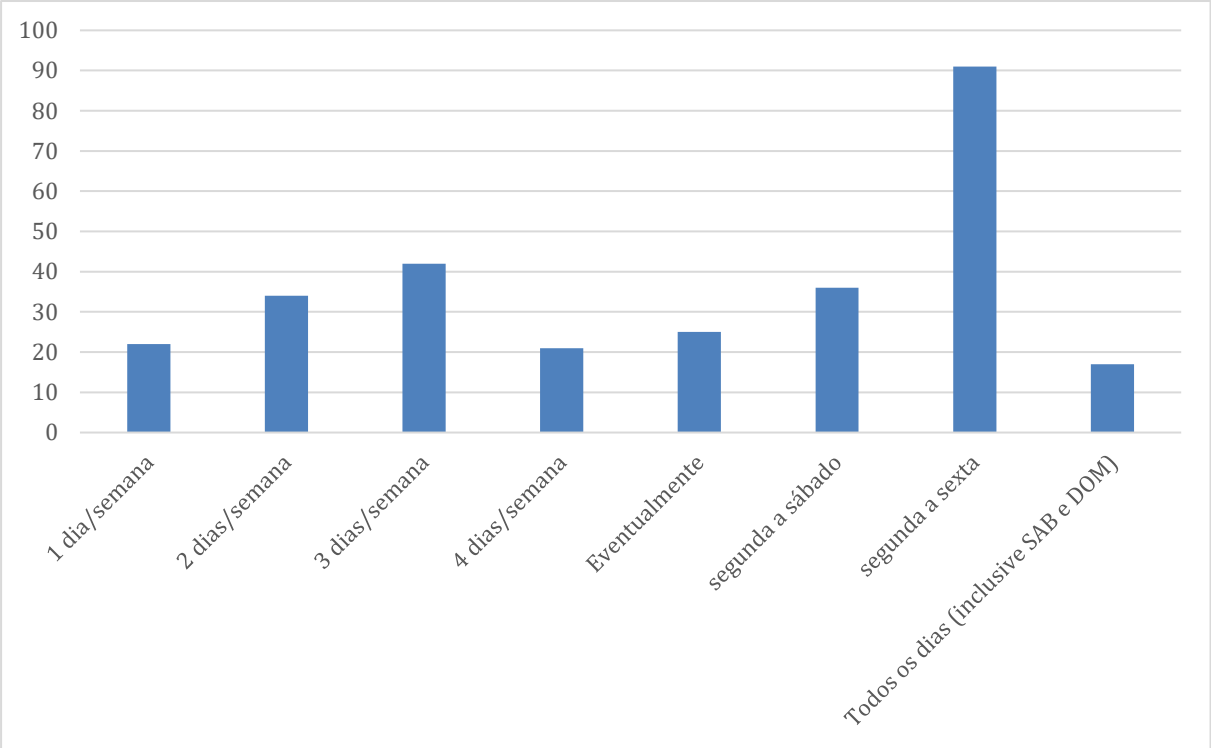

Figura 77 – Frequência de passagem pela ponte

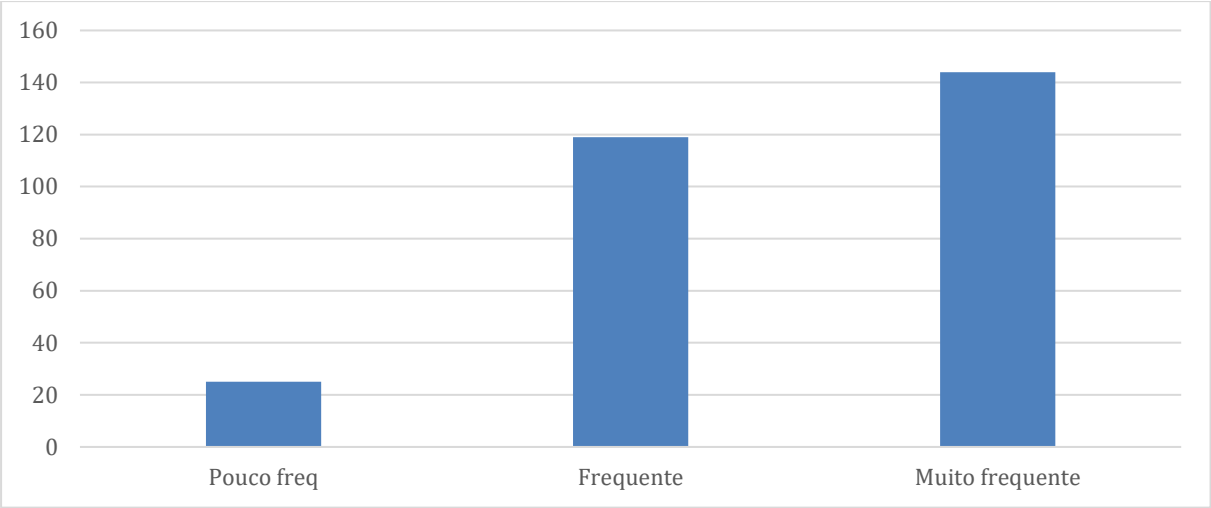

Figura 78 – Frequência de passagem pela ponte agrupado

A Figura 79 apresenta a flexibilidade dos respondentes em relação aos horários para chegar e sair. Observa-se que a maior parcela dos participantes (cerca de 40%) indicou não possuir qualquer flexibilidade. Em contrapartida, aproximadamente 35% dos respondentes afirmaram ter flexibilidade tanto para chegar quanto para sair, sugerindo que uma parte significativa possui mais liberdade para ajustar seus horários de deslocamento. Os grupos com flexibilidade apenas para chegar ou apenas para sair representam parcelas menores, ambas com cerca de 10% cada, indicando que a flexibilidade parcial é menos comum entre os usuários da ponte.

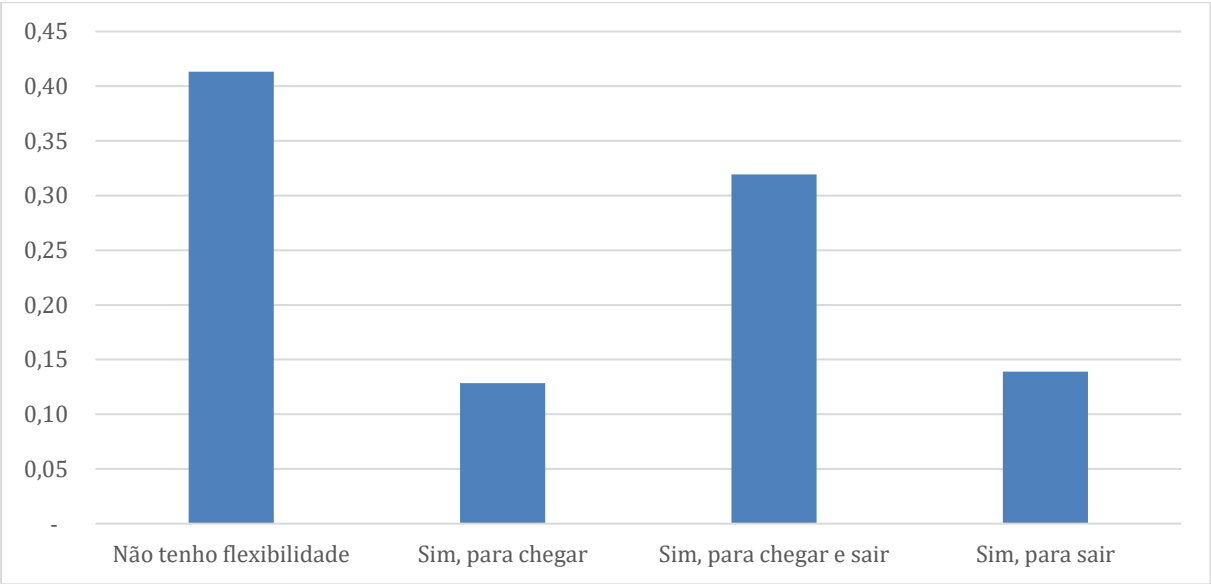

Figura 79 – Flexibilidade para chegar e sair

7.3.2.2. RESULTADOS MODELOS RIO DE JANEIRO-NITERÓI

A Tabela 20 apresenta os resultados do modelo MNL estimado para o sentido Rio de Janeiro-Niterói, destacando os coeficientes estimados e os valores do teste t. O modelo revela informações importantes sobre as preferências dos usuários em relação às variáveis incluídas. As constantes (ASC_2 e ASC_3) associadas as alternativas de horário Antes e Depois apresentam coeficientes negativos e estatisticamente significativos (-2.43 e -2.67,

respectivamente), indicando que as alternativas associadas a essas constantes têm menor preferência em relação à base (ASC_1) associada ao horário habitual de passagem pela ponte (Habitual). A variável B_Custo, com coeficiente negativo (-0.03) e significativa, indica que aumentos no custo do pedágio reduzem a probabilidade de escolha, mas com um impacto relativamente menor.

A variável B_FlexE (1.22) tem um coeficiente positivo e significativo, sugerindo que a flexibilidade no horário para chegar exerce um impacto positivo substancial nas escolhas dos usuários. O coeficiente negativo de B_Tempo (-0.065) reflete a sensibilidade dos usuários ao tempo de viagem, com maior tempo reduzindo a probabilidade de escolha. As variáveis relacionadas ao SDE (B_SDE, -0.006) e SDL (B_SDL, -0.005) apresentam coeficientes negativos e significativos, reforçando que tanto antecipar quanto atrasar o horário preferido são penalizados pelos usuários, embora a magnitude seja menor em relação ao tempo de viagem.

A variável B_DistC (0.43) é positiva e significativa, indicando que a distância central influencia positivamente as escolhas, possivelmente refletindo maior conveniência para viagens mais curtas em áreas centrais. O valor do Rho-quadrado ajustado (0.23) sugere que o modelo captura uma proporção razoável da variação nas escolhas dos usuários.

Tabela 20 – Modelo estimado para o sentido Rio de Janeiro-Niterói

	Estimate	**Rob.t.rat.(0)**
ASC_1	0	NA
ASC_2	-2.43	-4.45
ASC_3	-2.66	-3.75
B_Custo	-0.03	-1.98
B_FlexE	1.22	5.42
B_Tempo	-0.065	-3.20
B_SDE	-0.006	-2.37
B_SDL	-0.005	-1.96
B_DistC	0.43	1.98
Rho-quadrado ajustado	0.23	

7.3.2.3. ELASTICIDADES RIO DE JANEIRO-NITERÓI

A Tabela 21 apresenta as elasticidades estimadas para o sentido Rio de Janeiro-Niterói. As elasticidades foram calculadas individualmente, com base nos valores atuais das variáveis e probabilidades de escolha, e posteriormente agregadas para toda a amostra utilizando enumeração amostral. Os resultados indicam que o tempo de viagem no pico exerce o maior impacto nas escolhas, com uma elasticidade de -2.01 em relação à probabilidade de manter o horário habitual. Isso significa que um aumento de 1% no tempo de viagem no pico resulta em uma redução de 2.01% na probabilidade de escolha pelo horário habitual, destacando a alta sensibilidade dos usuários ao tempo de deslocamento nesse período.

A elasticidade em relação ao SDL para a probabilidade de escolher *Depois* é de -0.62, indicando que a penalidade por atrasos tem um impacto significativo, mas menos intenso que o tempo de pico. Para o SDE, a elasticidade de -0.42 sugere que a antecipação do horário é penalizada pelos

usuários, embora com menor intensidade em comparação aos atrasos. Esses valores refletem a preferência dos usuários por evitar tanto sair muito cedo quanto atrasar a saída em relação ao horário desejado. As elasticidades relacionadas ao custo, como a tarifa de pico (-0.04) e a tarifa fora do pico (-0.03 para *Antes ou Depois* e -0.01 para *Antes*), mostram uma sensibilidade bastante baixa dos usuários a mudanças no preço. Isso pode ser explicado pela percepção de que o custo atual é razoável ou pela prioridade dada a outros fatores, como tempo de viagem e conveniência. Esses resultados reforçam que o tempo de viagem e as penalidades associadas ao SDL e SDE são os principais determinantes das escolhas de horário dos usuários no sentido Rio de Janeiro-Niterói.

Tabela 21 – Elasticidades sentido Rio de Janeiro-Niterói

Descrição	Valor
1. Elasticidade da prob de escolha Depois em relação a SDL	- 0.62
2. Elasticidade da prob de escolha Antes em relação a SDE	- 0.42
3. Elasticidade da prob de escolha Horário habitual em relação a tarifa pico	- 0.04
4. Elasticidade da prob de escolha Antes ou Depois em relação a tarifa fora do pico	- 0.03
5. Elasticidade da prob de escolha Horário Habitual em relação a tempo pico	- 2.01
6. Elasticidade da prob de escolha Antes em relação a tarifa fora do pico	- 0.01

As elasticidades estimadas medem a sensibilidade dos usuários às mudanças nos atributos das viagens, como tempo e tarifa, e os resultados indicam padrões consistentes entre os sentidos Niterói-Rio de Janeiro e Rio de Janeiro-Niterói. No período da manhã, os usuários demonstraram maior aversão a atrasos, preferindo ajustar seus horários para sair antes, ao invés de sair depois. Esse comportamento reflete uma penalização significativa por atrasos, destacando a importância de cumprir os horários planejados. Já à tarde, um padrão semelhante é observado, mas com diferenças: enquanto os usuários penalizam tanto a antecipação quanto o atraso, a penalização por atrasos (sair mais tarde) continua sendo mais intensa, embora tolerem essa opção com maior facilidade em comparação à viagem da manhã.

Comparando os dois sentidos, os resultados indicam que os usuários são mais inflexíveis em relação a atrasos na ida (sentido Rio de Janeiro) e mostram maior flexibilidade para tolerar atrasos na volta (sentido Niterói). Dado que, apesar da preferência por manter os horários planejados, os usuários estão mais dispostos a ajustar seus horários para sair mais tarde no retorno, enquanto na ida, ajustes são menos aceitáveis. Essa dinâmica reflete a diferença nas prioridades: no início do dia, a pontualidade para compromissos parece ser crucial, enquanto no retorno há maior flexibilidade, possivelmente devido a menos restrições de horário.

A sensibilidade às tarifas continua baixa em ambos os períodos, com elasticidade de -0.04 em relação à escolha de manter o horário habitual no horário de pico. Uma vez que, aumentos no custo têm um impacto limitado nas decisões de horário, reforçando que os usuários priorizam tempo e conveniência em vez de custo, especialmente na ida. No sentido Rio de Janeiro-Niterói, a sensibilidade ao preço é ainda menor, indicando que políticas tarifárias isoladas podem não ser eficazes para mudar comportamentos. Assim, combinar mudanças tarifárias com incentivos,

como melhores tempos de viagem ou melhorias no conforto, pode ser mais eficaz para redistribuir a demanda.

No entanto, o tempo de viagem é um fator crítico em ambos os períodos, com forte sensibilidade a aumentos no tempo, especialmente no sentido Rio de Janeiro-Niterói. Sendo assim, ressalta-se a importância de estratégias para reduzir os tempos de viagem, como a introdução de faixas reversíveis ou melhorias operacionais que otimizem o fluxo. Além disso, ações que melhorem a percepção de conforto e eficiência, aliadas à comunicação sobre os benefícios de evitar os horários de pico, podem contribuir para um deslocamento mais equilibrado entre os horários e sentidos.

7.3.2.4. APLICAÇÃO DO MODELO

A Figura 80 mostra a variação da participação de mercado em função do custo do pedágio fora do pico, destacando a preferência geral dos usuários pelo horário habitual. Mesmo com o aumento no custo do pedágio fora do pico, a participação no horário habitual permanece elevada, com uma leve tendência de aumento conforme o custo se eleva, atingindo cerca de 70%. As alternativas sair *Antes* e sair *Depois* apresentam uma leve redução em participação à medida que o custo aumenta, mas com sair *Antes* sempre mantendo uma participação maior que sair *Depois*. Esse comportamento está alinhado com as elasticidades estimadas, que mostram que os usuários penalizam mais intensamente a opção de sair mais tarde em relação à antecipação do horário.

Já a Figura 81 apresenta a participação de mercado das diferentes alternativas de horário em função do custo do pedágio no pico. Observa-se que o horário habitual mantém a maior participação ao longo das variações de custo, embora apresente uma leve tendência de queda à medida que o pedágio aumenta, especialmente a partir de R$6,00. Mesmo assim, ele permanece a escolha dominante, refletindo a preferência dos usuários por manter seus horários planejados. A participação das alternativas *Antes* e *Depois* apresenta um leve aumento à medida que o custo do pedágio no pico sobe, indicando que alguns usuários começam a considerar ajustes nos horários. A soma dessas duas categorias (*Mudança de Horário*) cresce de forma mais significativa, sugerindo que as penalidades associadas ao aumento do custo podem estimular uma pequena redistribuição da demanda para horários alternativos.

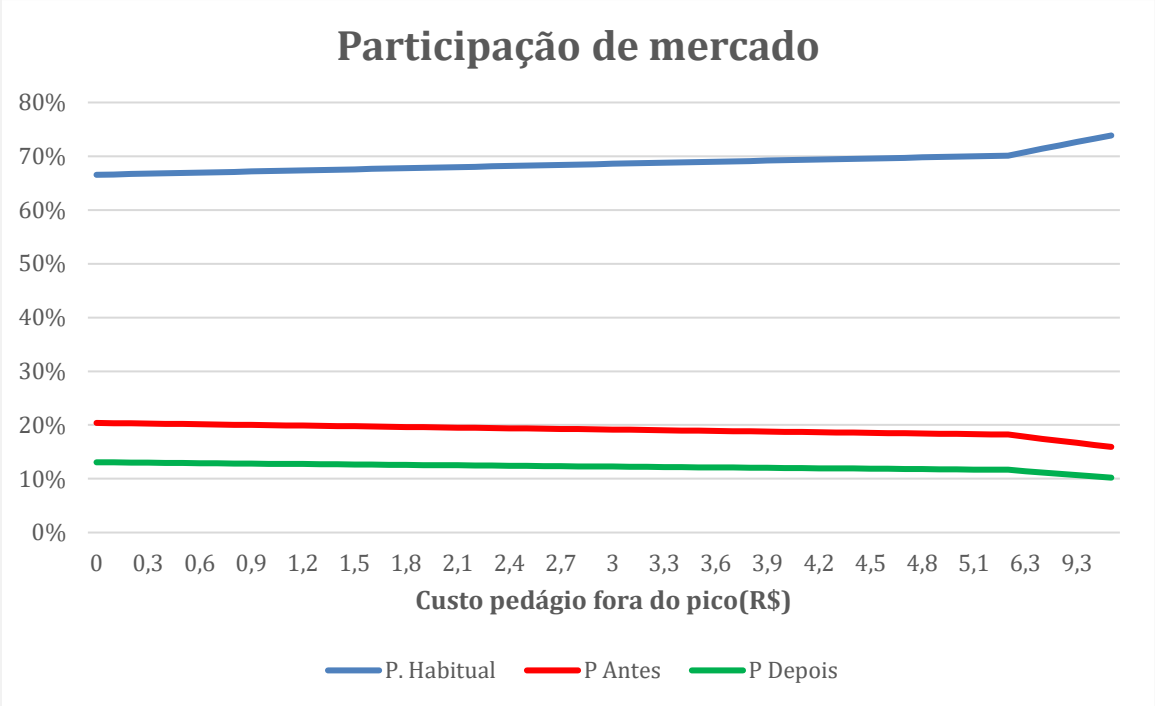

Figura 80 – Variando o custo do pedágio fora do pico

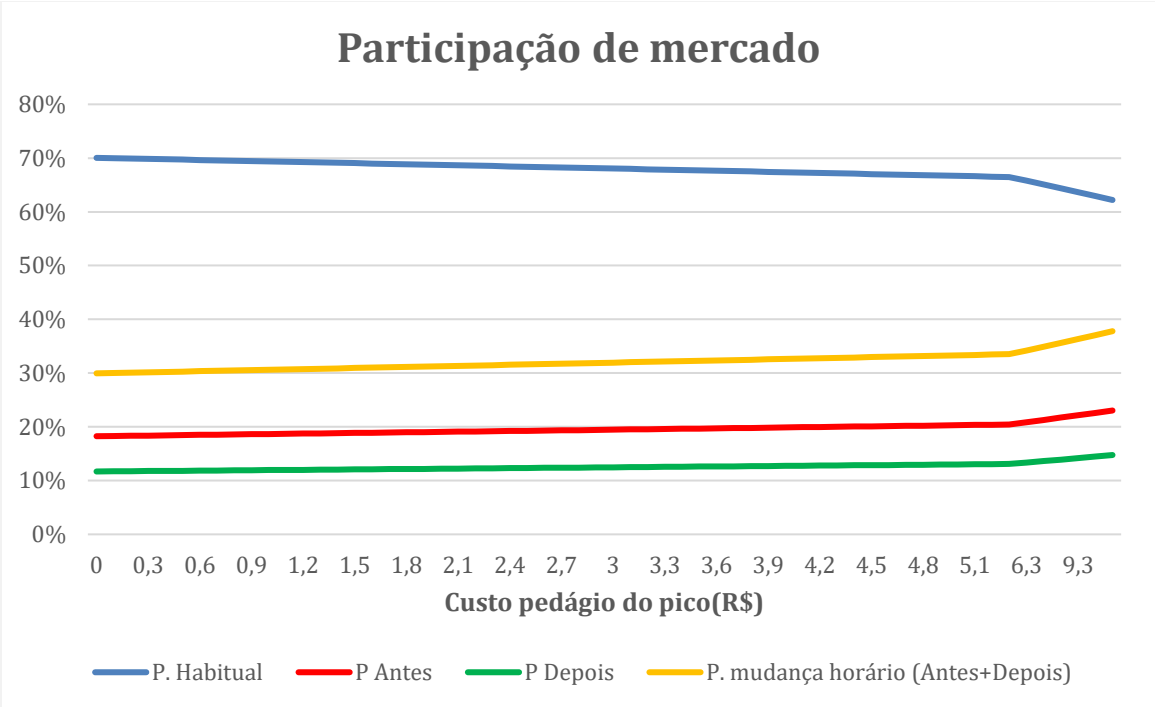

Figura 81 – Variando o custo do pedágio no pico

A Figura 82 ilustra a variação da participação de mercado em função de incrementos no tempo de viagem no horário habitual, expressos como porcentagem em relação ao tempo de viagem fora do pico. Observa-se uma mudança drástica nas preferências dos usuários à medida que o tempo de viagem no horário habitual aumenta. Inicialmente, a participação no horário habitual é dominante, começando em cerca de 80%. No entanto, à medida que o tempo de viagem no horário habitual aumenta, sua participação cai significativamente, cruzando com a soma das

opções de mudança de horário (Antes + Depois, linha amarela) por volta de 48% de incremento no tempo. Quando o aumento do tempo de viagem ultrapassa 100%, a participação no horário habitual praticamente desaparece.

Já a participação em sair *Antes* cresce continuamente, mostrando que os usuários preferem ajustar para horários mais cedo à medida que o custo em tempo no horário habitual aumenta. A participação em sair *Depois* também apresenta um crescimento, mas em menor escala, evidenciando a menor atratividade dessa alternativa devido à penalidade percebida por atrasos. A soma de *Antes* e *Depois* cresce rapidamente, superando o horário habitual como a escolha preferida em cenários com tempos de viagem elevados.

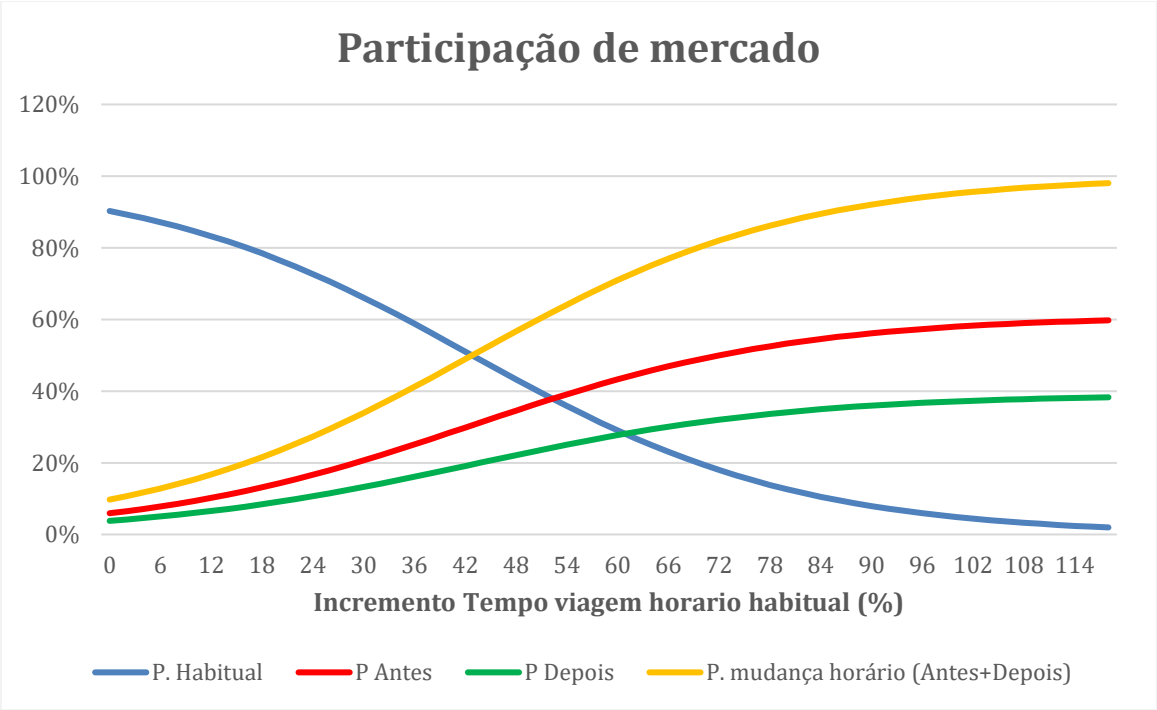

Figura 82 – Variando tempo de viagem no pico (expresso como % em relação ao horário fora do pico)

A análise dos comportamentos no pico da tarde evidencia diferenças significativas em relação à manhã, particularmente no que diz respeito à flexibilidade dos usuários em ajustar seus horários de saída. No sentido Rio de Janeiro-Niterói (pico da tarde), os usuários demonstram uma menor propensão a mudar de horário, o que contrasta com a manhã, quando os usuários são mais propensos a antecipar suas saídas.

No gráfico do sentido Niterói-Rio de Janeiro (pico da manhã), a mudança para saídas antes do horário habitual é mais expressiva, enquanto, à tarde, as mudanças para saídas depois são relativamente mais frequentes, refletindo maior flexibilidade para atrasos no retorno. Além disso, a soma de mudanças de horário atinge 100% mais rapidamente pela manhã (~80% de incremento no tempo de viagem), enquanto, à tarde, ela cresce de forma mais lenta e gradativa, sugerindo uma maior resistência para ajustar horários no retorno.

Essa maior flexibilidade no retorno também é evidenciada pelo fato de que os usuários estão dispostos a adiantar suas saídas em até 52 minutos para evitar atrasos, um tempo maior em comparação à manhã. Isso indica que, à tarde, os ajustes no horário são mais relacionados à conveniência e conforto, como evitar lotação ou trânsito, do que a restrições rígidas. No entanto, a maior probabilidade de atrasar a saída (SDL) à tarde (0% a 40%) em comparação à manhã (0% a 20%) reforça que compromissos no destino são menos rígidos do que os compromissos matinais. Dado esse comportamento, políticas para o pico da tarde devem considerar essa maior flexibilidade no retorno. Incentivos para viagens mais tarde podem ser menos eficazes, já que muitos usuários mantêm o horário habitual. Bem como, estratégias para estimular saídas mais cedo podem ter um efeito mais gradual, exigindo menores incentivos em comparação à manhã.

A Figura 83 apresenta a participação de mercado em função do aumento no SDE, ou seja, do tempo que os usuários precisam antecipar em relação ao horário preferido. Observa-se que, conforme o SDE aumenta, a probabilidade de escolha do horário habitual cresce de forma constante, partindo de aproximadamente 70% e chegando a mais de 80%. Sendo que, à medida que o "custo" de sair mais cedo aumenta em termos de tempo e conveniência, manter o horário habitual torna-se cada vez mais atraente para os usuários. Já a probabilidade de sair antes diminui acentuadamente conforme o SDE aumenta.

A probabilidade de sair depois permanece praticamente estável, com um leve aumento à medida que o SDE cresce. Nota-se que o aumento no custo de sair mais cedo não impacta significativamente essa alternativa, sugerindo que os usuários que optam por sair depois estão mais inclinados a manter essa escolha, mesmo com alterações no SDE. A soma das mudanças de diminui gradualmente à medida que o SDE aumenta, indicando uma menor propensão geral a ajustes de horário quando a penalidade por sair mais cedo se torna maior.

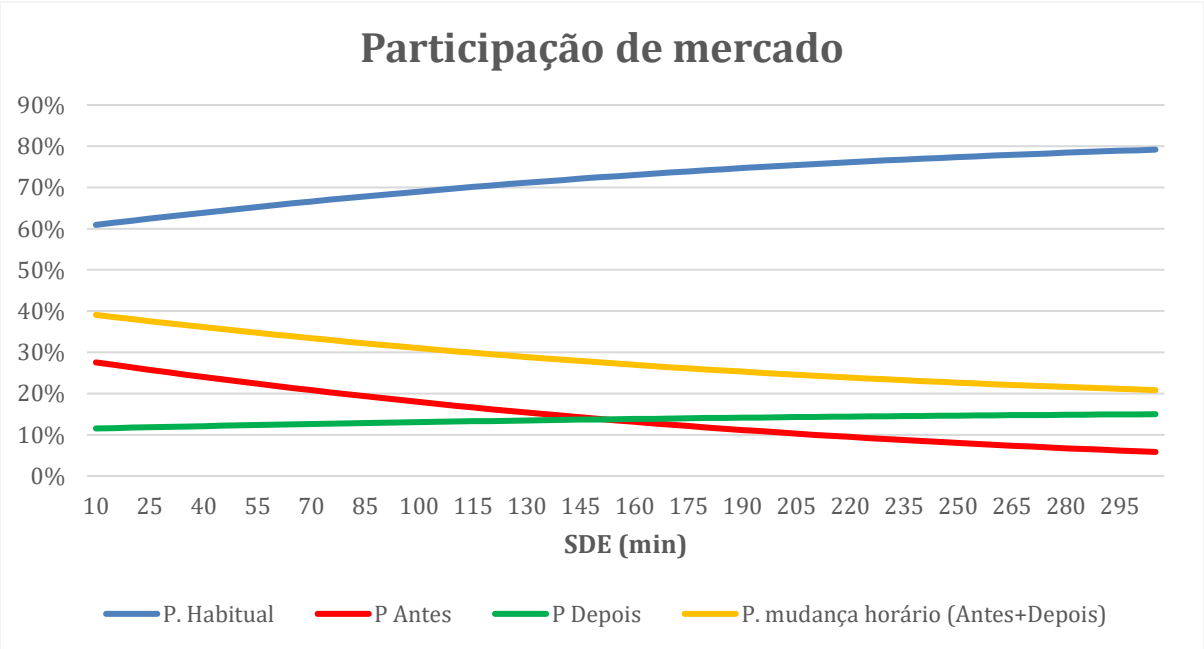

Figura 83 – Variando SDE, ou seja o tempo antes em relação ao horário preferido

Por fim, a Figura 84 apresenta a variação na participação de mercado em função do aumento no SDL, ou seja, o tempo que os usuários precisam atrasar em relação ao horário preferido. Observa-se que, conforme o SDL aumenta, a probabilidade de manter o horário habitual cresce de forma constante, partindo de aproximadamente 65% e chegando a mais de 75%. Esse comportamento sugere que, à medida que a penalidade por atrasos se intensifica, os usuários preferem manter seus horários habituais.

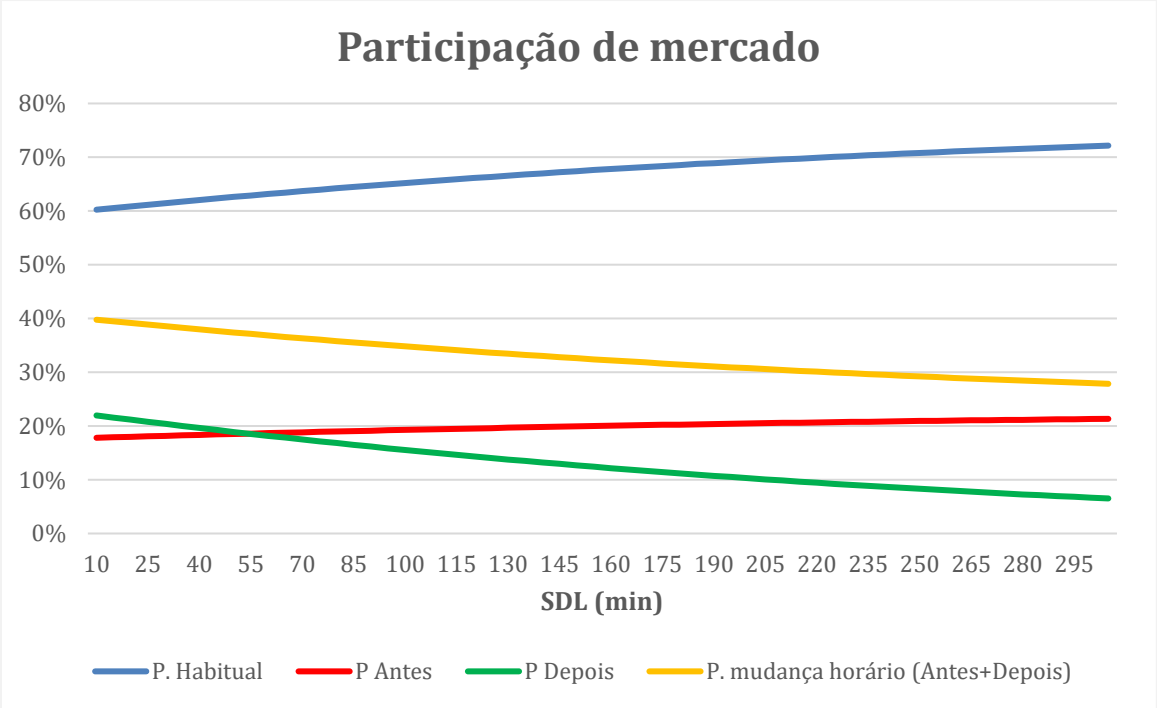

Figura 84 – Variando SDL, ou seja, o tempo depois em relação ao horário preferido

Já a probabilidade de sair depois diminui de maneira significativa à medida que o SDL cresce, indicando que atrasos prolongados tornam essa alternativa menos atraente. A probabilidade de sair antes, embora não seja diretamente impactada pelo SDL, apresenta um leve aumento ao longo do tempo, sugerindo que alguns usuários preferem antecipar suas saídas para evitar os custos de atrasos. A soma das mudanças de horário (*Antes* + *Depois*) diminui gradativamente, refletindo a menor disposição geral para ajustes quando o SDL aumenta. Esses resultados mostram que, enquanto o SDL aumenta, a preferência por manter o horário habitual se torna mais evidente, destacando a aversão dos usuários a atrasos excessivos. Políticas que busquem redistribuir a demanda no pico, como incentivos para saídas mais cedo, podem ser mais eficazes, já que os usuários demonstram maior disposição para antecipar seus horários em vez de tolerar atrasos.

7.4. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Uma parte importante do presente projeto é a concepção e análise de desempenho de cenários de operação da Ponte Rio-Niterói. Com este objetivo, foi utilizada a técnica de microssimulação de tráfego a partir da modelagem de cenários (modelos digitais) que representam a operação da ponte sob diversas condições.

7.4.1. MODELO DE MICROSSIMULAÇÃO VISSIM

Simulação é a representação de sistemas/processos usada para entender as interações entre seus componentes. Ela é aplicada em diversos setores de transporte, como operações portuárias, aeroportuárias, ferroviárias e rodoviárias, abrangendo modelagem de demanda e operações de tráfego. O processo de modelagem pode reproduzir o movimento de unidades de tráfego em uma rede simulada, levando em consideração as características dos veículos, ambiente e motoristas. É particularmente útil para avaliar alternativas de projetos quando técnicas analíticas são impraticáveis ou não estão disponíveis (Elefteriadou *et al*., 2014).

A utilização da simulação microscópica de tráfego é frequentemente utilizada devido à sua capacidade de avaliar variadas estratégias de design e gestão em uma rede rodoviária antes de sua implementação (Maheshwary *et al*., 2020). Com essas ferramentas à disposição, é viável simular e avaliar métricas de desempenho, como tempo e atraso de viagem, visando alcançar os objetivos desejados.

A utilização de simulação de tráfego é prática corrente para avaliar projetos e estratégias de operação rodoviária. Entre os exemplos de aplicações de modelos de simulação de tráfego em contexto rodoviários pode-se mencionar os trabalhos de Ansari e Kattan (2020), que empregaram uma abordagem de microsimulação para avaliar os efeitos operacionais e secundários da introdução de faixas de pedágio de alta ocupação, incorporando também análises ambientais ao modelar emissões de gases de efeito estufa. Xu *et al*. (2016) conduziram uma pesquisa utilizando o microssimulador Vissim para simular estratégias personalizadas de pedágio, desenvolvendo módulos de roteamento customizados compatíveis com o Vissim. Um estudo de caso foi realizado na ponte de pedágio SR-520, que conecta Seattle e Bellevue sobre o Lago Washington, no estado de Washington, EUA. Zhang *et al.* (2008) adotaram o Vissim para avaliar a viabilidade e eficácia de algoritmos propostos para otimizar as operações de pedágio de alta ocupação.

O *software* VISSIM é amplamente utilizado para simulação microscópica e foi criado na Universidade de Karlsruhe, Alemanha, nos anos 1970. Sua característica mais proeminente é a capacidade de modelar projetos viários com alto grau de detalhamento e flexibilidade, abrangendo o comportamento dos condutores e o desempenho dos veículos (Huang *et al*., 2013; Liu *et al*., 2012). O software de micro simulação VISSIM foi selecionado para esta análise, pois assim como os principais softwares de microssimulação, apresenta condições de modelagem distintas para diferentes tipos de veículos, que podem incluir automóveis, caminhões e ônibus, e usa uma função com distribuição estocástica de velocidades desejadas completamente

editável para cada tipo de veículo. O VISSIM se destaca pela capacidade de modelar de forma simples e satisfatória os veículos individualmente e em conjunto.

Uma particularidade do VISSIM é que o modelo também possui um algoritmo de car following específico para tráfego rodoviário, com diversos parâmetros editáveis. Possuir um algoritmo específico para rodovias foi um fator determinante na escolha deste modelo de simulação para análise.

Através de uma revisão de trabalhos de modelagem, Gettman e Head (2003) apontam que o VISSIM possui um eficiente controle de parâmetros referentes às trocas de faixa, além de possuir um maior número de parâmetros de *car following*. Um bom controle de troca de faixas e de *car following* é essencial para a modelagem deste estudo, uma vez que para altas intensidades de fluxo estes parâmetros possuem grande influência no comportamento do trecho.

7.4.2. CONSTRUÇÃO DOS CENÁRIOS PARA A SIMULAÇÃO

O ponto de partida para a simulação dos diversos cenários de operação estudados foi a criação de um modelo que represente de forma factível a operação atual do trecho estudado. Este modelo – chamado de cenário base – foi fundamentado em dados coletados em campo, como a geometria e as características operacionais existentes.

Partindo do cenário base, foram desenvolvidos cenários que simulam a implantação do sistema de livre passagem na praça de pedágio e a adoção de tarifação variável ao longo do dia. Também foram desenvolvidos cenários com a implantação de um sistema de faixas reversíveis ao longo da ponte. O desempenho destes cenários foi simulado através do *software* de microssimulação VISSIM.

7.4.2.1. ORIGEM DOS DADOS UTILIZADOS

Para a construção dos cenários simulados foram utilizados dados fornecidos pela concessionária, coletados no andamento do projeto e obtidos de fontes secundárias. A seguir, são apresentados os dados utilizados e sua origem.

7.4.2.1.1. DADOS DE TRÁFEGO DO SAT

Os dados do SAT (sistema analisador de tráfego) para cada ramo de entrada e saída da ponte foram recebidos da concessionária. As informações do tráfego, agregados de hora em hora, incluem, entre outras informações, a classificação e a velocidade dos veículos registrados pelos sensores. O banco de dados recebido abrange todo o ano de 2023, exceto o mês de março, e os meses de janeiro a julho de 2024.

7.4.2.1.2. DADOS DA OPERAÇÃO DA PRAÇA DE PEDÁGIO

Os dados da arrecadação da praça de pedágio, para cada forma de pagamento (manual ou automática) foram recebidos da concessionária. O banco de dados recebido abrange o período de janeiro de 2015 a setembro de 2023, e é agregado por dia.

7.4.2.1.3. DADOS GEOMÉTRICOS DA PONTE

Os dados da geometria da ponte, como o alinhamento planimétrico e o perfil altimétrico – especialmente do vão central – foram recebidos da concessionária. Também foram utilizadas imagens de satélite para a melhor representação da ponte e da praça de pedágio.

7.4.2.1.4. CARACTERÍSTICAS DA OPERAÇÃO DA PONTE E DA PRAÇA DE PEDÁGIO

As características da operação da ponte e da praça foram obtidas – direta ou indiretamente – da concessionária. Foram recebidos diretamente dados relacionados aos tempos de viagem na ponte, tempos de atendimento da praça de pedágio, comprimento das filas e o comportamento geral do tráfego. Indiretamente, foram obtidos no site ou nas redes sociais da concessionária a localização dos radares implantados na ponte e o registro diário dos tempos de viagem médios ao longo dos dias.

7.4.2.1.5. DADOS DO PROJETO

Para a construção dos cenários com intervenção na demanda, foram utilizados dados elaborados no desenvolvimento do presente projeto, derivados das pesquisas de Origem e Destino (OD) e de Preferência Declarada (PD). O tempo de antecipação e o percentual de condutores que tenderiam a antecipar as suas viagens foram estimados a partir de modelos econométricos desenvolvidos com base na pesquisa de preferência declarada.

7.4.2.1.6. OUTRAS INFORMAÇÕES

Além das fontes citadas anteriormente, foram utilizados dados provenientes da internet e de outras fontes secundárias de pesquisa. Entre eles, podem ser destacados o uso de imagens aéreas georreferenciadas da região da ponte e de vídeos da operação ou aéreos registrados por usuários e disponibilizados em plataformas como o YouTube.

7.4.2.2. PARÂMETROS ADOTADOS NO CENÁRIO BASE

O cenário base, que representa a operação atual da praça, foi dividido em dois períodos – os picos da manhã (entre 05:00 e 10:59) e da tarde (entre 14:00 e 19:59) – com seis horas cada. A seguir, são apresentados os parâmetros adotados para construir este cenário.

7.4.2.2.1. GEOMETRIA DA PONTE E DA PRAÇA DE PEDÁGIO

A representação geométrica da ponte foi feita em escala 1:1, isto é, o modelo foi construído com as mesmas dimensões existentes. No que tange ao perfil altimétrico, apenas a elevação do vão central (rampa de 2,5%) foi modelada, visto que a rampa das extremidades da ponte é de pequena magnitude (1,5%) e teria impacto negligível na simulação.

A praça de pedágio foi modelada de forma a reproduzir da melhor maneira possível o funcionamento das faixas exclusivas para os veículos que utilizam o sistema de cobrança automática, bem como proporcionar um espaço de armazenamento para as filas compatível com o existente.

7.4.2.2.2. DEMANDA ATUAL

Para representar a demanda atual do tráfego sobre a ponte, foram utilizados os dados do SAT fornecidos pela concessionária. Foram analisados os dados registrados em cada rampa de entrada da ponte, a partir dos quais foi estimado um perfil de demanda do tráfego ao longo do dia. A Tabela 22 apresenta a descrição das rampas de entrada e saída existentes.

Tabela 22 – Rampas de acesso à Ponte Rio-Niterói

Pista/Sentido	Tipo	Rampa	De/Para
Sul (Niterói-Rio)	Entrada	N7	R. Jansen de Mello
		N1	Al. Boa Ventura
		N3	Av. Contorno
	Saída	R2B	Av Brasil
		R1A	Rodoviária
		R1	Av. Perimetral
		R3	Linha Vermelha
Norte (Rio-Niterói)	Entrada	R2A	Av Brasil
		R4A	Av. Perimetral
		R4	Centro
	Saída	N8	R. Jansen de Mello
		N4	R. Feliciano Sodré
		N6	Av. Contorno
		N2	Al. Boa Ventura

Tendo em vista que o objetivo da simulação é representar a operação nos horários críticos de tráfego, foram expurgados do conjunto de análise os dados referentes aos fins de semana e feriados, bem como aos meses de fevereiro e dezembro, tipicamente de menor demanda.

Os dados fornecidos pela concessionária são agregados em intervalos de uma hora. A demanda foi estimada para rampa em cada hora do dia a partir da média dos volumes registrados na hora em todos os dias do conjunto de análise. Com o objetivo de simular um dia típico de tráfego intenso, a demanda a adotada foi determinada somando a demanda estimada para cada hora com um desvio padrão do conjunto de dados para esta hora, conforme a equação a seguir.

$$d_h = \bar{d}_h + \sigma_h \qquad \textit{Equação 12}$$

Onde:
d_h é a demanda considerada;
$\bar{d}_h$ é a média do tráfego no ramo e na hora para todo o conjunto de dados; e
σ_h é o desvio padrão do tráfego no ramo e na hora para todo o conjunto de dados.

A partir desta análise, foram obtidos os perfis de demanda do tráfego ao longo do dia para cada rampa de acesso à ponte, conforme apresentado na Figura 85.

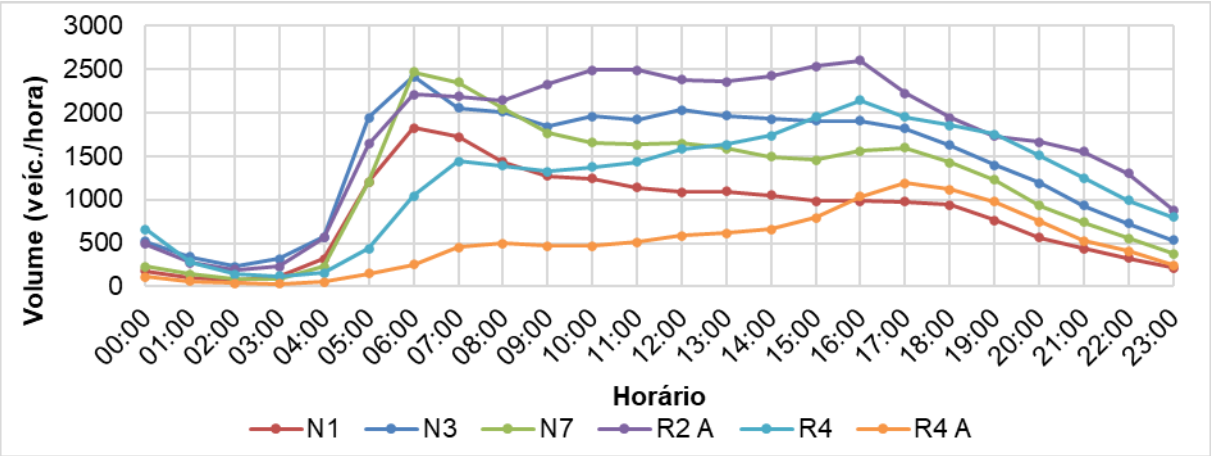

Figura 85 – Demanda horária em cada rampa de entrada

Com o objetivo de analisar o comportamento do tráfego em intervalos menores de tempo, foi realizada a desagregação dos volumes estimados em intervalos de 15 minutos, conservando os volumes horários totais e a média. A Figura 86 apresenta as curvas de demanda desagregadas.

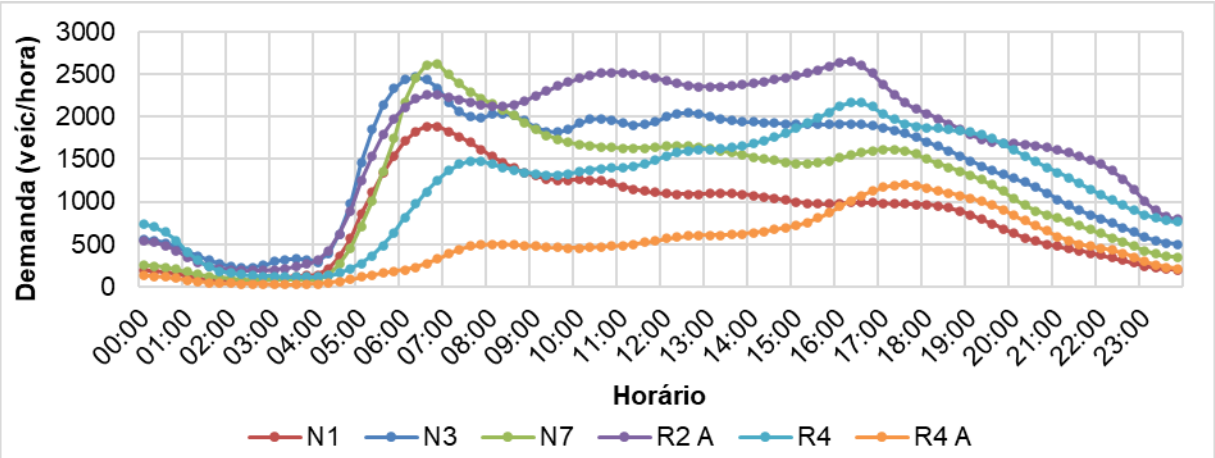

Figura 86 – Demada horária desagregada em intervalos de 15 minutos

7.4.2.2.3. MODELAGEM DO TRÁFEGO AO LONGO DA PONTE

A representação do tráfego ao longo da ponte foi realizada de acordo com as disposições do Código de Trânsito Brasileiro, especialmente no que se refere aos veículos lentos, que trafegam nas faixas à direita. Esta regra é explicitamente aplicada na operação da ponte, direcionada especificamente aos veículos de carga.

Outro aspecto modelado foi o ponto a partir do qual os motoristas começam a realizar as manobras de mudança de faixa, encaminhando-se para a saída desejada. O local foi determinado com base na sinalização existente na ponte, em relatos da equipe da concessionária e em observações da operação.

7.4.2.2.4. CONTROLADORES DE VELOCIDADE

Ao longo da ponte existem oito controladores fixos de velocidade, quatro em cada sentido. Os dispositivos estão instalados nos pórticos 5, 11, 17 e 22 (sentido Rio-Niterói) e 22, 16, 11 e 5 (sentido Niterói-Rio). Com o objetivo de representar a influência destes controladores no tráfego, foi criada uma zona de velocidade reduzida no segmento de 150 m imediatamente anterior a cada controlador.

7.4.2.2.5. MODELAGEM DO TRÁFEGO NA PRAÇA DE PEDÁGIO

Para a representação do comportamento dos motoristas na praça de pedágio foram criados dois perfis de direção, ambos com níveis maiores de agressividade no que concerne ao padrão de mudança de faixa, quando comparado com o usual ao longo da ponte. A região de aproximação da praça, onde os motoristas se dividem entre as diversas cancelas, possui um perfil de direção levemente mais agressivo, enquanto a região de afastamento, onde há o afunilamento, um perfil significativamente mais agressivo do que o usual.

7.4.2.2.6. TEMPOS DE ATENDIMENTO NAS CABINES MANUAIS

A distribuição dos tempos de atendimento nas cabines manuais (tempo e que o veículo fica parado na cancela) considerada foi linear entre 6 e 10 segundos. Este intervalo foi determinado a partir de informações obtidas com a concessionária, bem como em outras fontes de dados consultadas, como vídeo registros e dados de praças similares.

7.4.2.2.7. DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO DE SAÍDA

A distribuição dos veículos entre as possíveis rotas de saída foi obtida a partir dos dados de tráfego do SAT. A rotas foram alocadas de maneira a preservar a proporção entre os volumes dos ramos de saída observados para cada intervalo horário.

7.4.2.3. CALIBRAÇÃO DO CENÁRIO BASE

A calibração do modelo do cenário base envolveu todos os elementos e procedimentos descritos no item anterior. A criação da rede da forma adequada e a definição de parâmetros comportamentais compatíveis com cada local são fundamentais para que a simulação atinja o seu objetivo, que é representar de forma realista o comportamento dos veículos ao longo da ponte

O indicador de desempenho utilizado para a calibração do cenário base foi o tempo médio de viagem para cruzar a ponte em cada faixa horária. O segmento considerado para a avaliação dos tempos de viagem tem 10,75 km, com início no km 322,97 (após a rampa de saída para a Linha Vermelha – rampa R3) e fim no km 333,72 (após a praça, imediatamente antes da bifurcação da pista). Os locais foram escolhidos de maneira a registrar todos os veículos que trafegam na ponte, independente de qual rampa tenham utilizados para entrar ou sair. A Figura 87, a Figura 88 e a Figura 89, a seguir, apresentam os locais considerados para a medição.

Figura 87 – Início da medição - km 322,97

Figura 88 – Fim da medição - km 333,72

Figura 89 – Segmento considerado na análise

Como medida de comparação, foram utilizados de tempo médio de viagem conhecidos para a ponte tanto no pico quanto fora dele. As estimativas fornecidas pela concessionária, entretanto, são referentes ao conjunto inteiro da ponte, incluindo as rampas, o que totaliza aproximadamente 13 km. Desta forma, a comparação entre os tempos médios de viagem reais e os do modelo teve de ser ponderada em função desta diferença de extensão A Tabela 23 apresentada os dados utilizados como base para a comparação e os obtidos pelo modelo do cenário base.

Tabela 23 – Comparação entre os tempos médios de viagem conhecidos e os resultantes da simulação

Sentido	Pico da manhã	Pico da tarde	Entensão (km)
	Tempos conhecidos aproximados (min)		
Niterói - Rio	22	13	13
Rio - Niterói	13	27	13
	Tempos da simulação (min)		
Niterói - Rio	23	11	10,75
Rio - Niterói	11	25	10,75

7.4.3. CENÁRIOS MODELADOS

Além do cenário base, foram desenvolvidos cenários que representam a implantação de um sistema de livre passagem em substituição à praça existente, a implantação de políticas de tarifação variável, e a implantação de faixas reversíveis em ambos os sentidos do tráfego. A seguir, são apresentados os principais pontos de cada cenário, cujas descrições são apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Descrição dos cenários desenvolvidos

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção
Cenário 1	Cenário base (situação atual)	-
Cenário 2	Implantação do sistema de livre passagem (*Multi-lane Free Flow* – MLFF)	Estrutural
Cenário 3	Implantação do sistema de livre passagem em conjunto com faixas reversíveis	Estrutural
Cenário 4	Implantação do sistema de livre passagem em conjunto com variação de demanda – parte das viagens antecipadas em 15 minutos	Estrutural e demanda
Cenário 5	Implantação do sistema de livre passagem em conjunto com variação de demanda – parte das viagens antecipadas em 30 minutos	Estrutural e demanda

Os cenários 1, 2 e 3 foram simulados com as demandas dos picos da manhã (entre 05:00 e 10:59) e da tarde (entre 14:00 e 19:59). Os cenários 4 e 5, que possuem intervenção na demanda, foram aqui analisados apenas no período da manhã (entre 05:00 e 10:59), período que apresenta volumes concentrados mais altos. A simulação de cenários com intervenção na demanda no período da tarde não mostrou impacto relevante em um contexto de aplicação de MLFF.

7.4.3.1. CENÁRIO 1 – CENÁRIO BASE

Este é o cenário de referência, que replica as condições operacionais atuais da Ponte. A rede foi modelada para representar da maneira mais realista a geometria e as estruturas existentes no complexo da Ponte Rio-Niterói, como a estrutura da ponte (extensão, larguras, rampas, etc) e a praça de pedágio (número de cancelas, largura das faixas, tamanho da área de armazenamento, etc). A descrição detalhada está apresentada no item 7.4.2.2.

A demanda no cenário foi estimada para replicar a existente em um dia de tráfego intenso, conforme apresentado no item 7.4.2.2.2. A Figura 90 apresenta as demandas totais de entrada em cada sentido da ponte, com os períodos de pico destacados.

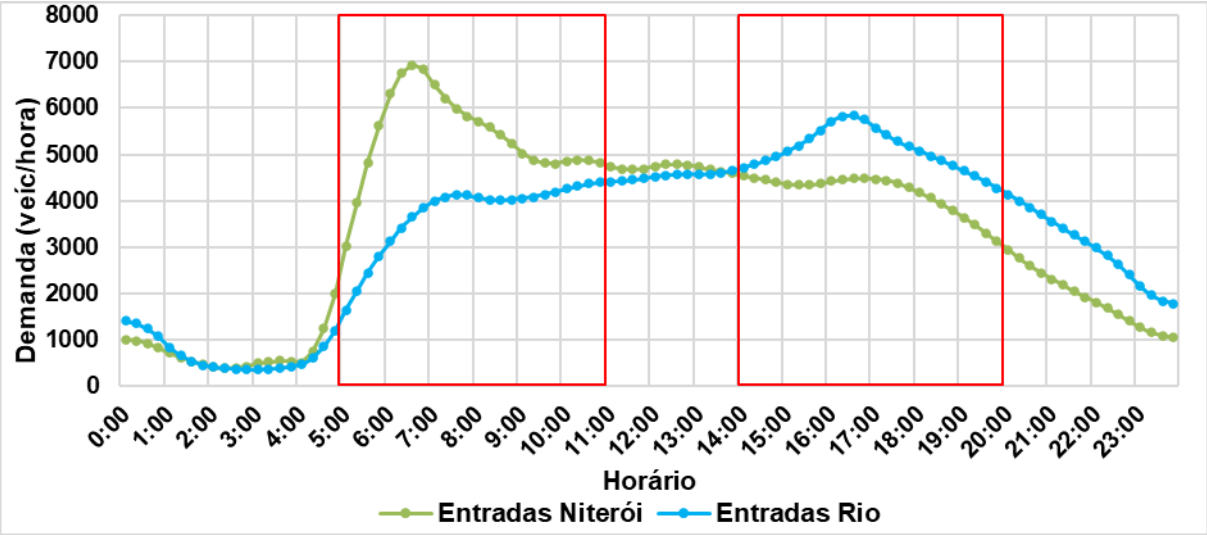

Figura 90 – Demanda do tráfego no cenário base – picos destacados

7.4.3.2. CENÁRIO 2 – IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE LIVRE PASSAGEM – MLFF

O Cenário 2 apresenta uma proposta de intervenção estrutural no complexo da Ponte Rio-Niterói a partir da substituição do sistema de cobrança existente hoje através de uma praça convencional por um sistema de livre passagem na modalidade *Multi-lane Free Flow* (MLFF). O cenário foi construído com base no Cenário 1 e apresenta como única diferença em relação a este a remoção da praça de pedágio e os ajustes menores necessários para esta intervenção. A Figura 91 e a Figura 92 apresentam a diferença entre os cenários na região da praça.

Figura 91 – Cenário 1 com a praça

Figura 92 – Cenário 2 sem a praça

Neste cenário, os condutores não sofrem nenhuma influência do sistema de cobrança, e trafegam pelos locais de cobrança da mesma forma que o fariam em qualquer outro segmento da ponte. A demanda de entrada na ponte foi mantida igual à do Cenário 1, de forma a comparar as características operacionais da alternativa de intervenção propostas com a situação atual.

7.4.3.3. CENÁRIO 3 – IMPLANTAÇÃO DE FAIXAS REVERSÍVEIS

O Cenário 3 também apresenta uma proposta de intervenção estrutural no complexo da Ponte Rio-Niterói, somando a substituição do sistema de cobrança com a implantação de faixas de tráfego reversíveis nos horários de pico. Neste cenário, a ponte opera com uma faixa adicional no sentido mais carregado do tráfego, a depender do horário do dia. No período de pico da manhã, são 5 faixas no sentido Niterói-Rio e 3 faixas no inverso; já no período de pico da tarde, são 5 faixas no sentido Rio-Niterói e 3 faixas no inverso.

O cenário foi construído com base no Cenário 2, ou seja, também considera a remoção da praça de pedágio existente, e apresenta configuração variável a depender do período simulado. A Figura 93 e a Figura 95 apresentam a configuração dos locais de transição das faixas reversíveis no lado Rio. A transição ocorre nas proximidades do pórtico 3 no período da manhã e entre os pórticos 1 e 2 no período da tarde. A Figura 94 e a Figura 96 apresentam a configuração dos locais de transição das faixas reversíveis no lado Niterói, que ocorre na região da praça removida.

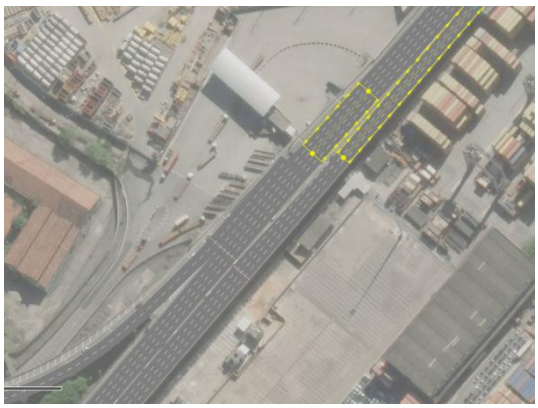

Figura 93 – Transição da faixa reversível no lado Rio (período da manhã)

Figura 95 – Transição da faixa reversível no lado Rio (período da tarde)

Figura 94 – Transição da faixa reversível no lado Niterói (período da manhã)

Figura 96 – Transição da faixa reversível no lado Niterói (período da tarde)

Este cenário possui alterações nos parâmetros de condução para melhor representar o tráfego com a configuração de 5 faixas. A adição de uma faixa gera novas manobras de mudança de faixa, especialmente nas proximidades das saídas da ponte, onde os condutores começam a se

posicionar para ingressar na rampa desejada. A demanda de entrada na ponte foi mantida igual à dos Cenários 1 e 2, de forma a comparar as características operacionais das alternativas de intervenção propostas com a situação atual.

7.4.3.4. CENÁRIO 4 – IMPLANTAÇÃO DE MLFF E VARIAÇÃO DE DEMANDA – SAÍDA 15 MINUTOS ANTES

O Cenário 4 apresenta uma proposta de intervenção na demanda de tráfego na ponte, em adição à intervenção estrutural de substituição do sistema de cobrança. Neste Cenário, a variação da demanda é decorrente de modelos econométricos estimados a partir dos dados da Pesquisa de Preferência Declarada e descritos na seção 6.4.4.1. O objetivo dessa avaliação é investigar os possíveis impactos na operação da Ponte Rio-Niterói, decorrentes de uma medida de tarifação de pico e uma consequente alteração na distribuição da demanda com o espalhamento do pico.

A intervenção na demanda foi estudada apenas no período da manhã e no sentido Niterói-Rio, que apresenta o pico mais acentuado conforme anteriormente apresentado na Figura 90. A partir dos resultados da aplicação do modelo para uma disposição à antecipação de 15 minutos, descritos na seção 6.4.4.3 e 7.3.1.4, entre 32% e 40% dos condutores estariam dispostos a antecipar seu horário de saída. A variação de demanda foi aplicada no período entre as 5:00 e as 8:00.

O cenário foi desenvolvido assumindo a configuração estrutural de MLFF, e a demanda de entrada na ponte no sentido Niterói–Rio foi variada de acordo com o percentual e o tempo de antecipação definidos pelos modelos econométricos. A Figura 97 apresenta a comparação entre os perfis de demanda do Cenário 2 (demanda atual) e do Cenário 4 (demanda considerando a disposição à antecipação de 15 minutos), no período da simulação.

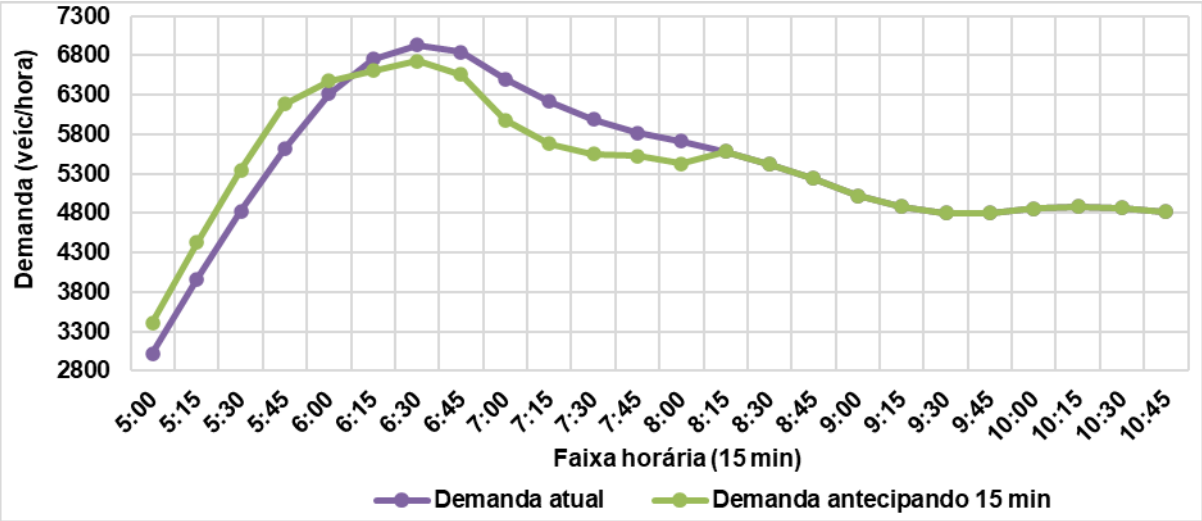

Figura 97 – Comparação entre a demanda atual e a demanda estimada antecipando 15 minutos a saída

7.4.3.5. CENÁRIO 5 – IMPLANTAÇÃO DE MLFF E VARIAÇÃO DE DEMANDA – SAÍDA 30 MINUTOS ANTES

O Cenário 5 apresenta uma proposta similar à do Cenário 4, porém variando o tempo de antecipação da saída. A partir dos resultados da aplicação do modelo para uma antecipação de 30 minutos, descritos na seção 6.4.4.3 e 7.3.1.4, entre 30% e 38% dos condutores estariam dispostos a antecipar o horário de saída. A Figura 98 apresenta a comparação entre os perfis de demanda do Cenário 2 (demanda atual) e do Cenário 5 (demanda considerando a disposição à antecipação de 30 minutos), no período da simulação. Assim como no cenário anterior, a variação de demanda foi aplicada no período entre as 5:00 e as 8:00.

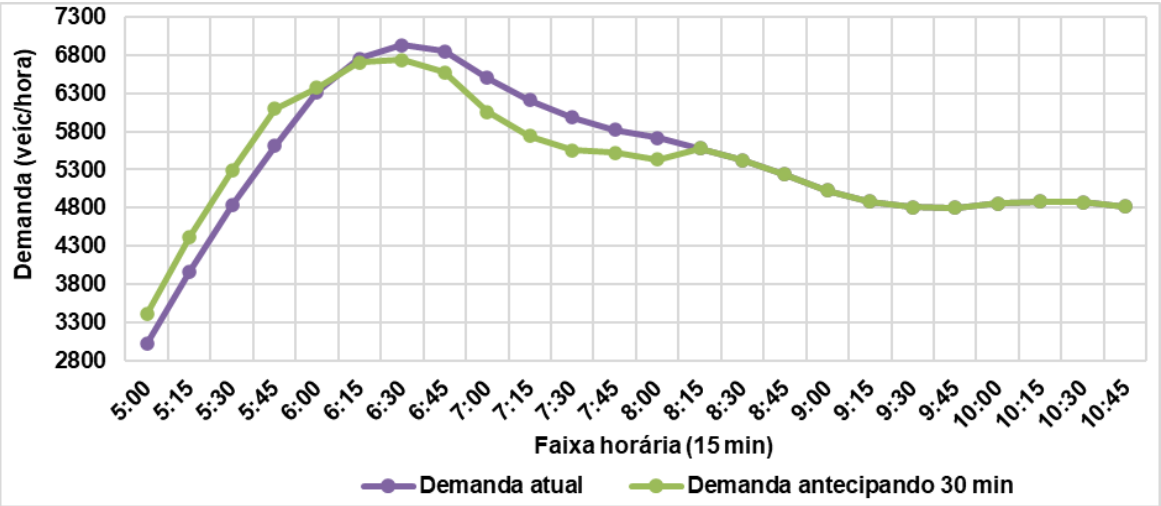

Figura 98 – Comparação entre a demanda atual e a demanda estimada antecipando 30 minutos a saída

7.4.4. LIMITAÇÕES DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Simulações, apesar de serem ferramentas poderosas para entender fenômenos e testar hipóteses, possuem algumas limitações gerais. Seja por simplificações realizadas, pela limitação dos dados de entrada ou pela possível má representação de fatores inesperados ou pouco compreendidos, elas podem não representar totalmente a complexidade dos sistemas reais. As principais limitações identificadas no presente estudo estão descritas a seguir.

7.4.4.1. REPRESENTAÇÃO DA DEMANDA REPRESADA

A demanda de tráfego existente na ponte foi estimada a partir de dados oriundos do SAT fornecidos pela Concessionária. Este banco de dados armazena o volume e as características do tráfego que passou por cada sensor ao longo do tempo.

Entretanto, como a ponte opera próximo a sua capacidade nos momentos de pico, há formação de filas nas rampas de acesso à ponte. O volume de veículos armazenado nas filas representa uma demanda represada que não é quantificada nos sensores de tráfego.

Desta forma, cenários que envolvem uma ampliação da capacidade, como por exemplo o Cenário 3 (Implantação de faixas reversíveis), possibilitariam a redução desta demanda

represada. Como consequência, poderia haver alterações na distribuição horária do tráfego, com o aumento no número de veículos registrado no SAT nos horários mais demandados, aumentado o pico dos perfis de tráfego registrados.

7.4.4.2. INTERAÇÃO COM O TRÁFEGO URBANO MUNICIPAL

Os cenários propostos apresentam intervenções que possibilitam o aumento da capacidade de tráfego na Ponte Rio-Niterói. Como consequência direta deste fato, nos horários de pico, onde hoje a Ponte opera em condições próximas a sua capacidade, a implantação das intervenções aumentaria o fluxo de saída de veículos da ponte, adicionando carga aos sistemas de mobilidade dos municípios do Rio de Janeiro e de Niterói. O presente estudo não avaliou, em nenhum dos cenários, a interação entre o tráfego proveniente da ponte e o tráfego urbano dos municípios, limitando as análises ao complexo da Ponte Rio Niterói.

7.4.5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Esta seção apresenta os resultados das simulações realizadas nos cenários desenvolvidos. O indicador utilizado foi o tempo de viagem ao longo da ponte em cada faixa horária. O segmento considerado para a medição dos tempos é o mesmo utilizado para a calibração do cenário base, descrito no capítulo 7.4.2.2. Adicionalmente, foram avaliados os volumes de entrada e de saída e o número de veículos trafegando sobre a ponte em cada faixa horária.

Cada um dos cenários desenvolvidos foi simulado 10 vezes, a partir de uma ferramenta do *software* VISSIM que varia aleatoriamente diversos parâmetros, como os tempos de chegada dos veículos e o comportamento dos condutores, buscando reproduzir as variações que ocorrem em condições reais. A Figura 99 exemplifica a variabilidade entre os resultados de cada simulação dos cenários. Os resultados apresentados a seguir são uma média dos resultados individuais das simulações realizadas em cada cenário.

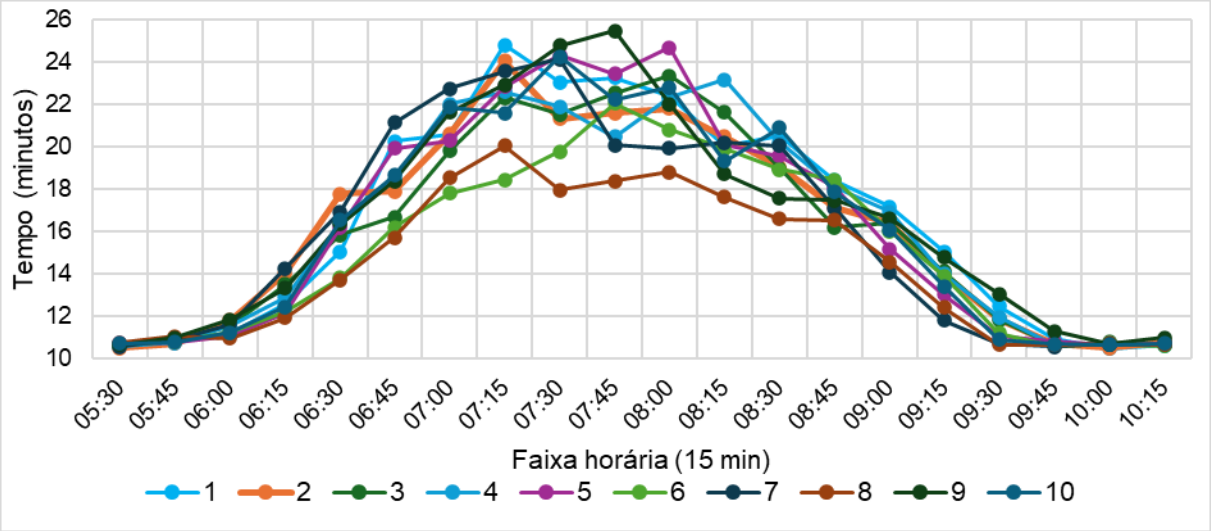

Figura 99 – Variação nos tempos de viagem observados em diferentes simulações (1 a 10) de um mesmo cenário

Para avaliar os impactos das intervenções propostas, os resultados das simulações foram agrupados em duas análises: a Análise 1 compara as alternativas de intervenção estrutural com o Cenário 1, que representa a situação atual; a Análise 2, por sua vez, compara as alternativas de intervenção na demanda com o Cenário 2 (MLFF), que já considera a substituição do sistema de cobrança atual por um sistema de livre passagem *Multi-lane Free Flow*. A Tabela 25 apresenta o resumo das análises apresentadas.

Tabela 25 – Análises comparativas realizadas

Análise	Cenário de referência	Cenários com intervenção	Tipo de intervenção
Análise 1	Cenário 1 (situação atual)	Cenário 2 (MLFF); Cenário 3 (faixas reversíveis)	Estrutural
Análise 2	Cenário 2 (MLFF)	Cenário 4 (antecipando 15 minutos); Cenário 5 (antecipando 30 minutos)	Estrutural e de demanda

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas, bem como as análises comparativas realizadas. Os tempos de viagem obtidos na simulação são apresentados em conjunto com a demanda de tráfego de entrada na ponte na faixa horária analisada. Esta forma de apresentação combinada ajuda a compreender o comportamento do tráfego na ponte.

7.4.5.1. ANÁLISE 1: ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO ESTRUTURAL

A análise combinada dos tempos de viagem com a demanda de tráfego de entrada na ponte foi realizada para os dois sentidos e para os dois períodos de pico, assim como a análise dos volumes de entrada e saída da ponte. A avaliação dos resultados do Cenário 1 (situação atual) confirma os dados observados em campo, de que a ponte opera sem congestionamento no pico da manhã no sentido Rio-Niterói e no pico da tarde no sentido Niterói-Rio, ambos com tempos de viagem próximos aos 11 minutos. Os resultados também tornam possível observar em detalhe o processo de formação do congestionamento nos períodos de pico.

7.4.5.1.1. IMPACTO NO HORÁRIO DE PICO DA MANHÃ

O pico de demanda mais acentuado ocorre entre as 6:15 e as 6:45, no sentido Niterói-Rio, quando o número de veículos que ingressa na ponte passa a diminuir. A Figura 100 (a), contudo, mostra que os tempos de viagem sobem de forma constante entre as 6:00 e as 7:15, estabilizando em torno de 22 a 23 minutos após este período. O pico da curva de tempos de viagem ocorre após o da demanda, quando há menos veículos ingressando na ponte.

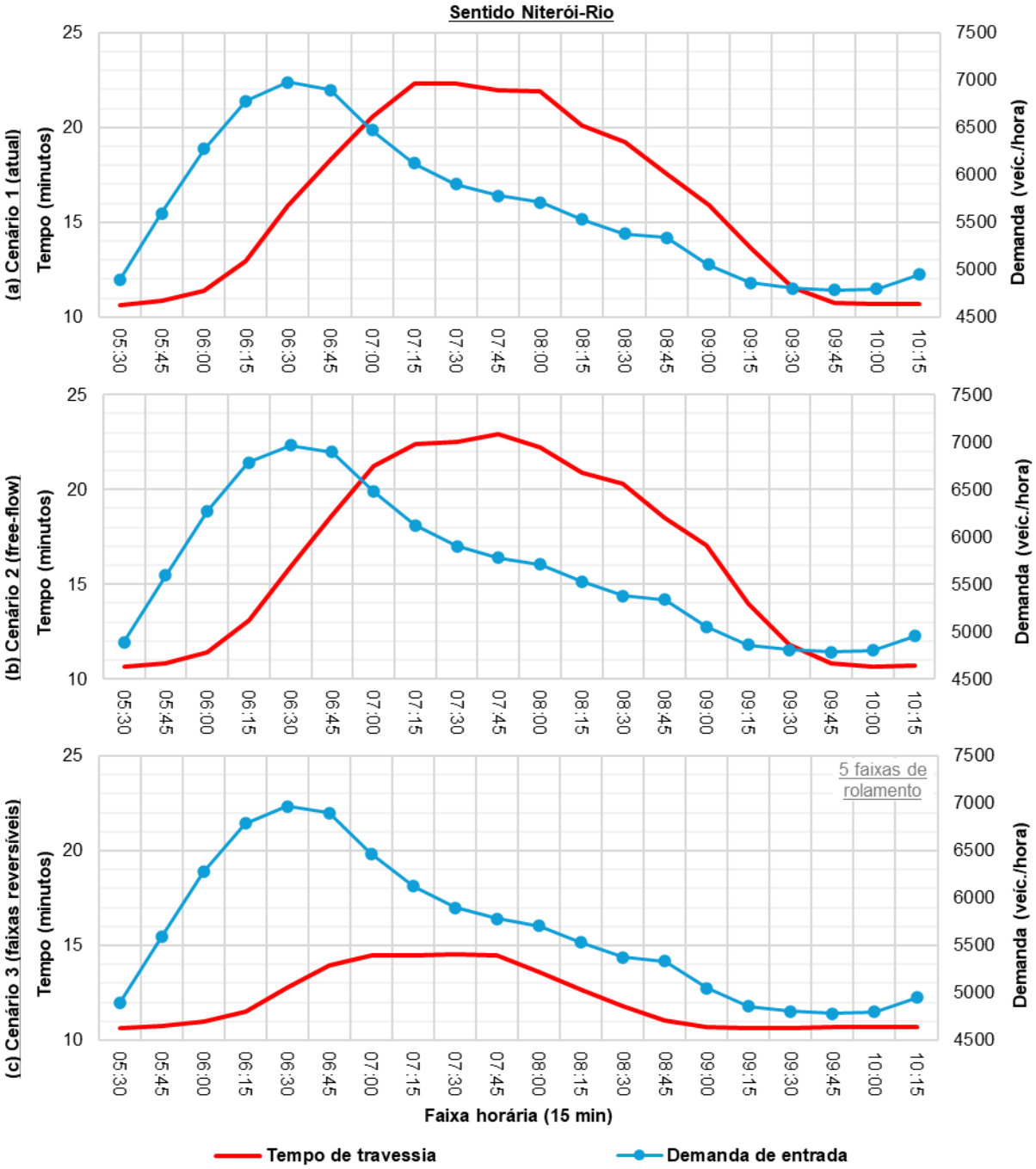

Figura 100 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Niterói-Rio – pico da manhã

A análise da demanda de entrada e saída da ponte, bem como do número médio de veículos trafegando sobre a ponte em cada faixa horária, apresentada na Figura 101, fornece mais dados sobre o que ocorre neste período. Embora o pico da entrada seja atingido entre 6:30 e 6:45, caindo perceptivelmente após este horário, a demanda de saída atinge o seu valor máximo – cerca de 5900 veículos/hora – às 6:15, e estabiliza em torno deste valor. Dessa forma, o número de veículos trafegando sobre a ponte aumenta até atingir o pico entre as 7:15 e as 7:45, o que coincide com o pico do congestionamento.

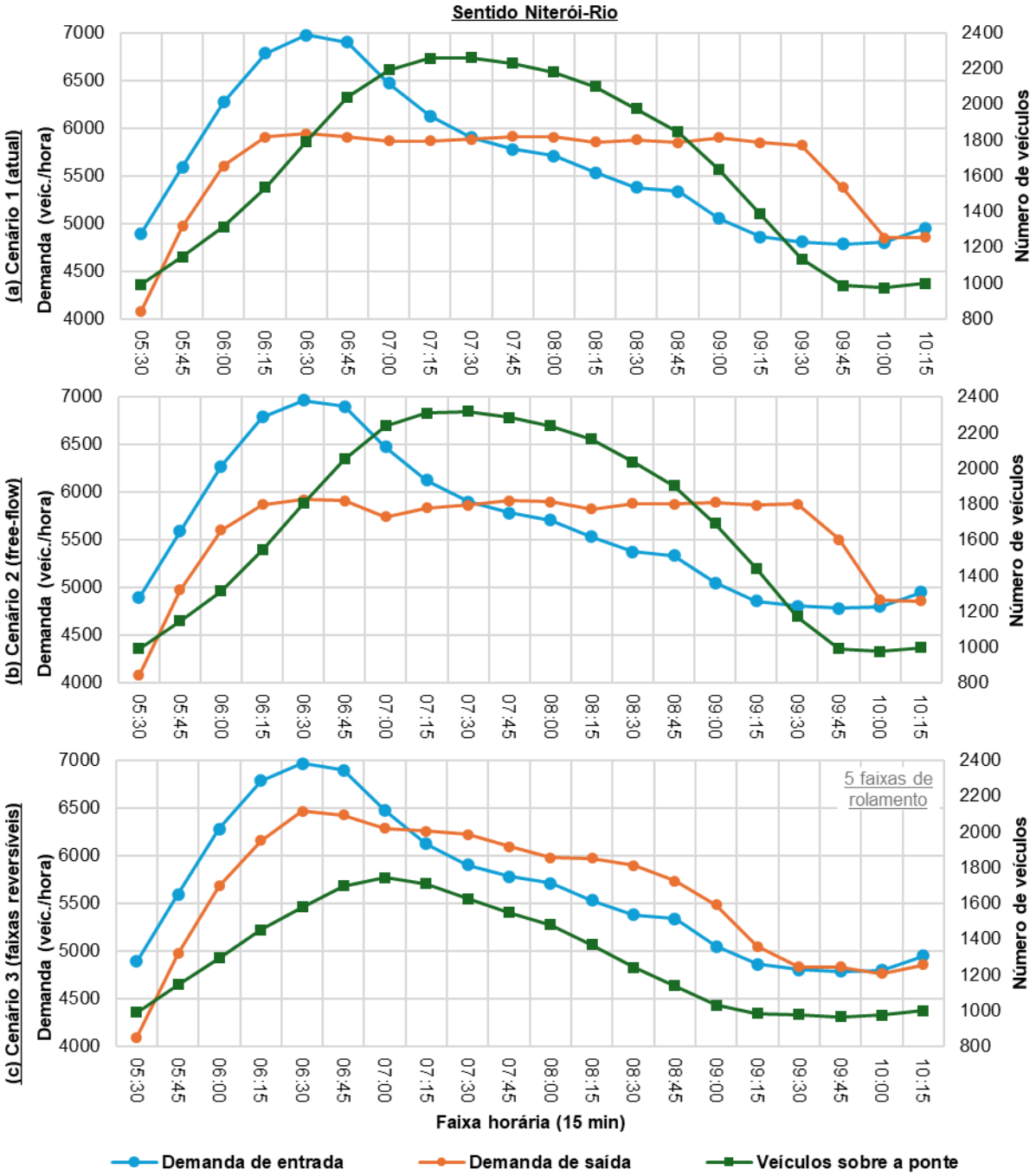

Figura 101 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Niterói-Rio – pico da manhã

No sentido Niterói-Rio, o Cenário 1 (situação atual) e o Cenário 2 (MLFF), cujos resultados são apresentados na Figura 100 (b), são equivalentes, visto que a substituição do sistema de cobrança traz alterações apenas no sentido Rio-Niterói, onde haverá a remoção da praça. As pequenas flutuações de resultados entre estes dois cenários devem-se à aleatoriedade de parâmetros inserida pelo *software* nas simulações.

Neste sentido do tráfego, o Cenário 3 simula a adição de uma faixa de rolamento durante este período. Nesta situação, há uma redução expressiva no tempo de viagem, de cerca de 23

minutos no pico para cerca de 15 minutos, como mostrado na Figura 100 (c). Da mesma forma, o número de veículos trafegando sobre a ponte apresenta uma redução considerável, como visto na Figura 101 (c).

Na Figura 101, também é possível observar a variação no número de veículos que sai da ponte em cada faixa horária. Na situação atual (Cenário 1), o fluxo na ponte fica limitado à saída de cerca de 5.900 veículos/hora, como demonstrado pela estabilização do gráfico em torno deste valor. Com a implantação de uma faixa adicional de tráfego, este limite é eliminado, e o fluxo de saída chega a um pico próximos de 6.500 veículos/hora.

No sentido Rio-Niterói, entretanto, onde o cenário prevê a redução de uma faixa de rolamento neste período, ocorre o aumento do tempo de viagem na ordem de 1 minuto, estável até cerca de 9:00 e visível na Figura 102 (c), quando este começa a subir, assim como a demanda de tráfego, até o fim do período simulado. É válido ressaltar que a demanda de tráfego no sentido Rio-Niterói é, de forma geral, crescente ao longo de todo o dia, com o pico da manhã muito pouco definido, vide a Figura 90. É possível verificar na Figura 103 (c) o aumento do número de veículos trafegando sobre a ponte ao fim da simulação, o que indica a formação de congestionamento.

É válido ressaltar a que, tendo em vista a grande variação no pico da demanda entre os dois sentidos de tráfego, as escalas verticais das figuras apresentadas para cada sentido são diferentes. Dessa maneira, é possível caracterizar melhor a variação da demanda ao longo do período.

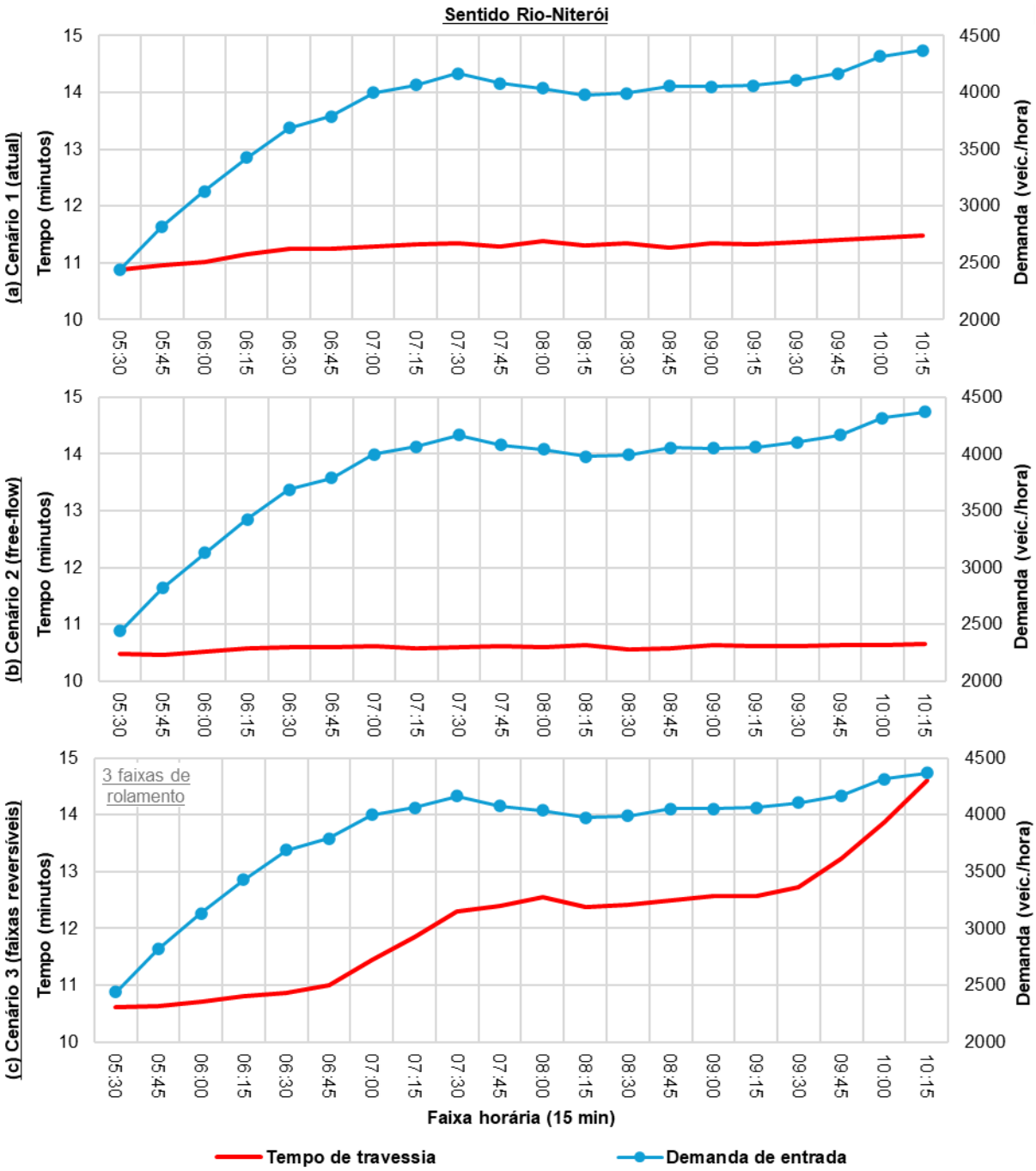

Figura 102 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Rio-Niterói – pico da manhã

A Figura 102 apresentam também os resultados das simulações das alternativas de intervenção estrutura no pico da manhã. É possível observar que, no sentido Rio-Niterói, o Cenário 2 (MLFF) possui diferença desprezível em relação ao Cenário 1 (situação atual), tendo como vantagem apenas a redução dos tempos de interação com o sistema de cobrança atual (desaceleração, parada, pagamento e aceleração), gerando um ganho menor que 1 minuto no tempo médio de travessia. Na Figura 103, também pode ser observado uma pequena redução no número de veículos trafegando sobre a ponte.

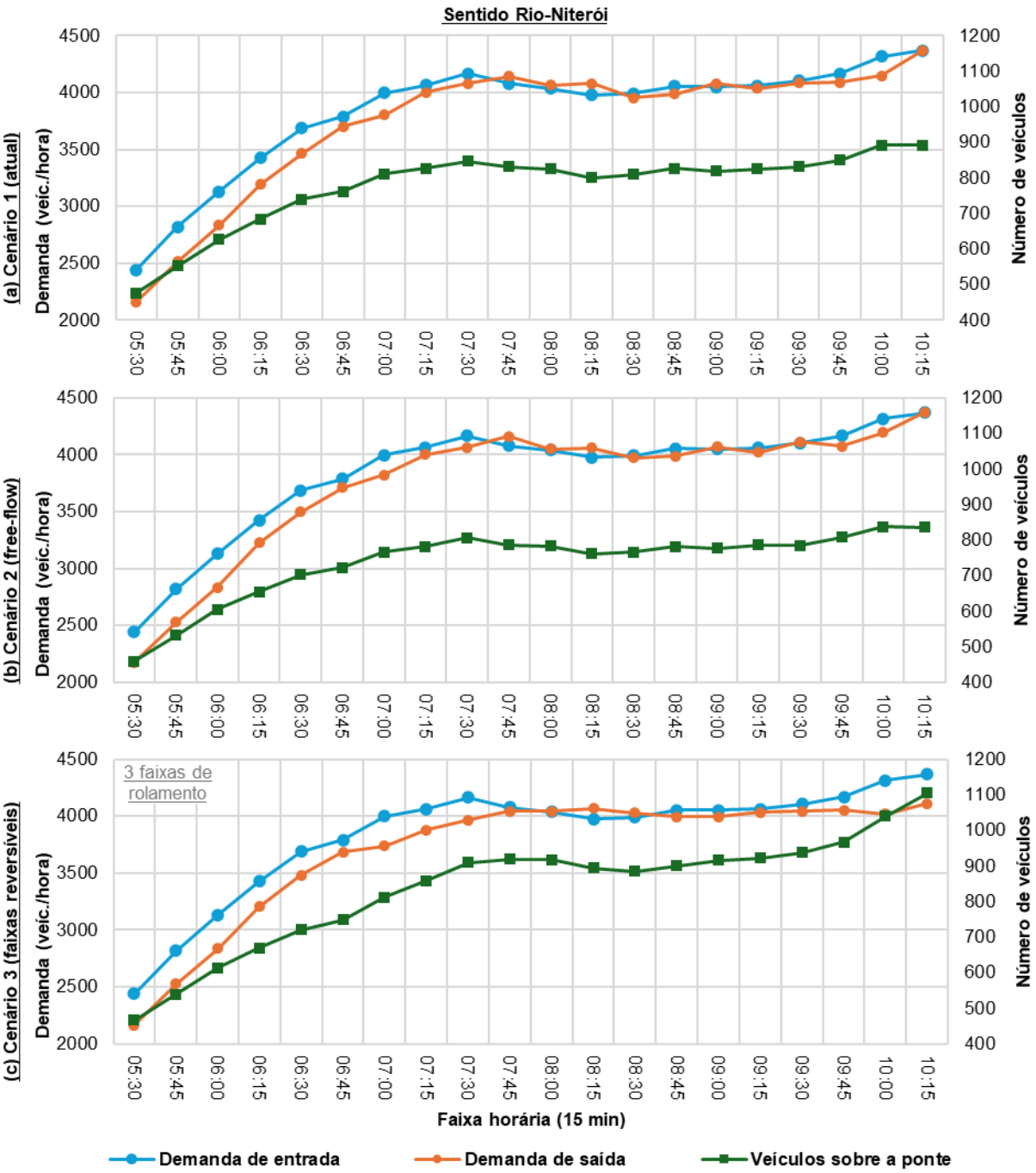

Figura 103 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Rio-Niterói – pico da manhã

7.4.5.1.2. IMPACTO NO HORÁRIO DE PICO DA TARDE

No período da tarde os ganhos com a implantação do sistema de livre passagem (Cenário 2), cujos resultados estão apresentados na Figura 104 (b), são muito mais evidentes, com a redução do tempo de viagem no sentido Rio-Niterói de 25 minutos no pico para cerca de 12 minutos, isto é, praticamente eliminando congestionamentos. O número de veículos trafegando sobre a ponte, exibido na Figura 105 também diminui consideravelmente, de cerca de 2.200, no pico, para 1.200, com a eliminação da zona de armazenamento da praça de pedágio.

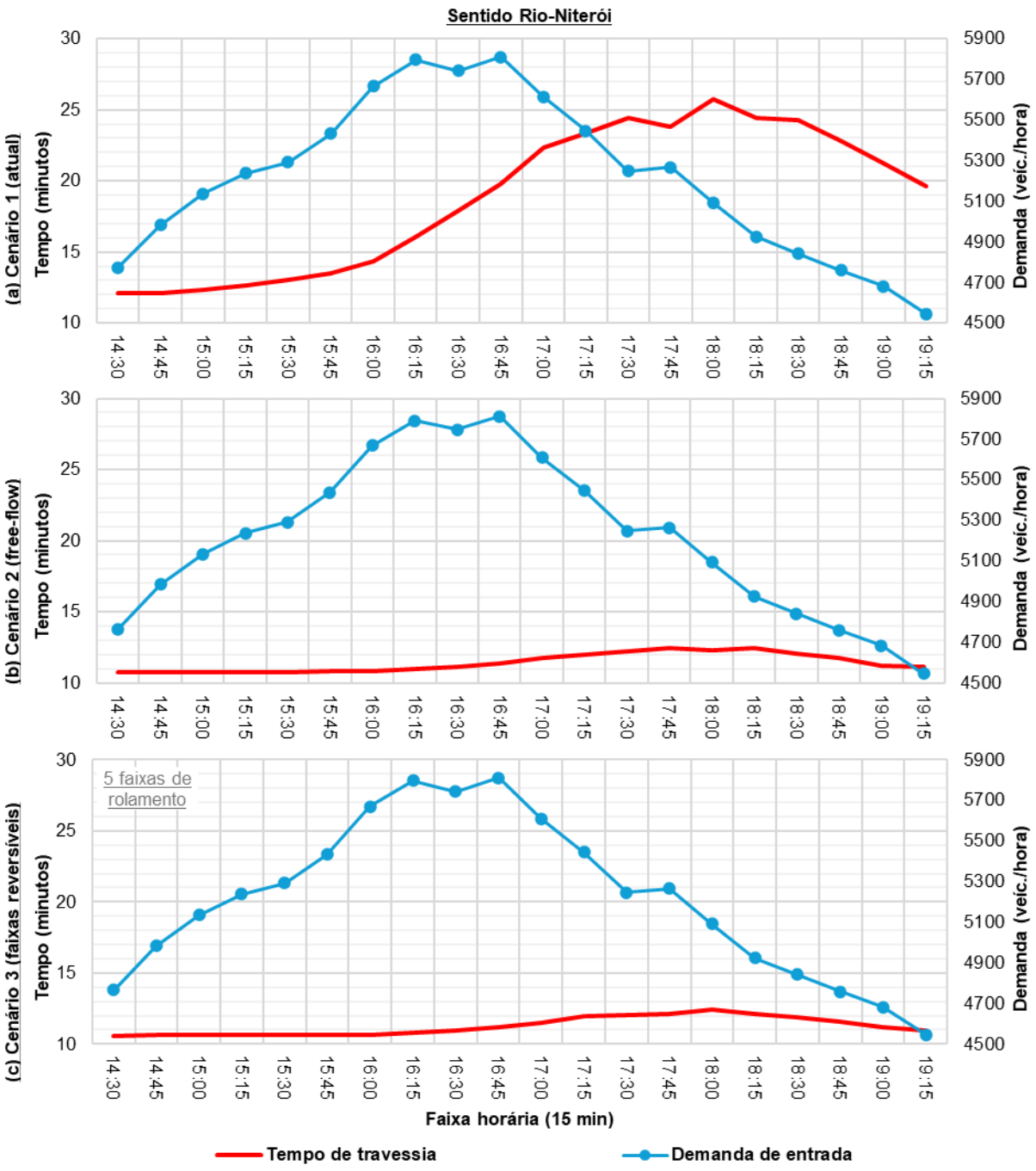

Figura 104 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Rio-Niterói – pico da tarde

A implantação de faixa reversível, neste período (Cenário 3), cujos resultados são apresentados na Figura 104 (c), com a adição de uma faixa de tráfego no sentido Rio-Niterói, não gerou ganhos perceptíveis no tempo de viagem, que se manteve em cerca de 12 minutos, no pico, quando comparado ao Cenário 2 (MLFF). O mesmo se observa no número de veículos trafegando sobre a ponte, exibido na Figura 105 (c). Os resultados indicam que a capacidade da estrutura existente (4 faixas por sentido) seria suficiente para suportar a demanda de tráfego atual neste sentido sem congestionamentos caso houvesse a substituição do sistema de cobrança.

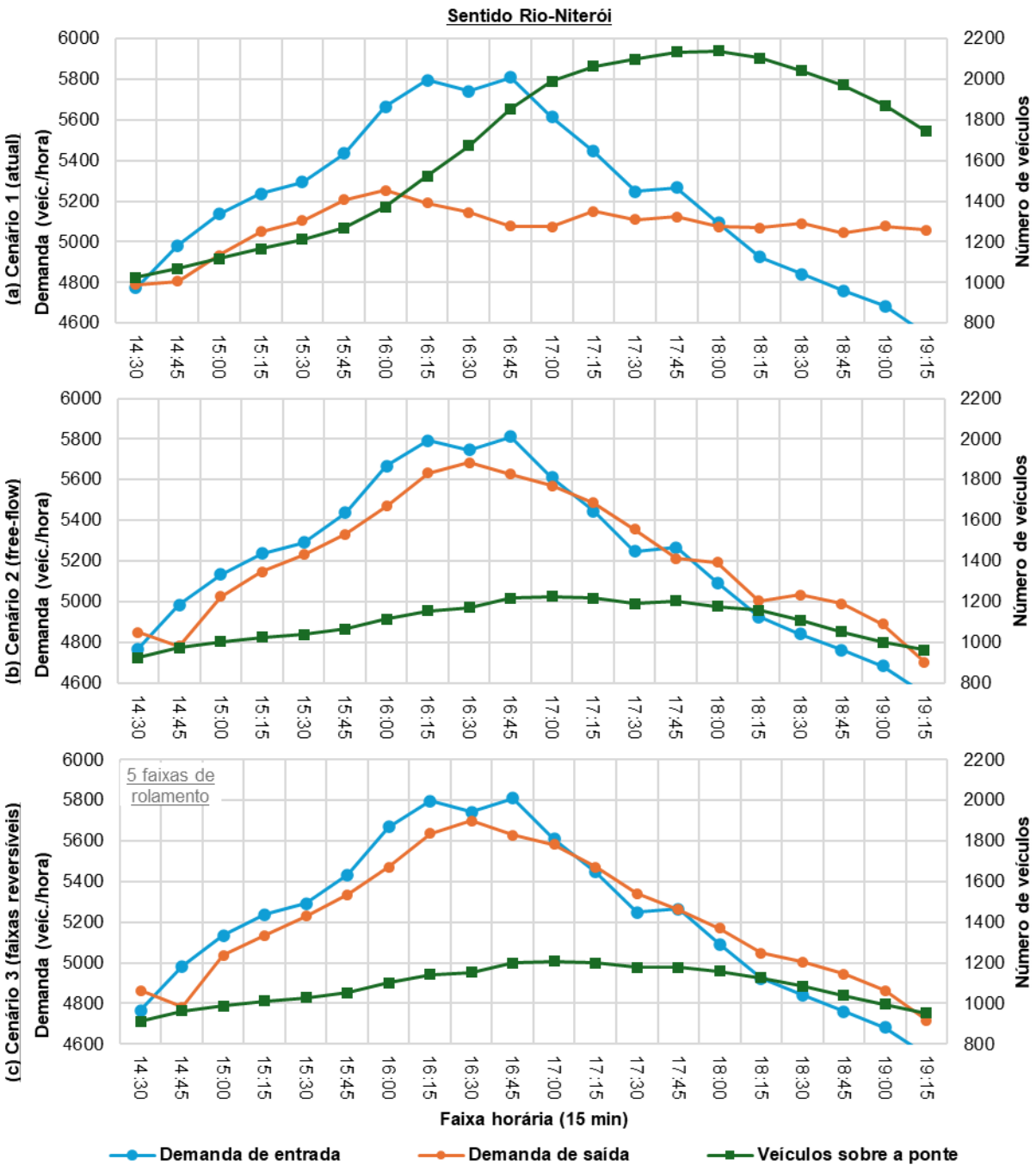

Figura 105 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Rio-Niterói – pico da tarde

No sentido Niterói-Rio, assim como no pico da manhã, o Cenário 1 (situação atual) e o Cenário 2 (MLFF) são equivalentes, e as pequenas flutuações de resultados entre estes dois cenários, observáveis na Figura 106 e na Figura 107 devem-se à aleatoriedade de parâmetros inserida pelo *software* nas simulações. Da mesma forma como no período da manhã, as escalas verticais das figuras apresentadas variam entre os sentidos de tráfego, de forma a melhor caracterizar as variações no comportamento do tráfego ao longo do dia.

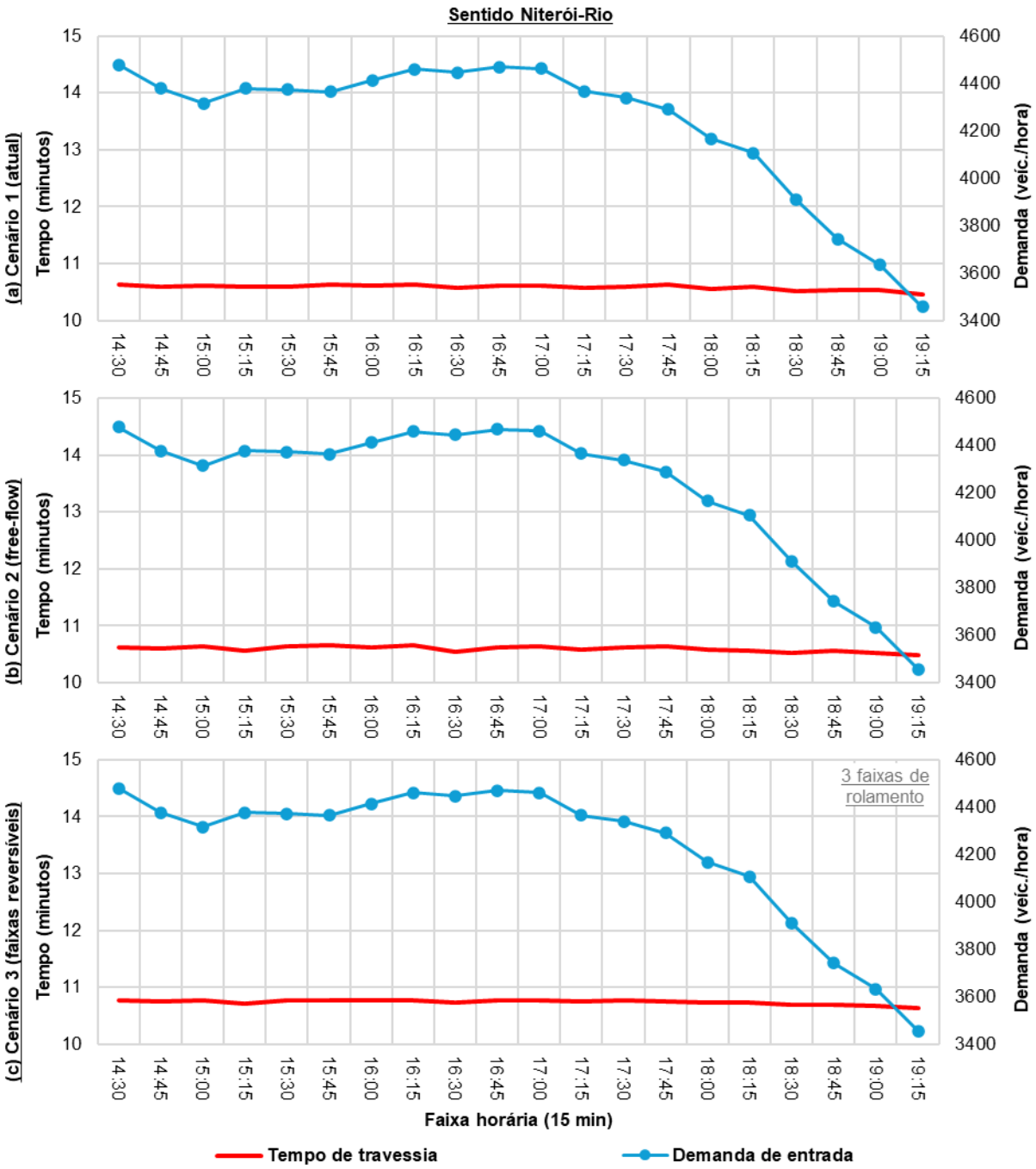

Figura 106 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – Sentido Niterói-Rio – pico da tarde

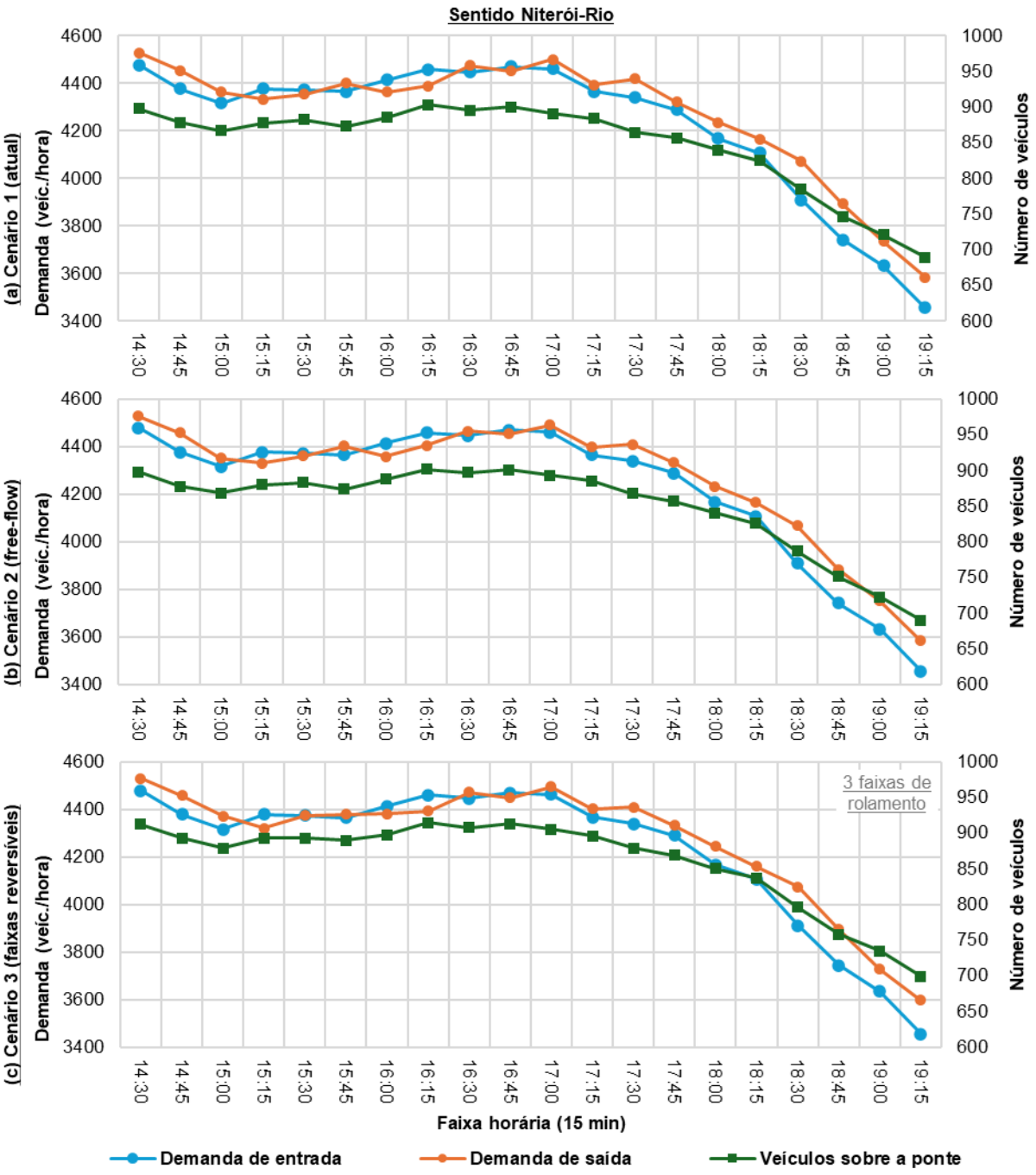

Figura 107 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – Sentido Niterói-Rio – pico da tarde

De forma geral o sistema de faixas reversíveis no período da tarde não apresenta impactos significativos em nenhum dos sentidos. A diminuição de uma faixa de tráfego no sentido Niterói-Rio não gerou aumento considerável no tempo de travessia nem no número de veículos sobre a ponte nesta direção.

7.4.5.2. ANÁLISE 2: ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO ESTRUTURAL E NA DEMANDA

Para as alternativas com intervenção na demanda, foi realizada a análise apenas para o período da manhã, no sentido Niterói-Rio, onde ocorre o maior pico de demanda A Figura 108 apresenta os resultados dos dois cenários simulados, onde é possível observar os impactos da implementação das políticas de variação de demanda na curva de demanda do tráfego de entrada na ponte.

Na comparação entre o Cenário 2 (MLFF), utilizado como referência, e o Cenário 4, onde há a antecipação de 15 minutos no horário de saída, pode-se observar a redução no tempo de travessia da ponte em todas as faixas horárias do período de pico, com o tempo máximo de travessia diminuindo de 23 minutos para cerca de 20 minutos. A Figura 109 (b) mostra a redução do número máximo de veículos sobre a ponte, de cerca de 2.300 para perto de 2.000, o que gera a diminuição no congestionamento.

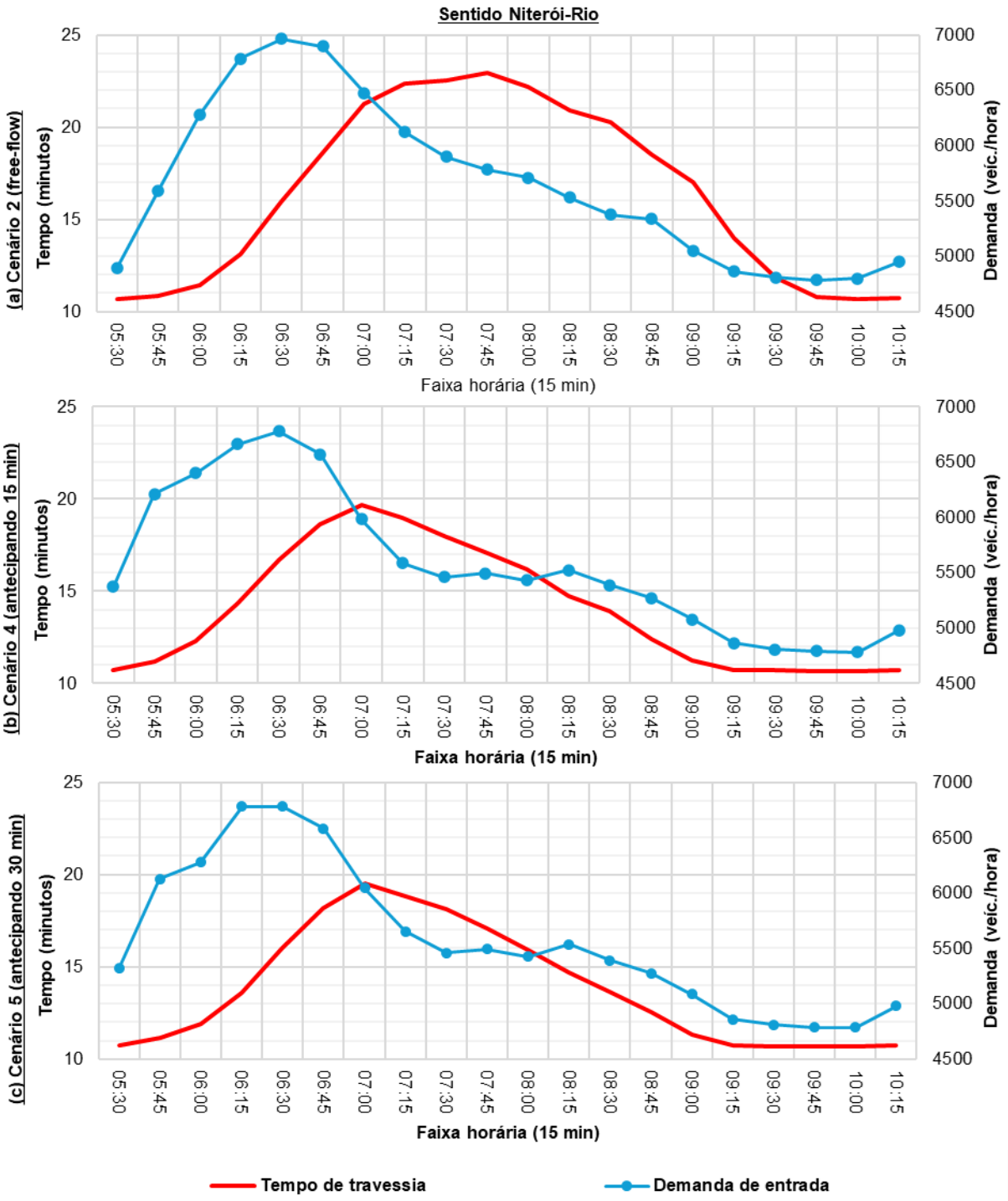

Figura 108 – Comparação entre os tempos de viagem e a demanda – cenários com variação de demanda

Na comparação entre o Cenário 2 (MLFF), utilizado como referência, e o Cenário 4, onde há a antecipação de 15 minutos no horário de saída, pode-se observar a redução no tempo de travessia da ponte em todas as faixas horárias do período de pico, com o tempo máximo de travessia diminuindo de 23 minutos para cerca de 20 minutos. A Figura 109 (b) mostra a redução do número máximo de veículos sobre a ponte, de cerca de 2.300 para perto de 2.000, o que gera a diminuição no congestionamento.

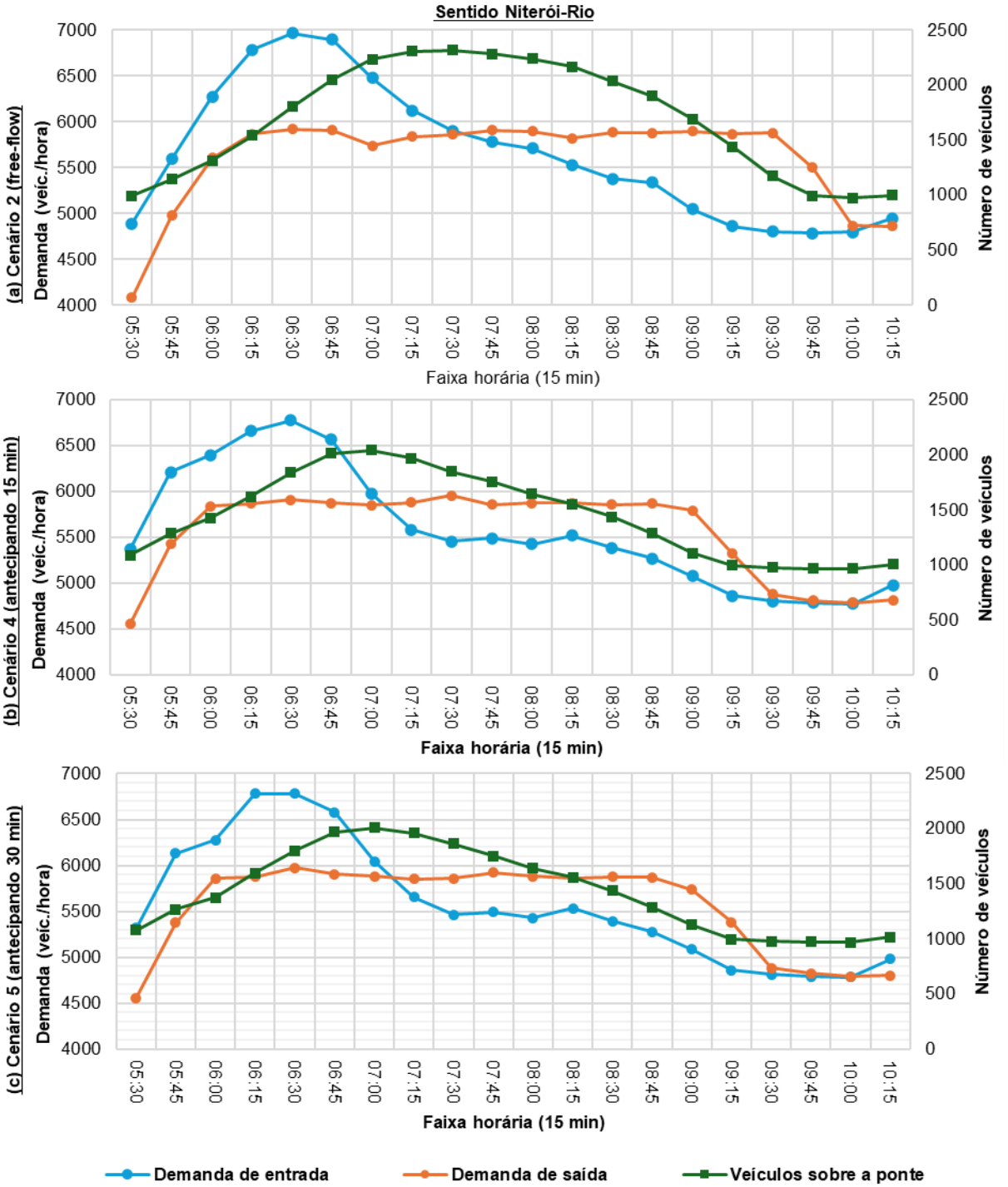

Figura 109 – Demandas de entrada e saída e número médio de veículos sobre a ponte – cenários com variação de demanda

De forma geral, os resultados do Cenário 4 (antecipação de 15 minutos) e do Cenário 5 (antecipação de 30 minutos) são bastante similares. Não há alterações significativas nem no tempo de travessia nem no número de veículos sobre a ponte.

7.4.5.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS

A comparação entre os resultados do Cenário 1, que representa a situação atual, e do Cenário 2, que simula implementação de um sistema de cobrança de livre passagem do tipo *Multi-lane Free Flow* permite afirmar que a substituição sistema atual geraria ganhos expressivos no tempo de travessia na ponte, porém apenas no pico da tarde e no sentido Rio-Niterói, onde haveria a remoção da praça. Neste período, o tempo de viagem poderia ser reduzido dos atuais 25 minutos para cerca de 12 minutos, sem a ocorrência de congestionamento significativo.

A implantação de um sistema de faixas reversíveis na ponte, simulada no Cenário 3, também geraria ganhos operacionais, porém apenas no pico da manhã e no sentido Niterói-Rio, onde ocorre o pico mais acentuado de demanda. Os resultados indicam que, caso fosse implantado entre as 6:00 e as 9:00, o sistema de faixas reversíveis geraria um aumento no tempo de viagem na ordem de um minuto no sentido Rio-Niterói com a remoção de uma faixa de tráfego, mas uma redução de cerca de 8 minutos no tempo de viagem no sentido Niterói-Rio, onde a demanda é consideravelmente maior.

A implementação de políticas de variação de demanda, por sua vez, também pode gerar ganhos operacionais expressivos na ponte. Em ambos os cenários simulados, os tempos de viagem foram reduzidos de forma expressiva em todas as faixas horárias do período de pico.

7.5. SINISTROS NA PONTE RIO-NITERÓI

Com o objetivo de estimar a quantidade de sinistros de trânsito que poderiam ser evitados após a implementação do sistema MLFF, foi realizada uma análise dos sinistros de trânsito registrados entre agosto de 2022 e novembro de 2024 no trecho da concessão Ecovias Ponte. Foram recebidos os dados de todos os sinistros registrados nesse período com identificação da data e hora e quilômetro/sentido do fato, além das características do tipo de sinistro, vítimas envolvidas, gravidade, entre outras. Além de uma planilha geral com os sinistros de toda a concessão nesse período, foi recebida também uma planilha específica somente dos registros no km 322 sentido Rio-Niterói (norte), onde está localizado o pedágio da concessão. Nessa planilha, foram informadas características adicionais dos sinistros, como a localização específica no entorno do pedágio. Tendo em vista que o pedágio é localizado no sentido norte da rodovia (sentido Rio-Niterói), os dados a seguir apresentados se referem aos sinistros registrados somente no sentido norte.

A Figura 110 ilustra a evolução do número de sinistros no período analisado, considerando o total de sinistros registrados ao longo de toda a extensão da concessão Ecovias Ponte e os sinistros ocorridos especificamente no km 322 (localização do pedágio), de forma a comparar o percentual de registros ocorridos na praça de pedágio e no total da rodovia.

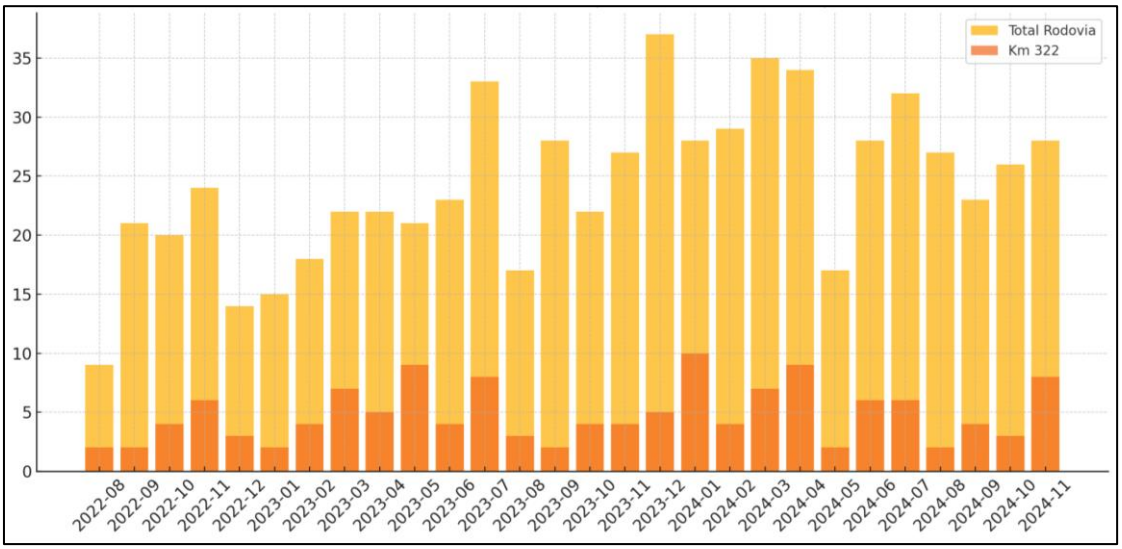

Figura 110 - Evolução dos sinistros registrados

Observando o total de sinistros registrados na rodovia, verifica-se uma oscilação significativa nos valores ao longo do período analisado, variando entre aproximadamente 15 e 35 sinistros mensais. Alguns picos podem ser observados em junho de 2023 e março de 2024. Em contrapartida, meses de menor incidência também foram identificados, como em agosto de 2023 e maio de 2024.

Os sinistros no entorno do pedágio representaram, nos meses analisados, um percentual que varia entre 7,14% e 42,86%. Considerando o total de sinistros no período, os registros no km 322. Embora a amplitude das variações seja menor, os picos observados no km 322 tendem a

coincidir com os períodos de maior registro de acidentes no total da rodovia.

Não é possível identificar uma influência clara da localização de pedágio na variabilidade temporal de sinistros registrados. A análise conjunta das duas séries indica que eventos que afetam a rodovia como um todo também impactam a praça de pedágio, podendo estar relacionado à sazonalidade, condições climáticas e volume de tráfego.

A Figura 111 compara o número de sinistros registrados conforme a gravidade registrada em termos de vítimas envolvidas, sendo elas: "Acidente com vítima fatal", "Acidente com vítima" e "Acidente com vítima ilesa". Primeiramente, observa-se que não foram registrados sinistros com vítimas fatais no entorno do km 322 (pedágio).

Quanto aos sinistros com vítimas, embora o trecho específico do km 322 também registre um número expressivo de sinistros com vítimas, sua proporção em relação ao total da rodovia é menor. No total da rodovia, a maior parte dos acidentes registrados são com vítima (54%). Já no entorno do pedágio, a maioria dos registros são com vítimas ilesas (56%). É importante considerar que os registros no entorno do pedágio representam cerca de 20% do total de sinistros no trecho concessionado.

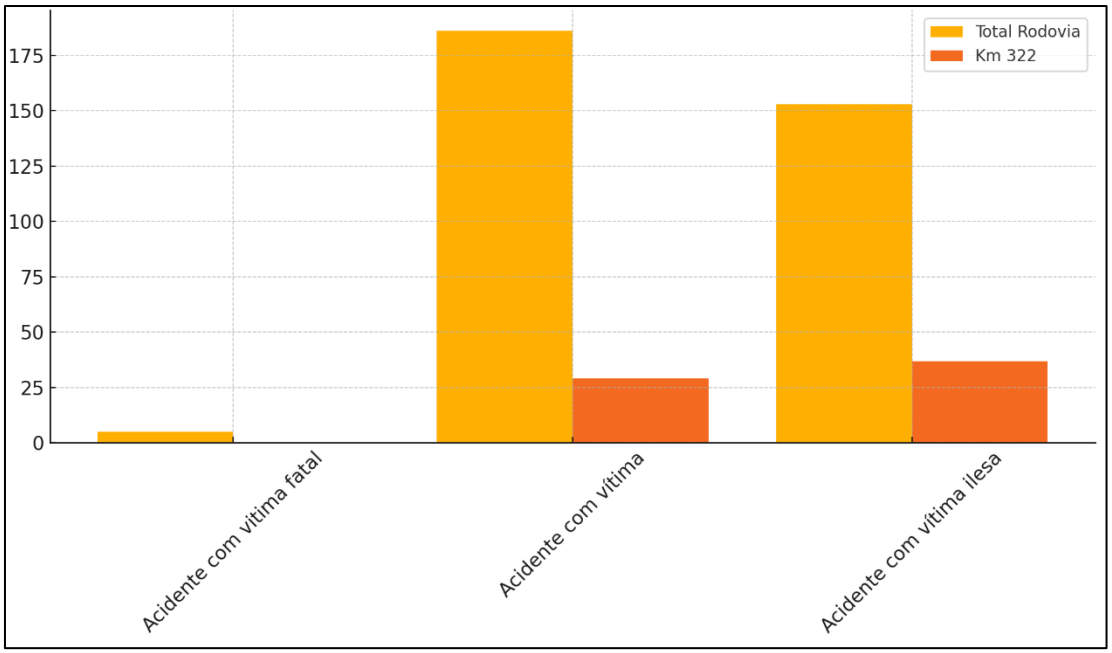

Figura 111 – Gravidade dos sinistros

Uma análise da quantidade de sinistros por tipo é apresentada na Figura 112, permitindo identificar os tipos de acidentes mais recorrentes. A "Colisão Traseira" é o tipo de sinistro mais prevalente, com valores significativamente mais elevados em comparação aos outros tipos de acidentes, tanto no total da rodovia quanto no entorno do pedágio (km 322). Esse tipo de acidente é amplamente conhecido por estar associado a fatores como falta de atenção, proximidade excessiva entre veículos e tráfego intenso.

Entretanto, considerando somente os registros no entorno do pedágio (registros no km 322), a

"Colisão lateral no mesmo sentido" se destaca. Esse tipo de acidente pode estar relacionado a mudanças de faixa, fato recorrente nas proximidades das praças de pedágio. “Queda de Moto” e “Engavetamento” são os tipos de sinistros que também se destacam, apesar de serem em menor quantidade.

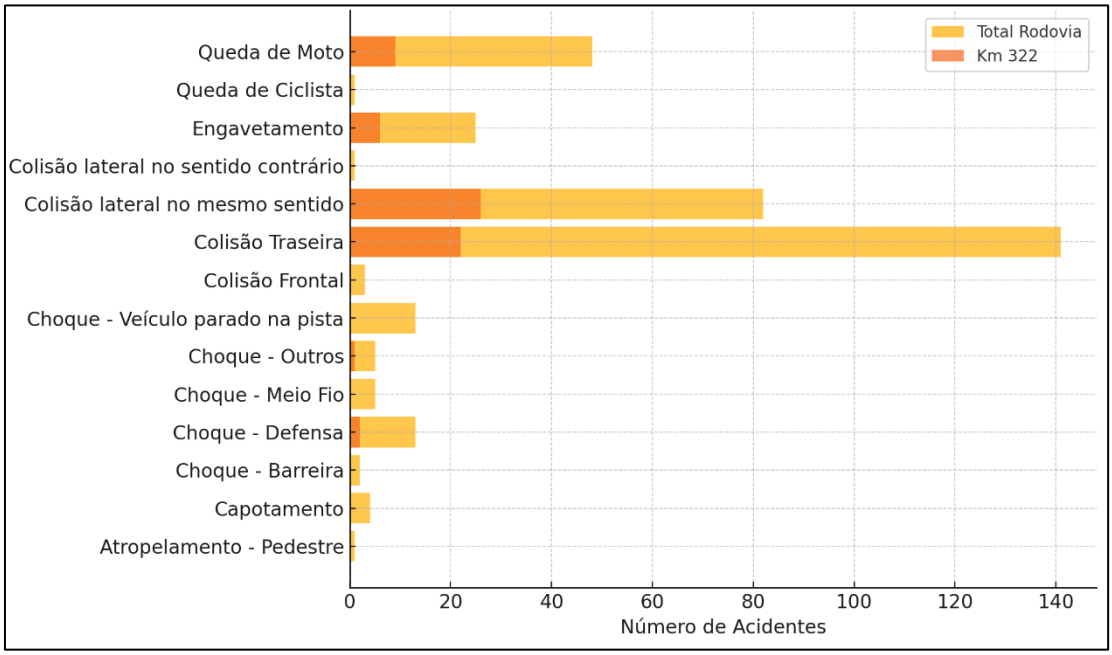

Figura 112 – Tipo dos sinistros

A Figura 113 apresenta a distribuição dos sinistros registrados em diferentes locais no entorno do pedágio. Observa-se que o maior número de sinistros ocorre diretamente na área do pedágio, com mais de 50 registros, indicando que este é o ponto mais crítico da região. Essa alta incidência pode ser atribuída à concentração de fluxos de veículos, alterações de velocidade e mudanças de faixa realizadas de forma inadequada pelos motoristas.

Além do pedágio, outros pontos de destaque são as faixas 1, 3 e 4, que também apresentam números significativos de sinistros. Isso sugere que os sinistros estão diretamente relacionados ao processo de transição e organização de veículos antes e após a passagem pelo pedágio. Por outro lado, locais como B.O., By Pass e Posto C têm registros consideravelmente mais baixos, indicando menor risco de sinistros.

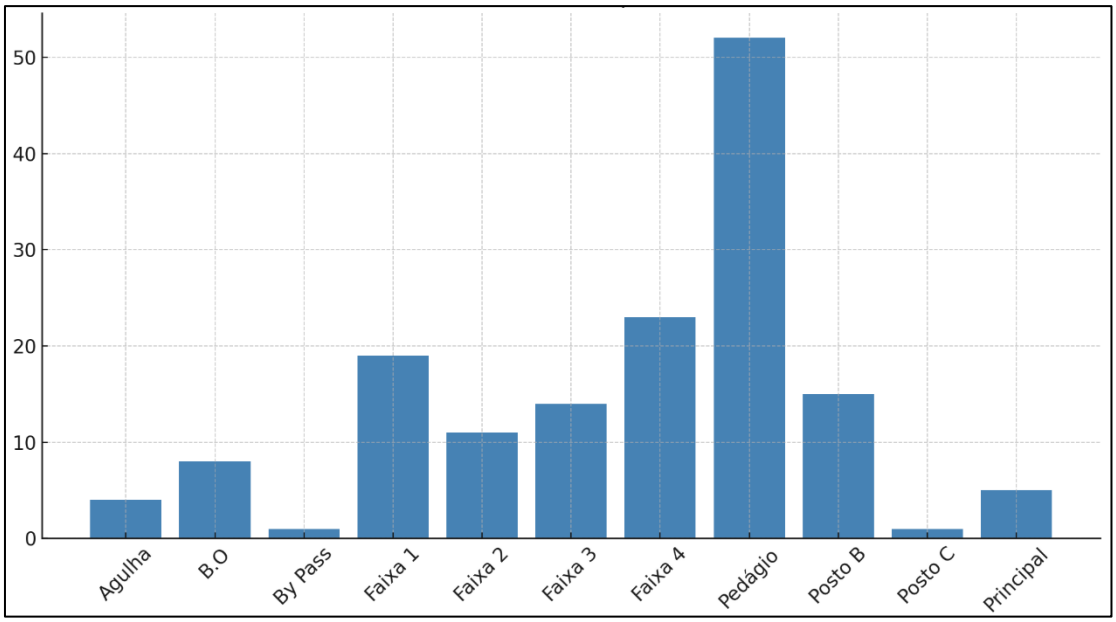

Figura 113 – Localização dos sinistros no entorno do pedágio

A Figura 114 apresenta a quantidade de sinistros distribuída ao longo das faixas horárias nas proximidades do pedágio, revelando variações significativas no número de sinistros durante o dia. Os horários de maior concentração de sinistros coincidem com os períodos de pico na rodovia, especialmente entre 07:00 e 08:30, e no final da tarde, entre 17:00 e 19:30. Esses intervalos estão associados ao aumento do volume de tráfego causado pelos deslocamentos diários, conforme visto no capítulo anterior. O alto fluxo de veículos durante esses períodos pode contribuir para maior incidência de colisões, principalmente devido ao aumento do número de interações entre veículos e condições de tráfego intenso.

Por outro lado, os períodos noturnos e da madrugada apresentam uma redução considerável no número de sinistros, como observado entre 01:00 e 05:00, quando o fluxo de veículos é menor. Entretanto, mesmo em horários fora do pico, há uma frequência constante de sinistros durante o restante do dia, indicando que outros fatores, como distrações, cansaço e condições climáticas, também influenciam na ocorrência de sinistros. Esses padrões reforçam a necessidade de intervenções estratégicas nos horários de maior movimento, como reforço da fiscalização, melhorias na sinalização e campanhas de conscientização direcionadas à segurança nos horários de pico.

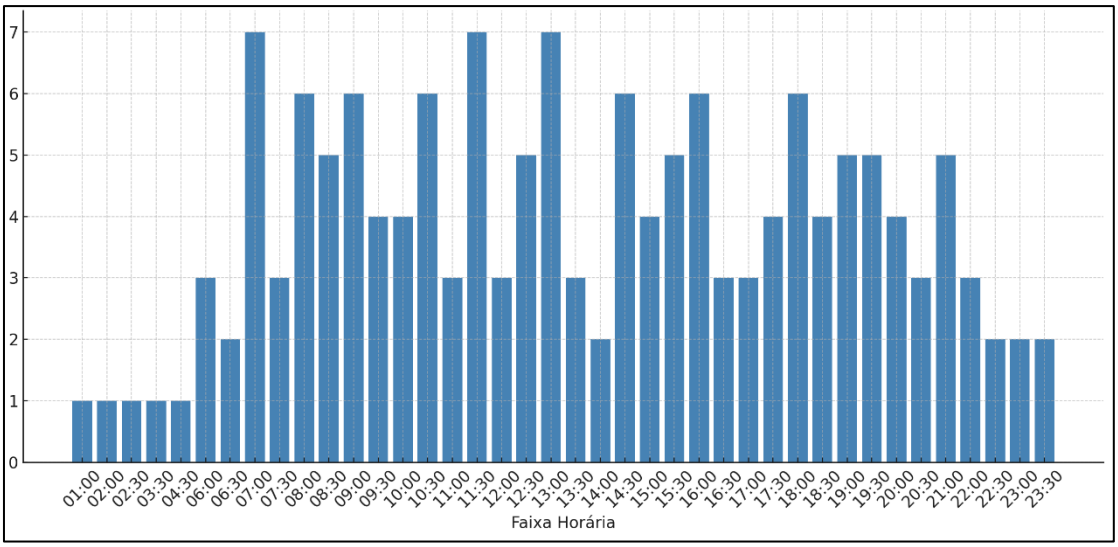

Figura 114 – Quantidade de sinistros por hora

Examinando os tipos de sinistros conforme os locais apresentados anteriormente na Figura 5, observa-se que o tipo predominante na seção "Pedágio" é a *Colisão Lateral no mesmo sentido*, conforme visto na Figura 115, enquanto os demais locais (Faixas, Agulha, Bypass, etc.) concentram sinistros do tipo *Colisão Traseira*. Os *choques com Defensa, Barreira, Praça* e *Outros* apresentam maior concentração também diretamente no Pedágio, assim com a *Colisão Transversal*. O único tipo de sinistro não registrado diretamente no Pedágio é o *Tombamento*.

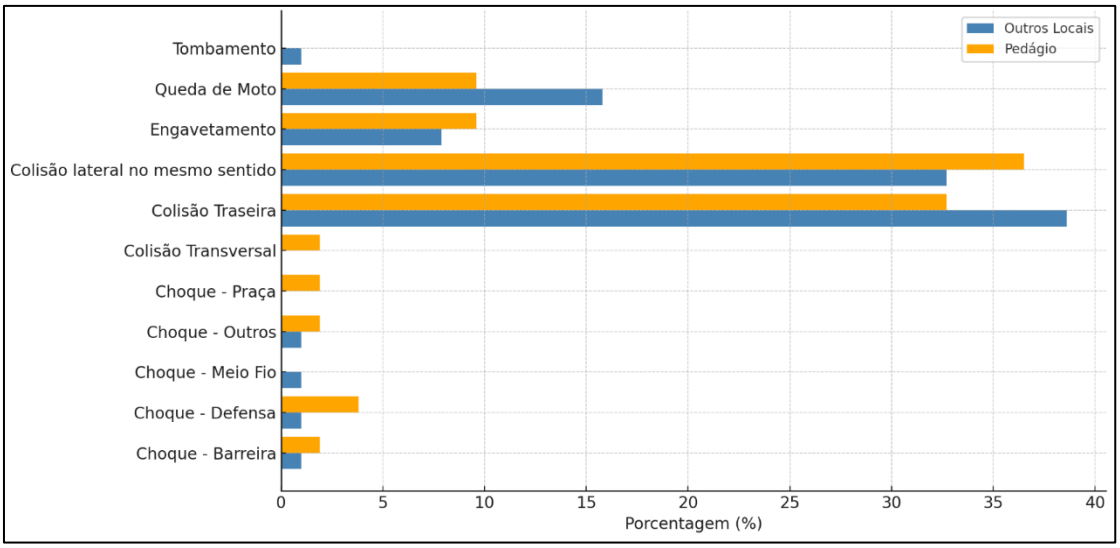

Figura 115 – Tipo de sinistro por localização

Tendo esses dados como situação atual, pode-se estimar a quantidade de sinistros que foram evitados devido à implantação do MLFF. Gross *et al.* (2021) concluíram que tanto os sistemas híbridos (adição de faixas MLFF a uma praça convencional, onde os usuários podem escolher qual sistema utilizar), quando os sistemas de MLFF são associados a um menor número de sinistros do que as praças convencionais. De forma geral, os MLFF estão relacionados à melhora na segurança viária por proporcionarem maior fluidez do tráfego, reduzindo a variabilidade de velocidade (Gordin *et al.*, 2011) e a necessidade de mudanças de faixas. Outros

autores também concluíram em seus estudos que os MLFF impactam positivamente na segurança viária, com a redução no número e na severidade dos sinistros associados às praças de pedágio (Abuzwidah e Abdel-Aty, 2018; Abuzwidah et al., 2014; Chakraborty et al., 2020; Yang et al., 2012).

A tabela abaixo apresenta as estimativas de redução no percentual dos sinistros ao converter sistemas convencionais de pedágio (sistema atual da Ecovias Ponte, compostos por barreira física convencional, que pode ser formada por faixas de cobrança manual, onde os veículos são obrigados a parar, ou eletrônica, onde devem reduzir sua velocidade por motivos de segurança) para sistemas híbridos (adição de faixas MLFF a uma praça convencional, onde os usuários podem escolher qual sistema utilizar) ou sistemas MLFF (dispositivo sem barreira física, com características semelhantes às típicas da rodovia, onde a cobrança é realizada por meios totalmente eletrônicos e o veículo trafega sem desaceleração).

Tabela 26 – Impacto na segurança viária nos estudos encontrados.

Autores	Comparação	Resultado
Gordin *et al.* (2011)	Convencional para híbrido	Redução de mais de 50% na taxa em 5 das 6 praças analisadas.
Yang *et al.* (2012)	Convencional para híbrido	Redução entre 17% e 40% na taxa em 5 das 7 praças analisadas.
Abuzwidah *et al.* (2014)	Convencional para híbrido	Redução de 47,3% no número de sinistros totais, 54,2% nos com danos materiais, e 46,2% nos com fatalidade e feridos.
Abuzwidah e Abdel-Aty (2018)	Convencional para híbrido	Redução de 44,7% no número de sinistros.
	Convencional para MLFF	Redução de 72,6% no número de sinistros
Chakraborty *et al.* (2020)	Híbrido para MLFF	Redução de 12% no número de sinistros totais de 3,4% a 8,4% nos com danos materiais, e de 15,5% a 20,9% nos com fatalidade e feridos.
Gross *et al.* (2021)	Convencional para MLFF	Redução de 76% no número total de sinistros.

Dessa forma, considerando que a remoção do pedágio na Ecovias Ponte foi uma conversão de convencional para MLFF, espera-se uma redução de cerca de 73 a 76% nos sinistros registrados no entorno do pedágio, ou seja, menos cerca de 50 sinistros considerando o total de registros entre dezembro de 2023 e novembro de 2024 (total de 66 sinistros no km 322). Em termos do total da rodovia, esse percentual representa 14,5% dos sinistros registrados no último ano de dados disponíveis.

7.6. ANÁLISE DE ASSERTIVIDADE DO SISTEMA MULTI-LANE FREEFLOW

Para análise de assertividade do sistema *Multi-lane Free Flow*, foram analisados os dados do pórtico em teste instalado pela Sinelec e Ecovias Ponte no sentido Niterói-Rio da ponte (sentido contrário ao pedágio). Os dados do pórtico em teste correspondem ao mês de março de 2025. O portal experimental pode ser utilizado em condições reais para testar a viabilidade técnica das escolhas, o desempenho de cada um dos aparelhos, diante da alta velocidade, condições variáveis de tráfego e clima. A Figura 116 e Figura 117 apresentam a localização e o pórtico em teste implementado na Ponte Rio Niterói.

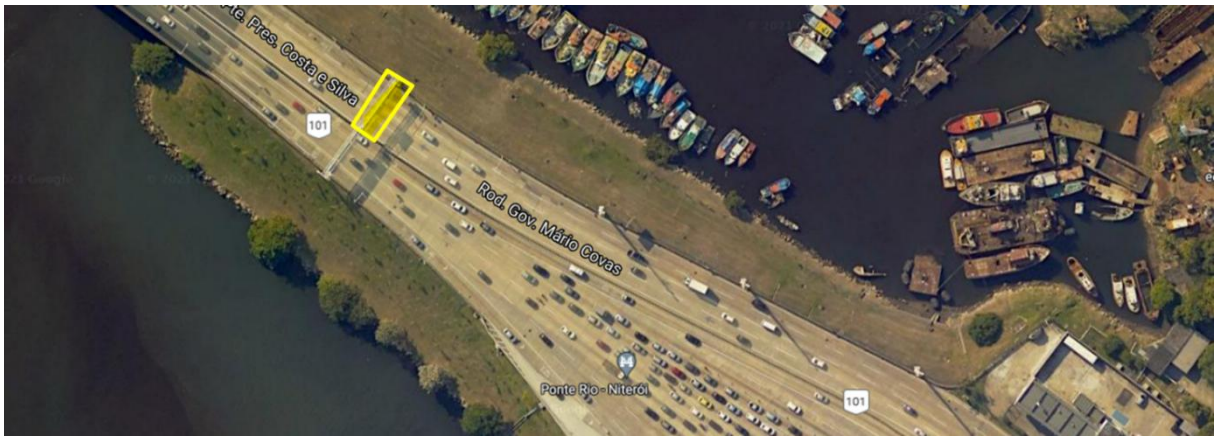

Figura 116 – Localização do pórtico teste MLFF

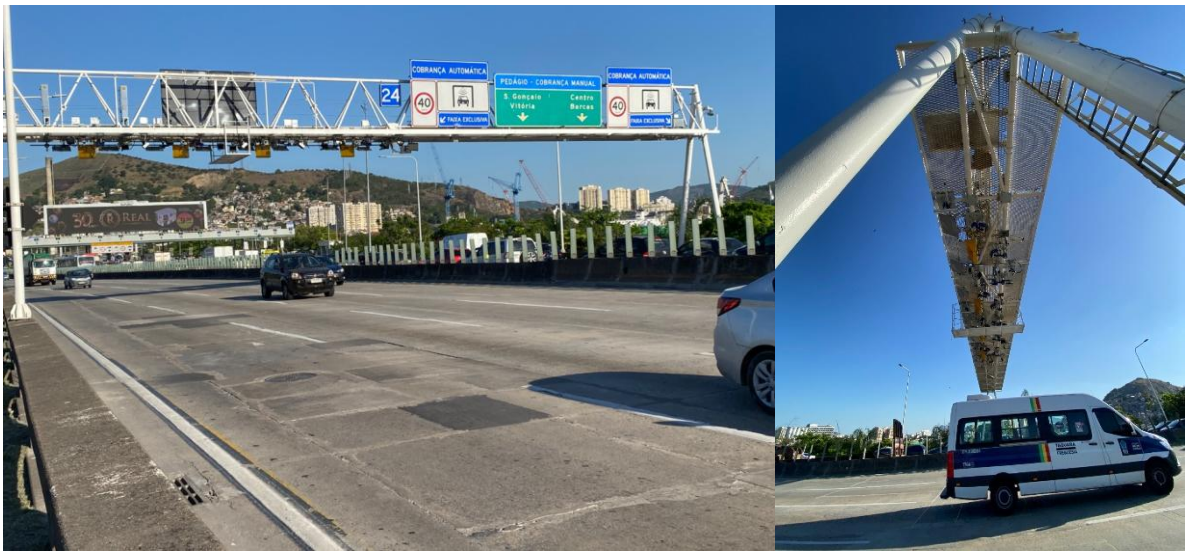

Figura 117 – Pórtico teste MLFF

A Tabela 27 apresenta para cada categoria de cobrança definida pelo sistema qual o percentual de veículos que efetivamente possui o número de eixos compatível com a categoria. Por exemplo, na categoria 01 (automóveis), 89,29% dos veículos possuem 2 eixos e nenhum eixo suspenso (categorização correta). Entretanto, também foram identificados pelo sistema veículos com um número de eixos e eixos suspensos incompatíveis com a categoria 01. Esses veículos foram categorizados incorretamente na categoria 01.

Por outro lado, é importante ressaltar que uma assertividade de 100% não significa que todos os veículos que passaram pelo pórtico no período analisado foram categorizados corretamente, pois podem ter sido registrados erroneamente em outra categoria ou não foram categorizados. Ou seja, um nível de assertividade de 100% indica que todos os veículos identificados como pertencentes àquela categoria, possuem de fato o número de eixos de cobrança igual ao da categoria (Ex: CAT 6+4 apresenta veículos com 5 eixos ou com 6 eixos sendo 1 suspenso, totalizando 5 eixos cobrados).

As categorias correspondentes aos caminhões de 8 eixos, automóveis com semirreboque e motos foram as com menor assertividade do número de eixos, ou seja, dentro dessas categorias foram classificados uma maior quantidade de veículos que não possuem número de eixos compatíveis com essas categorias. Para os caminhões de 8 eixos, quase 50% dos veículos incluído nessa classificação possuíam número de eixos diferente de 8 (ou 9 eixos e 1 suspenso). Para as motos, cerca de 78% dos veículos possuíam de fato 2 eixos. Os demais 22% foram categorizados incorretamente e possuíam mais de 2 eixos, número incompatível com motos. Esta dificuldade de categorização ocorre devido às características físicas das motocicletas e ao padrão de direção dos motoristas. O menor porte, área refletiva reduzida e maior exposição a intempéries compromete a leitura eficaz por sistemas de OCR e antenas de identificação, especialmente em condições adversas ou de tráfego rápido.

Ainda, destaca-se que o sistema MLFF não classificou veículos nas categorias 12, 14 e 16, que representam, respectivamente, ônibus de 2 eixos, 3 eixos e 4 eixos. Esses veículos foram categorizados junto aos caminhões nas categorias CAT 02, CAT 03 e CAT 04.

Tabela 27 – Percentual de veículos que possuem número de eixos compatível com a categoria (MLFF Ecovias Ponte - março/2025)

Categoria	Descrição	Eixos cobrança	Com placa %	Sem placa %	Total %
MOTO	Motos	2	77,23%	0,16%	77,39%
CAT 01	Automóveis	2	89,01%	0,28%	89,30%
CAT 02	Caminhão 2 eixos	2	86,80%	0,78%	87,58%
CAT 03	Caminhão 3 eixos	3	93,17%	1,78%	94,95%
CAT 04	Caminhão 4 eixos	4	91,39%	1,09%	92,48%
CAT 05	Caminhão 5 eixos	5	86,04%	1,05%	87,09%
CAT 06	Caminhão 6 eixos	6	96,91%	1,17%	98,08%
CAT 07	Auto + semirreboque	3	73,50%	0,41%	73,92%
CAT 08	Auto + reboque	4	92,93%	0,60%	93,53%
CAT 6+1	Caminhão 7 eixos	7	96,18%	1,16%	97,34%
CAT 6+2	Caminhão 8 eixos	8	49,79%	2,07%	51,87%
CAT 6+3	Caminhão 9 eixos	9	93,77%	0,39%	94,16%
CAT 6+4	Caminhão +10 eixos	10	100,00%	0,00%	100,00%

A tabela abaixo apresenta a composição de tráfego para a Ecovias Ponte segundo o sistema MLFF no período analisado e a composição da concessão no mesmo período. É possível observar que a composição segundo o sistema MLFF apresenta um percentual de veículos

pesados inferior ao da Ecovias Ponte, sugerindo que muitos veículos pesados não foram categorizados ou foram categorizados incorretamente dentro das categorias de veículos leves (CAT 01, CAT 07 e CAT 08). Essa informação é ratificada pelos dados da tabela anterior, onde essas três categorias apresentam assertividade do número de eixos de 89,30%, 73,92% e 93,53%, respectivamente.

Tabela 28 – Composição de tráfego (março/2025)

Categoria	Descrição	% MLFF	% Ecovias Ponte
MOTO	Motos	6,55%	9,90%
CAT 01	Automóveis	85,54%	83,93%
CAT 07	Auto + semirreboque		
CAT 08	Auto + reboque		
CAT 02	Caminhão 2 eixos	3,88%	6,15%
CAT 03	Caminhão 3 eixos		
CAT 04	Caminhão 4 eixos		
CAT 05	Caminhão 5 eixos		
CAT 06	Caminhão 6 eixos		
CAT 6+1	Caminhão 7 eixos		
CAT 6+2	Caminhão 8 eixos		
CAT 6+3	Caminhão 9 eixos		
CAT 6+4	Caminhão +10 eixos		
CAT 12	Ônibus	0,00%	0,02%
CAT 14	Ônibus		
CAT 16	Ônibus		
Não identificado		4,03%	0,00%

Por fim, foi realizada uma análise da leitura e consolidação das placas dianteiras e traseiras dos veículos registrados. Para a leitura de placas, ao identificar um veículo passando pelo pórtico, o sistema faz a leitura preferencialmente da placa dianteira, e, em seguida, da placa traseira. A consolidação da placa se dá da seguinte maneira: (i) caso a placa dianteira seja legível, essa será a placa consolidada; (ii) caso a placa dianteira não seja legível, mas a placa traseira seja, essa será a placa consolidada. Entretanto, caso as leituras de placa através do OCR não sejam legíveis, é realizado um processo manual de consolidação das placas.

Dessa forma, a Tabela 29 apresenta o percentual de placas consolidadas, por categoria e por período do dia, onde a placa consolidada foi igual a pelo menos uma das placas (dianteira ou traseira) e quando foi igual à ambas as placas. A maior diferença ocorre na CAT 6+3 (caminhões de 9 eixos), onde a assertividade é cerca de 8,95% superior durante a noite. Na CAT 6+4 (caminhões de 10 eixos), a consolidação de placas é superior durante o dia, ao contrário das demais categorias.

Tabela 29 – Percentual de placa consolidada igual à placa dianteira ou traseira

Categoria	PELO MENOS UMA			AMBAS		
	DIA	NOITE	DIF %	DIA	NOITE	DIF %
CAT 01	98,58%	99,15%	-0,57%	86,31%	88,29%	-1,98%
CAT 02	94,85%	96,26%	-1,41%	50,41%	57,60%	-7,19%
CAT 03	94,50%	96,20%	-1,69%	54,71%	58,51%	-3,80%
CAT 04	94,67%	96,66%	-1,99%	54,62%	55,35%	-0,72%
CAT 05	91,97%	95,65%	-3,68%	19,08%	12,94%	6,14%
CAT 06	93,42%	95,94%	-2,52%	6,09%	1,89%	4,20%
CAT 07	95,47%	98,20%	-2,73%	71,74%	73,58%	-1,84%
CAT 08	92,39%	96,52%	-4,12%	57,67%	55,40%	2,27%
CAT 6+1	91,98%	94,61%	-2,63%	8,49%	2,19%	6,30%
CAT 6+2	90,43%	97,62%	-7,18%	20,87%	8,73%	12,14%
CAT 6+3	87,95%	96,90%	-8,95%	6,70%	1,03%	5,66%
CAT 6+4	82,00%	80,00%	2,00%	34,00%	20,00%	14,00%
MOTO	93,21%	96,60%	-3,38%	1,86%	0,82%	1,05%
Não identificado	0,25%	1,41%	-1,16%	0,11%	0,83%	-0,72%

Ao analisar a assertividade para ambas as placas, ou seja, a placa consolidada é igual tanto à placa dianteira como à placa traseira, o percentual cai para todas as categorias. O maior percentual observado é para a CAT 01 (automóveis), onde 86,31% das placas consolidadas eram iguais à ambas as placas durante o dia e 88,29% durante a noite. Para a CAT 02, CAT 03, CAT 04 e CAT 07 a assertividade também foi maior no período noturno. Entretanto, para as demais categorias, a assertividade é significativamente maior no período diurno, sugerindo que há maior facilidade de leitura correta de ambas as placas para a maioria das categorias de veículos pesados quando há iluminação solar.

As análises de assertividade apresentadas neste relatório são relativas a dados obtidos a partir do sistema experimental, em teste, implantado na Ponte Rio-Niterói no mês de março de 2025. O sistema, entretanto, está em constante aperfeiçoamento. Este sistema já se encontra em operação plena, em pórticos MLFF na Concessionária EcoNoroeste, deste setembro de 2024. Neste ambiente, o sistema vem sendo continuamente monitorado pela equipe de acompanhamento e operação e tem apresentado desempenho satisfatório.

8. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

Este documento apresenta o relatório final do projeto desenvolvido com Recurso de Desenvolvimento Tecnológico, cujo objetivo geral foi estudar os impactos da implantação do sistema *Multi-Lane Free Flow* (MLFF) e avaliar a assertividade do conjunto de classificação em laboratório pré-montado na Ponte Rio-Niterói. O projeto compreendeu uma série de estudos que buscaram (i) caracterizar e avaliar as condições atuais de demanda e operação da Ponte, (ii) analisar os impactos da solução MLFF nas condições operacionais atuais e futuras, e (iii) examinar os impactos da introdução de sistemas de tarifa variável e faixas reversíveis como medidas complementares ao MLFF.

Para atingir o primeiro objetivo, foram realizadas análises detalhadas do tráfego de veículos pagantes na praça de pedágio e uma pesquisa origem-destino, visando avaliar as condições atuais de operação da rodovia. No segundo objetivo, foram simulados cenários no software de microssimulação, incluindo o cenário base (representando o sistema atual) e sua substituição pelo sistema de livre passagem. Cenários futuros também foram analisados, combinando o MLFF com diferentes configurações de demanda obtidas por meio de uma pesquisa de preferência declarada (PD).

Em relação ao terceiro objetivo, foram realizados diversos estudos, incluindo a pesquisa de preferência declarada, a simulação de cenários com faixas reversíveis, a análise de sinistros e a avaliação da assertividade do sistema MLFF. A pesquisa de preferência declarada permitiu compreender e quantificar as preferências dos usuários em relação a mudanças no horário de viagem, além de analisar a disposição dos motoristas a alterar seus horários de passagem pela ponte diante de variações tarifárias em horários fora do pico. A simulação, por sua vez, focou em análises comparativas, considerando tanto a substituição do sistema de cobrança por MLFF quanto faixas reversíveis e políticas de redistribuição de demanda.

Esta seção apresenta uma síntese dos resultados obtidos, discussões e ponderações finais, que foram detalhadas nas subseções seguintes.

8.1. ANÁLISE DOS DADOS DE TRÁFEGO DA PRAÇA DE PEDÁGIO DA ECOVIAS PONTE

A análise dos dados de tráfego inclui dados de veículos pagantes na Praça de Pedágio da Concessão Ecovias Ponte, localizada na saída da ponte Rio-Niterói no sentido Rio-Niterói, entre setembro de 2015 e agosto de 2023. A análise abrangeu o volume de veículos pagantes no sentido Rio-Niterói, examinando sua distribuição mensal assim como a evolução do pagamento automático de pedágio na praça.

Os resultados revelaram um aumento no volume total de veículos pagantes ao longo do período analisado. Contudo, destacam-se dois segmentos temporais distintos: o primeiro abrangendo de setembro de 2015 a abril de 2020, e o segundo de abril de 2020 a agosto de 2023. Esses intervalos são demarcados por um ponto/período de transição que representa uma expressiva redução no volume, iniciando-se em março de 2020 e atingindo seu ponto mais baixo em abril

e maio do mesmo ano. Este ponto/período coincide com o início da pandemia da Covid-19 e a promulgação, em 17 de março, pelo governo do Rio de Janeiro, de medidas restritivas à circulação, visando conter a propagação da pandemia. Durante o primeiro segmento temporal, no intervalo entre setembro de 2015 e março de 2020, observou-se um crescimento maior no volume de veículos que utilizam a cobrança manual em comparação com aqueles que usam o sistema de cobrança automática. Entretanto, no intervalo de abril de 2020 a agosto de 2023, o volume mensal total de veículos com cobrança automática experimentou um crescimento maior do que os veículos com cobrança manual. Ao longo de todos os anos estudados, foram observados aumentos no volume de veículos totais no mês de dezembro e reduções em janeiro, refletindo picos positivos em dezembro e picos negativos em janeiro.

Analisando os volumes médios diários, observam-se tendências similares. Em relação à evolução do volume de veículos por método de pagamento, observou-se um aumento na proporção de veículos que adotam o pagamento automático. A porcentagem de veículos utilizando esse método de pagamento aumentou em 10% entre setembro de 2015 e setembro de 2023, passando de 50% para 55% ao término do período analisado.

Para o último ano disponível (2022-2023) foram explorados os dados mensais, analisando a variação do volume diário para cada mês, assim como a distribuição por categoria de veículo. Para comparar o Volume Médio Mensal entre os diferentes meses, foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Este teste estatístico permitiu avaliar se existem diferenças significativas entre os volumes médios nos diferentes meses. A partir da análise, observou-se um aumento geral nos volumes médios diários mensais, apesar das particularidades de cada sistema de cobrança. Os gráficos de box-plot, juntamente com os coeficientes de variação calculados, evidenciaram uma maior variabilidade nos volumes das cabines com cobrança automática em comparação com as de cobrança manual.

No que diz respeito à composição do tráfego, a participação de veículos da categoria 1 (passeio) representa mais de 80% do tráfego (82% no sistema de cobrança manual e 90% no AVI). A análise da flutuação do volume mensal revelou uma redução do tráfego nos domingos e feriados.

8.2. PESQUISA DE ORIGEM E DESTINO

A pesquisa de origem e destino teve como principal objetivo estabelecer a matriz de viagens dos usuários da ponte Rio-Niterói, identificando as principais origens e destinos dos veículos que utilizam a infraestrutura. Para isso, foi elaborado um questionário que incluiu informações como origem e destino por bairro ou município, frequência de viagens, número de passageiros e dados dos veículos. A coleta foi realizada em dezembro de 2023, em dois dias consecutivos, abrangendo 1.751 entrevistas com veículos leves e pesados. A aplicação contou com o apoio da Polícia Rodoviária Federal (PRF) em um dos dias, o que possibilitou a obtenção de dados mais completos em condições controladas.

Os dados coletados permitiram a análise detalhada das viagens, considerando a classificação dos veículos em leves, caminhões de 2 eixos e caminhões com mais de 2 eixos, além da segmentação territorial em zonas de tráfego. Os resultados indicam que 78% dos veículos que utilizam a ponte são leves, enquanto caminhões de 2 eixos e caminhões maiores representam, respectivamente, 16% e 6% do tráfego total.

Para veículos leves, os deslocamentos predominantes têm como origem locais de trabalho (cerca de 900 entrevistas) e como destino as residências (aproximadamente 700 entrevistas), refletindo o padrão típico casa-trabalho-casa em dias úteis. Viagens esporádicas, como para lazer, estudo ou saúde, representaram uma parcela menor da amostra. A análise espacial evidenciou que quase metade das viagens ocorre entre bairros do Rio de Janeiro e Niterói (48,1%), seguidas por deslocamentos do Rio para a Região Metropolitana (30,3%).

Entre os veículos pesados, as fábricas e depósitos destacam-se como principais pontos de origem, enquanto centros de distribuição e supermercados aparecem como os destinos mais frequentes. Cerca de 21% dos caminhões estavam vazios no momento da entrevista, enquanto os demais transportavam alimentos (13%), materiais de construção (10%) ou outros tipos de carga.

A pesquisa também revelou que 62% dos usuários de veículos leves ainda não utilizam o sistema de cobrança automática (AVI), embora 25% tenham demonstrado interesse em adotá-lo. Nos caminhões, esse percentual varia conforme a categoria: 40% dos caminhões de 2 eixos possuem o sistema, enquanto a adesão entre caminhões com mais de 2 eixos é de 76%.

Por fim, os resultados da pesquisa OD permitiram a construção de uma matriz de viagens detalhada e regionalizada, incluindo 261 zonas de tráfego, abrangendo bairros, municípios da Região Metropolitana, regiões do estado do Rio de Janeiro e estados interestaduais. As zonas centrais, como Centro do Rio de Janeiro, Centro de Niterói e São Gonçalo, foram identificadas como os principais polos geradores e atratores de viagens, refletindo sua importância no fluxo diário de deslocamentos.

8.3. PESQUISA DE PREFERÊNCIA DECLARADA

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de entender o comportamento dos usuários e suas preferências e sensibilidades em relação a diferentes atributos de viagem nos sentidos Niterói-Rio (ida, manhã) e Rio-Niterói (volta, tarde). O estudo buscou compreender suas preferências em relação a mudanças no horário de viagem, identificar e quantificar o impacto das diferentes características, e a disposição dos usuários que atravessam a ponte no horário de pico a alterar o seu horário de passagem pela ponte. O pico na ponte durante a manhã é no sentido Niterói – Rio de Janeiro, no período entre as 6:00 e as 10:00. Na tarde é no sentido Rio de Janeiro – Niterói, entre as 16:00 e as 19:00 (valores obtidos a partir da análise do tráfego diário e informações da concessionária).

A elaboração da pesquisa de preferência declarada consistiu em três estágios: (i) especificação do modelo econométrico a ser estimado; (ii) projeto experimental; e (iii) desenho do questionário. O primeiro estágio consistiu na determinação completa da especificação do modelo com os parâmetros a estimar. Assim, foi analisado o problema de escolha de horário determinando três alternativas relativas ao horário para atravessar a ponte, aplicada a aqueles usuários que atravessam a ponte no horário de pico da manhã e/ou tarde. As alternativas consideradas foram: (i) atravessar a ponte no horário habitual (*Habitual*), (ii) atravessar a ponte antes do início do pico (*Cedo*) e (iii) atravessar a ponte após fim do horário de pico (*Tarde*). A modelagem da escolha do início da viagem é baseada em uma formulação teórica proposta por Small (1982) que inclui, o que este denominou, demora horária (schedule delay (SDE) em inglês) referindo-se a diferença entre a hora de saída (ou chegada) em um determinado período e a hora de saída (ou chegada) preferida. Assim, foi proposta a inclusão dos atributos SDE nos modelos estimados, que corresponde à demora horária por sair (ou chegar) cedo e SDL é a demora horaria por sair (ou chegar) tarde.

Os atributos selecionados para o projeto do experimento foram *Horário que entra na ponte* (que representaria a demora horária), *Tempo para atravessar a ponte*, *Variabilidade do tempo de atravessar a ponte* e *Tarifa pedágio*. A partir das informações identificadas no primeiro estágio, foi elaborado o projeto experimental que embasou a construção do questionário da pesquisa PD. Este questionário foi estruturado em duas partes: (i) Preferência declarada (ii) Perguntas complementares (nome, idade, frequência de uso da rodovia, etc.).

Os dados coletados foram utilizados na estimativa de modelos de escolha discreta (modelos logit multinomial) para determinar a escolha do horário de passagem pela ponte, permitindo calcular as elasticidades da probabilidade de escolha de horário para as diferentes variáveis como tempo de viagem, atrasos (SDL), antecipações (SDE) e custos de pedágio nos horários de pico e fora do pico. Além disso, foram simulados cenários para calcular o impacto de variações desses atributos na escolha de horário. Dentre os cenários analisados, aqueles que consideram uma antecipação do horário de saída em 15 e 30 minutos, foram usados posteriormente para a construção de perfis de demanda que constituíram cenários simulados através do modelo VISSIM. Esses cenários permitiram avaliar o impacto destas alterações no perfil da demanda associados à implantação do sistema MLFF.

Os resultados obtidos a partir da estimação dos modelos de escolha discreta indicam que o tempo de viagem no pico é o principal determinante das escolhas dos usuários, destacando-se como o fator de maior impacto em ambos os sentidos analisados. Na viagem de durante o pico da manhã no sentido Niterói-Rio, os usuários demonstram maior aversão a atrasos, preferindo antecipar suas saídas em vez de atrasar, o que reflete a prioridade dada a compromissos matinais. Essa aversão é corroborada pelas elasticidades estimadas, que mostram uma penalização mais intensa para atrasos (SDL) do que para antecipações (SDE). Já na viagem durante o pico da tarde no sentido Rio-Niterói, os usuários apresentam maior flexibilidade, penalizando os atrasos, mas tolerando atrasos com mais facilidade, o que sugere que compromissos no retorno possuem menos restrições de horário. Em ambos os sentidos os

usuários preferem adiantar o horário da viagem (sair antes) do que atrasar (sair depois). Em ambos os sentidos, a sensibilidade ao custo é baixa, indicando que mudanças tarifárias isoladas têm impacto limitado no comportamento dos usuários. As simulações mostram que aumentos significativos no pedágio no pico podem reduzir a participação do horário habitual, incentivando os usuários a ajustarem seus horários, enquanto o pedágio fora do pico tem efeito mínimo, exceto quando combinado com melhorias no tempo de viagem. Essas análises reforçam que intervenções para redistribuir a demanda devem priorizar a redução do tempo de viagem, especialmente fora do pico, e que estratégias complementares, como campanhas informativas e parcerias com empregadores para horários flexíveis, podem aumentar a eficácia das políticas adotadas.

8.4. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Este estudo utilizou microssimulação de tráfego para avaliar diferentes cenários operacionais da Ponte Rio-Niterói, considerando intervenções estruturais e mudanças na demanda. O modelo base, calibrado com dados reais, serviu como referência para as análises comparativas, que incluíram a substituição do sistema de cobrança atual por um sistema de livre passagem (MLFF) a introdução de faixas reversíveis e a aplicação de políticas de variação de demanda.

Os resultados indicaram que a implementação do sistema MLFF traria ganhos expressivos no tempo de viagem no pico da tarde, sentido Rio-Niterói, onde os tempos de travessia poderiam ser reduzidos de 25 para 12 minutos, eliminando congestionamentos significativos. No entanto, no pico da manhã, sentido Niterói-Rio, a substituição do sistema de cobrança isoladamente não apresentou melhorias relevantes.

A implantação de faixas reversíveis entre as 6:00 e as 9:00 mostrou impacto positivo no pico da manhã, sentido Niterói-Rio, com uma redução de 8 minutos no tempo de viagem. Porém, a diminuição de uma faixa no sentido oposto (Rio-Niterói) aumentou o tempo de travessia em cerca de 1 minuto, efeito considerado pequeno frente aos benefícios no sentido de maior demanda. No pico da tarde, a introdução de faixas reversíveis não gerou ganhos operacionais significativos.

Por outro lado, as políticas de variação de demanda apresentaram resultados promissores em ambos os cenários simulados (antecipação de 15 e 30 minutos no horário de saída habitual). Houve redução expressiva dos tempos de viagem em todas as faixas horárias do pico da manhã, com destaque para a redução do número de veículos sobre a ponte, contribuindo para minimizar congestionamentos.

De forma geral, os resultados destacam que intervenções como o sistema MLFF, quando combinadas com estratégias de redistribuição da demanda, podem melhorar significativamente a eficiência operacional da ponte, reduzindo tempos de viagem e promovendo maior fluidez. As análises também reforçam que a escolha das intervenções deve considerar o comportamento da demanda em diferentes períodos do dia, priorizando soluções específicas para cada horário de pico.

8.5. SINISTROS NA PONTE RIO-NITERÓI

Para analisar os impactos do sistema de pedágio MLFF na segurança viária, especificamente na redução de sinistros de trânsito no trecho concessionado da Ecovias Ponte, foram analisados os dados dos sinistros registrados na concessão Ecovias Ponte entre agosto de 2022 e novembro de 2024, levando em consideração características como localização, gravidade, tipo de sinistro e horários de ocorrência. A análise também considerou estudos prévios sobre a eficiência dos sistemas MLFF na melhoria da segurança viária.

Ao analisar a evolução do número de sinistros na concessão e no entorno do pedágio, observou-se que os picos no entorno do km 322 tendem a coincidir com os períodos de maior registro de sinistros no total da rodovia, não sugerindo uma relação direta entre a localização do pedágio e maior quantidade de registros.

A *Colisão Traseira* é o tipo de sinistro mais prevalente, tanto no total da rodovia quanto no entorno do pedágio (km 322). Os sinistros do tipo *Colisão lateral no mesmo sentido* também se destacam diretamente na área do pedágio. As demais seções (Faixas, Agulha, Bypass, etc.) concentram sinistros do tipo *Colisão Traseira, choques com Defensa, Barreira, Praça* e *Outros*, assim com a *Colisão Transversal.*

Por fim, os resultados indicaram que a implementação do sistema MLFF pode levar a uma redução significativa no número de sinistros na região analisada. Estudos de referência apontam reduções de até 76% no total de sinistros com a conversão de sistemas convencionais para MLFF, o que reflete diretamente na segurança viária. No caso da Ecovias Ponte, estima-se uma redução de cerca de 73 a 76% nos sinistros registrados no entorno do pedágio, representando uma queda de aproximadamente 50 registros em um ano. Esse impacto é explicado pela maior fluidez do tráfego e pela eliminação de barreiras físicas que demandam alterações de faixa e variações bruscas de velocidade, principais causas de colisões na área de pedágios tradicionais.

8.6. ANÁLISE DE ASSERTIVIDADE DO SISTEMA MULTI-LANE FREE FLOW

Para avaliar a implementação e a assertividade do sistema MLFF na Ecovias Ponte, foram analisados os dados do pórtico em teste instalado na Ecovias Ponte no sentido contrário ao pedágio, no período do mês de março de 2025.

Dentre todas as categorias, as motos apresentam as maiores dificuldades de classificação e identificação de placas. Este fato se deve às características físicas das motocicletas – como menor porte, área refletiva reduzida e maior exposição a intempéries – que compromete a leitura eficaz por sistemas de OCR e antenas de identificação, especialmente em condições adversas ou de tráfego rápido. Esta dificuldade é agravada pelo padrão de direção dos motociclistas que não se restringem às faixas de tráfego e apresentam grande flutuação no movimento.

Em relação às demais categorias, os dados analisados sugerem que houve uma dificuldade um pouco mais acentuada na classificação de veículos pesados em relação aos veículos leves. A mesma observação vale para a identificação de placas, especialmente durante períodos de baixa

iluminação. Apesar disso, o percentual de acerto, quando pelo menos uma das leituras (dianteira ou traseira) é igual à placa consolidada, alcançou mais de 90% para a maioria das categorias durante o dia e durante a noite, refletindo a robustez do sistema.

O sistema MLFF implementado em regime de teste na Ecovias Ponte, entretanto, está em contínuo aperfeiçoamento. Este sistema já se encontra em operação plena, em pórticos MLFF na Concessionária EcoNoroeste, deste setembro de 2024. Neste ambiente, o sistema vem sendo monitorado pela equipe de acompanhamento e operação e tem apresentado evolução contínua e desempenho satisfatório.

8.7. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a implementação do sistema *Multi-Lane Free Flow* (MLFF) na Ponte Rio-Niterói apresenta um grande potencial para melhorar a eficiência operacional, reduzir os tempos de viagem e aumentar a segurança viária, especialmente durante os horários de pico. As análises indicam que estratégias adicionais ao MLFF como as avaliadas neste projeto, implementação de faixas reversíveis e a promoção de uma redistribuição do perfil da demanda, podem complementar e ampliar os benefícios operacionais promovendo maior fluidez e segurança.

Adicionalmente, destaca-se que a transição para o sistema MLFF não deveria ser considerada de forma isolada. O estudo se limitou à análise da ponte e não avaliou a interação do tráfego na infraestrutura urbana dos municípios de Rio de Janeiro e Niterói. Assim, a plena eficácia do MLFF dependerá também de adaptações no tráfego urbano dessas cidades, uma vez que, sem melhorias nas vias de acesso e no planejamento viário local, há o risco de comprometimento dos benefícios operacionais obtidos na ponte. Portanto, é fundamental uma abordagem integrada que considere tanto a ponte quanto o entorno urbano, garantindo que os benefícios do sistema sejam amplamente percebidos.

A adoção do MLFF deve ser acompanhada por campanhas de sensibilização para aumentar a adesão à cobrança automática e por ajustes operacionais para lidar com as demandas específicas dos diferentes períodos do dia. Esses cuidados, aliados a uma visão integrada com o tráfego urbano das cidades envolvidas, são essenciais para garantir que a transição para o sistema de livre passagem seja eficiente e contribua para um transporte mais sustentável e seguro.

8.8. MEMORIAL DESCRITIVO

O memorial descritivo sobre a instalação dos equipamentos no Pórtico 24 se encontram no Apêndice 3.

8.9. MINUTA DE REVISÃO NORMATIVA

Os sistemas de pedágio eletrônico trazem indiscutíveis avanços no modelo de cobrança de tarifas, promovendo maior fluidez no tráfego, redução de congestionamentos, e melhora da experiência do usuário.

Sua introdução em curso no Brasil, respaldada pela Lei nº 14.157/2021 e demais normativos estabelecidos pelo CONTRAN, SENATRAN e pela ANTT, entretanto, traz desafios significativos.

A instalação de sensores, câmeras e sistemas de pagamento automático exige investimentos consideráveis por parte das concessionárias. Os requisitos de manutenção e contínuo aferimento dos equipamentos, sujeitos a intempéries, vibrações e eventuais acidentes, exigem uma readequação das concessionárias.

No contexto da Ponte, esta questão apresenta-se ainda mais crítica do que em outros contextos rodoviários. Em função de sua estrutura e intenso tráfego, a Ponte é submetida a vibrações fortes e constantes, que estabelecem maiores impactos em pórticos e equipamentos. Considerando as restrições físicas da faixa de rolamento, com limitações nas áreas de trabalho, as características da infraestrutura demandam atenção especial, com pórticos mais robustos e estratégias de manutenção particulares.

Integração completa dos sistemas de pedágio e Sistema de Gestão de Trânsito (Senatran) é um dos pilares de sucesso do sistema *freeflow*. Apesar da regulamentação do Contran (Resolução nº 1.013/24), a implementação completa dessa integração apresenta desafios técnicos e operacionais.

A inexistência de barreiras proporciona condições favoráveis à evasão de pagamento. A tendência de ampliação da utilização de *tags*, a disponibilização de alternativas de pagamento através de site e aplicativo, disponibilização de totens e outras possibilidades de pagamento físicos, assim como estratégias de informação e oferta de vantagens a usuários frequentes, contribuem para reduzir a inadimplência. Entretanto a inadimplência é um desafio enfrentado em sistemas de cobrança *freeflow* em todo o mundo, mesmo em países com longa experiência em sistemas *freeflow*.

Nos Estados Unidos, as taxas de inadimplência variam de estado para estado. Em Nova York, por exemplo, a taxa de inadimplência pode chegar a 10% em algumas rodovias. As autoridades utilizam multas elevadas e outras penalidades para tentar reduzir a inadimplência. A autoridade Portuária de Nova York e Nova Jersey relatou a recuperação de quase US$ 18 milhões em pedágios e taxas não pagas em 2024. Ações também incluem investimentos em aperfeiçoamento da tecnologia de reconhecimento de placas para melhorar a precisão da cobrança de pedágio e reduzir a evasão.

Os países europeus geralmente apresentam taxas moderadas de evasão de pedágio. A implementação de sistemas de pedágio interoperáveis em toda a UE ajudou a reduzir a evasão e inadimplência. Países como Alemanha e França possuem mecanismos de fiscalização robustos e tecnologias avançadas de pedágio. Na Alemanha, a taxa de inadimplência é relativamente baixa, em torno de 5%. Na França, a taxa é um pouco mais alta, variando entre 5% e 7%. Campanhas de conscientização pública e penalidades severas para inadimplência de pedágio contribuem para a redução das taxas de evasão em muitos países europeus.

Na Austrália, a inadimplência é um tema acompanhado com atenção. As taxas de inadimplência variam, mas geralmente ficam em torno de 8% a 10%. As autoridades apostam em aperfeiçoamento de tecnologias e campanhas educativas para tentar reduzir esses índices.

As taxas de inadimplência de pedágio na Ásia variam bastante. Países como Japão e Coreia do Sul apresentam baixas taxas de evasão devido à fiscalização rigorosa e às tecnologias avançadas de pedágio. Em contraste, alguns países em desenvolvimento enfrentam taxas de evasão mais altas devido à fiscalização menos eficaz e aos sistemas de pedágio mais antigos.

No Brasil, no caso do Sandbox regulatório da BR101, dados da ANTT reportam médias de evasão de 11,26 para o trimestre de julho a setembro de 2024 e com inadimplência em torno de 8%. Os índices de inadimplência relacionável ao *freeflow* variam em diferentes concessões implementadas no país. Estes valores são altamente dependentes de condições locais e particularidades dos usuários destas rodovias.

Considerando a relevância da inadimplência decorrente do modelo *freeflow* para o equilíbrio financeiro das concessões, e que não há atualmente no ambiente das concessões federais um mecanismo de ressarcimento às concessionárias das perdas de receita provenientes desta infração, é importante considerar a implementação de um arranjo institucional que viabilize a compensação (ou recomposição) destes valores a partir de recursos arrecadados de multas aplicadas aos usuários inadimplentes (artigo 209-A do Código de Trânsito Brasileiro (CTB), incluído pela Lei nº 14.157/2021), a exemplo dos procedimentos estabelecidos pela Agência de Transporte do Estado de São Paulo (Artesp).

A Ponte Rio-Niterói apresenta um fluxo intenso de caráter urbano com um percentual elevado de motocicletas. Segundo dados de março de 2025, motocicletas corresponderam à 9,90% dos veículos passantes, com uma tarifa equivalente à 50% da tarifa de automóveis.

O Contrato da Ecovias Ponte prevê a receita das motos como uma fonte de recursos, e estes veículos apresentam características específicas que dificultam a aplicação plena do sistema *freeflow*. Atualmente não existem dispositivos tipo *tags* desenvolvidos especificamente para motocicletas. Uma das particularidades está no fato das motocicletas não possuírem para-brisa e, consequentemente, as *tags* precisariam ser fixadas em locais alternativos, como o capacete, a carenagem ou suportes adaptados. Esse fator, somado às características físicas das motocicletas – como menor porte, área refletiva reduzida e maior exposição a intempéries – compromete a leitura eficaz por sistemas de OCR e antenas de identificação, especialmente em condições adversas ou de tráfego rápido. Outro fator que exige atenção é em relação ao fechamento de cancela nas pistas AVIs que poderão representar um risco a segurança dos motociclistas.

É fundamental ressaltar também a prática frequente de motoristas dessa categoria em ocultar deliberadamente as placas, utilizando mochilas, capas de chuva ou posicionando-as em ângulos que dificultam a leitura. Essas ações intencionais, aliadas às limitações naturais dos equipamentos, tornam ainda mais desafiadora a identificação precisa dos veículos. Esse

comportamento, já observado em praças de pedágio tradicionais, tende a se agravar em sistemas totalmente automatizados, como o *freeflow*, onde não há barreiras físicas ou abordagens presenciais. Isto compromete significativamente a eficácia do sistema, aumenta a taxa de evasão e, consequentemente, reduz a arrecadação prevista para o equilíbrio dos contratos.

Essas limitações técnicas, operacionais e comportamentais representam desafios consideráveis para a sustentabilidade do modelo, especialmente em contratos que não há previsão específica sobre este tipo de cobrança e em rodovias com alto fluxo de veículos. Esses fatores tendem a gerar um alto índice de evasão, agravado pela falta de meios eficazes de fiscalização.

É fundamental que a ANTT analise a possibilidade de estabelecer diretrizes específicas para essa categoria e promova uma avaliação mais aprofundada sobre a obrigatoriedade e a viabilidade da cobrança de motocicletas no sistema *freeflow*.

Considerando as questões mencionadas, é necessário esclarecer se a exigência será aplicável ao Contrato da Ecovias Ponte e, em caso positivo, se haverá mecanismos de reequilíbrio econômico-financeiro para fazer frente aos custos adicionais da operação, além da compensação em caso de inadimplência ou fraude por esses usuários.

8.9.1. PROPOSTA DE REVISÃO DA NORMATIVA: PREVISÃO DE COMPENSAÇÃO DA CONCESSIONÁRIA EM FUNÇÃO DA PERDA DE RECEITA DEVIDO À INADIMPLÊNCIA.

Como o texto já abordou, nos últimos contratos de concessão celebrados com o estado de São Paulo, a ARTESP incorporou mecanismo de compensação da inadimplência dos usuários e casos de fraude, fazendo o por meio, principalmente, pela manutenção das despesas com a emissão e postagem das infrações sob responsabilidade do Poder Concedente e criação da chamada Conta Multa, para a qual as multas aplicadas pelo DER-SP, com fundamento no artigo 209-A do CTB, deverão ser direcionadas à citada Conta Multa. Assim, em periodicidade definida em cada contrato de concessão, a concessionária poderá ter a perda de receita compensada com esses recursos, garantindo a manutenção do equilíbrio econômico-financeiro dos contratos.

No caso das concessões federais, não há previsões regulatórias que concedam às concessionárias camada de garantia ao efeito negativo verificado na receita da concessão, o que acaba por expor sobremaneira projetos em andamento (com alta previsibilidade de receita) a riscos financeiros que podem elidir a conversão das praças convencionais.

Nesse sentido, considerando o mecanismo de recursos vinculados incorporado nas concessões de 4ª e 5ª etapa, que consiste justamente em uma garantia endocontratual, a possibilidade de uso desses recursos para fazer frente à inadimplência dos usuários com a adoção do Free Flow.

Dessa forma, a concessionária que aderisse à conversão poderia estar sujeita a rito de compensação lastreado na demonstração à ANTT da devida identificação, disponibilidade de informação e plataforma apropriada para pagamento pelo usuário, transcurso do prazo para pagamento espontâneo e adoção das providências necessárias para a notificação do usuário infrator nos termos do artigo 209-A do CTB.

Após a comprovação dos itens acima, a concessionária poderá solicitar, em periodicidade a ser definida em termo aditivo próprio (sugere-se trimestralmente devido as etapas do rito de identificação e potencial pagamento pelo usuário), a compensação mediante notificação para acesso aos recursos vinculados no limite do demonstrado à ANTT.

Na revisão ordinária de cada concessionária, assim como ocorre com as compensações do DUF, p.ex., a ANTT promoverá a apuração minuciosa das evidências apresentadas pela concessionária, podendo, se identificar levantamento equivocados, valer do Fator C para regularização que se fizer necessária.

Figura 118 – Cadeia de responsabilidade e marcos para liberação dos valores arrecadados.

Este modelo evidencia que a compensação da concessionária é condicionada: ela ocorre apenas após a não quitação pelo usuário inadimplente — ou seja, trata-se de um modelo de ressarcimento reativo, e não preventivo, controlável e rastreável pela ANTT.

9. BIBLIOGRAFIA

Abuzwidah, M., Abdel-Aty, M., e Ahmed, M. M. (2014) Safety Evaluation of Hybrid Main-Line Toll Plazas. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2435(1), 53–60. doi:10.3141/2435-07

Abuzwidah, M., e Abdel-Aty, M. (2018) Crash risk analysis of different designs of toll plazas. Safety Science, 107(February), 77–84. doi:10.1016/j.ssci.2018.02.024

Alvarenga, G. S (2010). Estudo do impacto do pedágio no aumento do tempo de viagem, no consumo de combustível e na emissão de poluentes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo.

Ansari Esfeh, M., & Kattan, L. (2020). A new design and evaluation approach for managed lanes from a sustainability perspective. International Journal of Sustainable Transportation, 14(1), 35-55.

ANTT (2021) Agência Nacional de Transportes Terrestres. Contrato RioSP – BR-116-101-RJ-SP. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes/ccr-rio-sp/documentos-de-gestao/riosp-contrato-e-aditivos>. (Acesso em 10/08/2023).

Asaithambi, G., Kanagaraj, V., e Kashyap, M. (2021) Reversible Lanes: Guidelines, Operation and Control, Research Directions. International Encyclopedia of Transportation (p. 52–59). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-102671-7.10294-5

Barbosa, R. E. (2017). Metodologia para o estabelecimento de diretrizes para a implantação do Sistema Nacional de Identificação Automática de Veículos – SINIAV. Tese de doutorado em transportes. Departamento de engenharia civil e ambiental. Universidade Federal de Brasília.

Barbosa, S. H. (2013). Rodovias de pedágio aberto ou free-flow: perspectivas para a implantação no Brasil. Dissertação de Mestrado em Geotecnia e Transportes. Universidade Federal de Minas Gerais.

Ben-Akiva, M. e Bolduc, D. (1996). Multinomial probit with a logit kernel and a general parametric specification of the covariance structure. Paper presented at the 3rd Invitational Choice Symposium, Columbia University.

Ben-Akiva, M. e Lerman, S.R. (1995) Discrete choice analysis: Theory and applications to travel demand. Cambridge: MIT Press.

Ben-Akiva, M.; D. Bolduc, D. e J. Walker, (2003) Specification, Identification, and Estimation of the Logit Kernel (or Continous Mixed Logit) Model. Working Paper, 5th Invitational Choice Symposium, Asilomar, CaliforniaBrownstone, D.; K. E.

Ben-Akiva, M.; Lerman, S.R. (1985) Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand. Cambridge, MA: MIT Press.

Bierlaire, M. (2003) Switzerland,

Brownstone, D. and K. Train (1999), ‘Forecasting new product penetration with flexible substitution patterns’, Journal of Econometrics 89, 109– 129.

Button, Kenneth. 2010. Transport Economics. Edward Elgar Publishing.

Chakraborty, M., Stapleton, S., Ghamami, M., e Gates, T. (2020) Safety effectiveness of all-electronic toll collection systems. Advances in Transportation Studies, 2(Special issue), 127–142. doi:10.4399/978882553451111

Chang, T. H., Tseng, J. S., Hsieh, T. H., Hsu, Y. T., & Lu, Y. C. (2018). Green transportation implementation through distance-based road pricing. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 111, 53-64.

Chaudhary, R. H. (2003) A model for the benefits of electronic toll collection system. Graduate Theses and Dissertations. University of South Florida.

Cherchi, E. e Ortúzar, J. de D. (2002) Mixed RP/SP models incorporating interaction effects: modelling new suburban train services in Cagliari. Transportation 29, 371-395.

Choice Metrics (2013) Ngene 1.1 User Manual and Reference Guide. Choice Metrics.

Commissariat Général du Plan. (2001). Transports: Choix des investissements et coût des nuisances (Transportation: Choice of investments and the cost of nuisances). Government of France, Paris.

Crabtree, J.D.; Wallace, C.Y.; Mamaril, N.J. (2008) Technology scan for eletronic toll collection. Kentucky Transportation Center. Research Report KTC-08-15/SPR359-08-1F. Obtido de

Cybis, H.B.; Arellana, J.; Rizzi, L.I.; Strambi, O. (2018) Using best–worst scaling to identify barriers to walkability: a study of Porto Alegre, Brazil. Transportation v. 45, p. 5-38, 2018.

Cybis, H. B. B.; Cafelli, F.; Zechin, D.; Kappler, L. B.; Moisan, Y. (2016) Avaliação das condições operacionais da Freeway considerando o atendimento do fluxo sazonal de verão e identificação de alternativas para atender as condições de uso futuro da rodovia.

Cybis, H.B.B.; Larranaga, A.M.; Caleffi, F.; Weimer, G.A.; Kappler, L.B. (2017) Avaliação de condições para ampliação da utilização de sistema de cobrança eletrônica nas praças de pedágio de rodovias federais.

De Biasi, I. (2012) Traffic Management Services Dynamic Lane Management: Deployment Guideline. [S.l.]: [s.n.], 53 p.

Domencich, T. e McFadden, D. (1972) A disaggregated Behavioral Modelo of Urban Travel Demand. Report Nº CRA-156-2, Charles River Associates, Inc. Cambridge, Massachusetts.

Fafieanie, M.; Sambell, E. (2008) Assessment of Dynamic Tidal Flow Lane on Provincial Roads in the Netherlands, University of Twente, Netherlands.

Federal Highway Administration. (2009) Manual on Uniform Traffic Control Devices - MUTCD. Department of Transportation, 816 p., Washington D.C.

Federal Highway Administration. (2011) Freeway Management and Operations Handbook. FHWA Report nº. OP-04-003, Washington D.C.

Federal Highway Administration. (2020). Congestion Pricing: Examples Around the U.S. D. Disponível em: . Visualizado em 26/08/2020

Foster, V. e Mourato, S. (2002). Testing for consistency in contingent ranking experiments. Journal of Environmental Economics and Management, 44(2), 309 – 328.

Gao, Y., He, G., Hou, J. C., e Hill, M. (2002) On Exploiting Traffic Predictability in Active Queue Management. 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 3, 1630–1639.

Georgia Department of Transportation. (2010) Advantages and disadvantages of reversible managed lanes systems.

Gettman, D., e Head, L. (2003) Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1840(1), 104–115. doi:DOI: 10.3141/1840-12

Gordin, E., Klodzinski, J., e Santos, C. (2011) Safety benefits from deployment of open road tolling for main-line toll plazas in Florida. Transportation Research Record, (2229), 85–92. doi:10.3141/2229-10

Gross, F., Himes, S., Baig, R., e Szeto, B. (2021) Application of Data-Driven Safety Analysis to Support Port Authority Investment Decisions for Converting Conventional Toll Plazas to Open-Road Tolling. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2675(11), 935–945. doi:10.1177/03611981211021855

Guebert, A.A.; Carroll, D.; Weston, B.; Kinnecom, D. (2010) Reversible Lanes in Utah ¬ Adding Efficiency Safely., 1–14.

Gunn, H.F. (2000). “An introduction to the valuation of travel time savings and losses.” In D.A. Hensher and K.J. Button (Eds.), Handbook of Transport Modeling (pp. 433-448). Edward Elgar Publishing Limited, Northampton, Mass.

Hausknecht, M.; Au, T.-C.; Stone, P.; Fajardo, D. (2011) Dynamic lane reversal in traffic management. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1929–1934.

Hensher D.A. (2000). “Measurement of the valuation of travel time savings.” Journal of Transport Economics and Policy, 35(1), 71-98.

Hensher, D.A. (1994) Stated preference analysis of travel choices: The state of practice. Transportation, 21(2), 107-133.

Hensher, D.A., Rose, J.M. Toll product preferences and implications for alternative payment options and going cashless. Transportation 36, 131–145 (2009). https://doi.org/10.1007/s11116-009-9188-x

Hess, S., Palma, D., 2019. Apollo: a flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application. ournal of Choice Modelling 32.

Holguín-Veras, J. and M. Preziosi (2010). "Behavioral Investigation on the Factors that Determine Adoption of an Electronic Toll Collection System: Passenger Car Users." Transportation Research Part C. doi:10.1016/j.trc.2010.07.005

Holguín-Veras, J.; Allen, B. (2013) Time of day pricing and its multi-dimensional impacts: A stated preference analysis, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 55, Pagesp. 12-26.

Hsu, G. S., Chen, J. C., & Chung, Y. Z. (2012). Application-oriented license plate recognition. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 62(2), 552-561

Huang, F., Liu, P., Yu, H., & Wang, W. (2013). Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections. Accident Analysis & Prevention, 50, 1014-1024.

I.T. Transport (2002), The Value of Time in Least Developed Countries, Department for International Development, UK under its Knowledge and Research Programme ().

Kang, D.K e Stockton, W.R. (2008) Willingness to Pay, Value of Time, Toll Revenue Forecasting, Technical Report, Texas Transportation Institute Texas A and M Univ .2008. Disponível em: Acesso em 1/07/2017.

KPMG (2019). A global benchmark of Toll Operator efficiency. Disponível em: < >. (Acesso em 10/08/2023).

Lai, K.; Wong, W. (2000) SP approach toward driver comprehension of message formats on VMS. Journal of Transportation Engineering 126(3), 221–227.

Lam, T.C., and Small, K.A. (2001). "The value of time and reliability: Measurement from a value pricing experiment." Transportation Research E, 37, 231-251. Victoria Transport Policy Institute, 2017

Larranaga, A.; Arellana, J. (2015) Interurban freight mode choice in Brazil: A case study of Rio Grande do Sul. Urban Freight and Behavior Change 2015, Roma, Italia.

Larranaga, A.M.; Arellana, J.; Senna, L.A. (2016) Encouraging intermodality: A stated preference analysis of freight mode choice in Rio Grande do Sul. Transport. Res. Part A

Lentzakis, A. F., Seshadri, R., & Ben-Akiva, M. (2023). Predictive distance-based road pricing—Designing tolling zones through unsupervised learning. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 170, 103611.

Lin, J., & Yu, D. (2008). Traffic-related air quality assessment for open road tolling highway facility. Journal of Environmental management, 88(4), 962-969.

Lin, L. R.; Hsu, G. H.; Jan, R. H.; Chen, C. (2012) A novel non-payment vehicle searching method for multilane-free-flow electronic-toll-collection systems. 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), PyeongChang, Korea (South), 2012, pp. 904-909. URL:

Liu, P., Qu, X., Yu, H., Wang, W., & Cao, B. (2012). Development of a VISSIM simulation model for U-turns at unsignalized intersections. Journal of Transportation Engineering, 138(11), 1333-1339.

Liu, Y.-S.; Wang, X.-H.; Liang, X.-D. (2011) Conversion Mechanism of Reversible Lane System under Urban Tidal Flow Condition. ICCTP 2011 (pp. 1030–1041). American Society of Civil Engineers, Reston, VA. doi:10.1061/41186(421)101

Louviere, J.J.; Hensher, D.A.; Swait, J.D. (2000) Stated Choice Methods. United Kingdom: Cambridge University Press.

Manski, (1977) . Theory and Decision, 8, 229-254.

McFadden, D. (1973) Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Models. Em Frontiers in Econometrics, P. Zarembka, (ed.). Academic Press, Nueva York.

McFadden, D. (1974) The Measurement of Urban Travel Demand. Journal of Public Economics, 3, 303-328.

Mcfadden, D. (1978) Modelling the choice of residential location. A.Karlqvist, L.Lundqvist, F.Snickars J.Weibull (eds.), Spatial interaction theory and residential location, North-Holland, Amsterdam, 75-96.

Medapati, N., Rao, D. M., & Patnaikuni, C. K. (2022). A study on pedestrian safety, vehicular fuel consumption, and emissions using GIS and PTV VISSIM software. Innovative infrastructure solutions, 7(5), 322.

Meng, Q., Liu, Z., & Wang, S. (2012). Optimal distance tolls under congestion pricing and continuously distributed value of time. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48(5), 937-957.

Milenkovic, M.; D. Glavic e M. N. Mladenovic (2018). Decision-Support Framework for Selecting the Optimal Road Toll Collection System. Journal of Advanced Transportation, v. 2018.

Milenković, M., Stepanović, N., Glavić, D., Tubić, V., Ivković, I., & Trifunović, A. (2020). Methodology for determining ecological benefits of advanced tolling systems. Journal of environmental management, 258, 110007.

Mohan, R., Eldhose, S., & Manoharan, G. (2021). Network-level heterogeneous traffic flow modelling in VISSIM. Transportation in developing economies, 7, 1-17.

Ng, J. Y e Y. H. Tay. Image-based Vehicle Classification System. The 11th Asia-Pacific ITS Forum Exhibition (2011).

Oliveira, M. L. De. (2004). Fatores intervenientes na capacidade de atendimento de praças de pedágio. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ortúzar, J. de D. e Iacobelli,A. (1998) Mixed modelling of interurban trips by coach and train. Transportation Research 32A, 345-357.

Ortúzar, J.D.; Willumsen, L.G. (2011) Modelling Transport. 4 ed. England: John Wiley & Sons.

Ozbay, K.; Holguín-Veras, J.; de Cerreño, A. (2005). Evaluation Study of New Jersey Turnpike Authority's Time of Day Pricing Initiative.

Ozbay, K.; Yanmaz-Tuzel, O.; Holguín-Veras, J. (2006a). Evaluation of combined traffic impacts of time-of-day pricing program and E-ZPass usage on New Jersey Turnpike. Transportation Research Record I960, 40–47.

Ozbay, K.; Yanmaz-Tuzel, O.; Holguín-Veras, J. (2006b). Theoretical derivation of value of travel time and demand elasticity: evidence from NJ Turnpike toll road. Transportation Research Record 1985, 248–256.

Palma, A.; Lindsey R.; Quinet E.; Vickerman R. (2011). A Handbook of Transport Economics. Edward Elgar Publishing.

Park, B. B., e Qi, H. M. (2006) Microscopic simulation model calibration and validation for freeway work zone network - a case study of VISSIM. 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 1471–1476. doi:10.1109/ITSC.2006.1707431

Peng, X., Di, Z., Ming, G. (2022). Freeway free-flow payment system based on Beidou. 19th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), Chengdu, China.

Ptolemus Consulting Group. (2020). What is Open Road Tolling? Acessado em Acesso em: [02 agosto de 2023].

PTV Group. (2023). Car Following Parameters. In PTV Vissim User Manual (Version 2023). Acessado em Acesso em: [08 de agosto de 2023]

Pérez-Martínez, P. J., Ming, D., Dell'Asin, G., & Monzón, A. (2011). Evaluation of the influence of toll systems on energy consumption and CO2 emissions: A case study of a Spanish highway. Journal of King Saud University-Science, 23(3), 301-310.

Ratrout, N. T., e Rahman, S. M. (2009) A Comparative Analysis of Currently Used Microscopic and Macroscopic Traffic. Science, 34(1), 121–133.

Rodrigues, F.S.P.; Larranaga, A.M.; Cybis, H.B.B. (2019) Impacto de medidas para estímulo ao uso da bicicleta em viagens ao trabalho: estudo de caso envolvendo funcionários da Companhia Riograndense de Saneamento. Transportes (Rio De Janeiro), v. 27, p. 42-55, 2019.

Rose, J.M. and Bliemer,M.C.(2009)Constructing Efficient Stated Choice Experimental Designs, Transport Reviews, v.5, n.29, p.587–617

S. Du, M. Ibrahim, M. Shehata and W. Badawy, "Automatic License Plate Recognition (ALPR): A State-of-the-Art Review," in IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 23, no. 2, pp. 311-325, Feb. 2013, doi: 10.1109/TCSVT.2012.2203741.

Saad, M., Abdel-Aty, M., & Lee, J. (2019). Analysis of driving behavior at expressway toll plazas. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 61, 163-177.

Saelensminde, K. (1998) Causes and consequences of lexicographic choices m stated choice studies. Working Paper, Institute ofTransport Economics: Oslo.

Saharan S.; Bawa S.; Kumar N. (2020). “Dynamic Pricing Techniques for Intelligent Transportation System in Smart Cities: A Systematic Review.” Computer Communications 150 (September 2019): 603–25. .

Santos, T. S.; Ribeiro, P. C. M. (2018). Estudo de impacto da implantação do sistema free-flow de pedágio eletrônico no Brasil.

Small, K.A., 1982. The scheduling of consumer activities: work trips. The American Economic Review 72 (3), 467–479

South African National Roads Agency SOC Ltd. (2023). Toll Tariffs. Acessado em Acesso em: [03 agosto de 2023].Acessado em Acesso em: [03 agosto de 2023].

Southampton City Council. (2020). Itchen Bridge charges and peak times. Disponivel em: (http://www.southampton.gov.uk/roads-parking/roads/itchen-bridge/charges-and-peak-times.aspx). Acessado em 26/08/2020.

Tapia, R.J.; De Jong, G.; Larranaga, A.M.; Cybis, H.B.B. (2020) Application Of Mdcev To Infrastructure Planning In Regional freight transport. Transportation Research Part A-Policy And Practice, v. 133, p. 255-271, 2020.

Tapia, R.J.; Senna, L.A.S.; Larranaga, A.M.; Cybis, H.B.B. (2019) Joint mode and port choice for soy production in Buenos Aires province, Argentina. Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review, v. 121, p. 100-118, 2019.

Train, K. (1986) Qualitative Choice Analysis, MIT Press, Cambridge.

Train, K. (1999) Forescating new product penetration with flexible substitution patterns. Journal of Econometrics 89, P. 109-129.

Train, K. (2009) Discrete Choice Methods with Simulation. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2009. 388 p.

Transport Canada. (1994). “Guide to benefit-cost analysis in Transport Canada, Ottawa.” (http://www.tc.gc.ca/finance/BCA/en/TOC_e.htm) (July 21, 2006).

Tseng, PH. e N. Pilcher (2022). Political and technical complexities of electronic toll collection: Lessons from Taiwan. Case Studies on Transport Policy v. 10 (2022), 444-453.

Tseng, PH.; DY. Lin e S. Chien (2013). Investigating the impact of highway electronic toll collection to the external cost: A case study in Taiwan. Technological Forecasting and Social Change v. 86 (2014), 265-272.

U.S. Department of Transportation. (1997). “The value of travel time: Departmental guidance for conducting economic evaluations.” Author, Washington, DC.

Victoria Transport Policy Institute (2007).Transportation Cost and Benefit Analysis II – Travel Time Costs Disponível em . Acesso em 01/07/2017.

Waters, W.G., II. (1996). “Values of travel time savings in road transport project evaluation.” In D.A. Hensher, J. King, and T. Hoon Oum (Eds.), Proceedings of 7th World Conference on Transport Research (213-223). Pergamon, New York.

Wollenstein-Betech, S., Paschalidis, I. Ch., e Cassandras, C. G. (2022) Optimizing lane reversals in transportation networks to reduce traffic congestion: A global optimization approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 143, 103840. doi:10.1016/j.trc.2022.103840

Wolshon, B.; Lambert, L. (2004) Convertible Roadways and Lanes: a Synthesis of Highway Practice. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Xerox Corporation. (2016). The four principles of dynamic pricing in transportation. Disponível em: .

Xu, G., Liu, X., An, S., Wang, Y., & Lao, Y. (2016). Enabling Network-Wide Tolling-Strategy Assessment via Customized Route-Choice Simulation Module. Journal of Transportation Engineering, 142(2), 04015041.

Yang, H., Ozbay, K., e Bartin, B. (2012) Effects of open road tolling on safety performance of freeway mainline toll plazas. Transportation Research Record, 2324(January 2001), 101–109. doi:10.3141/2324-12

Yang, H.; K. Ozbay; B. Bartin e O. Ozturk (2013). Effect of Removing Freeway Mainline Barrier Toll Plazas on Safety. Transportation Research Board’s 92nd 50 Annual Meeting, Washington, D.C., 2013.

Yu, B., & Mwaba, D. (2020). Toll plaza lane choice and lane configuration strategy for autonomous vehicles in mixed traffic. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 146(12), 04020133.

Zhang, G., Wang, Y., Wei, H., & Yi, P. (2008). A feedback-based dynamic tolling algorithm for high-occupancy toll lane operations. Transportation Research Record, 2065(1), 54-63

APÊNDICE 1 – QUESTIONÁRIO PD

Entrada na ponte entre 06h e 07h – Sentido Rio de Janeiro

Cenário 1 (C1)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**6:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	16	18
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 2 (C2)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**6:30**	**5:50**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	16	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	19	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 3 (C3)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	6:30	5:50	10:10
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	16	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	30	22	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) **(pagamento em ambos os sentidos)**	4	1,2	1,2

Escolho:			

Cenário 4 (C4)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	6:30	5:50	10:30
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	16	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	34	22	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) **(pagamento em ambos os sentidos)**	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 5 (C5)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**6:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	13 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	15
1 vez na semana demoraria (min)	34	16	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 6 (C6)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**6:30**	**5:30**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	13 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	13
1 vez na semana demoraria (min)	30	19	19
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos	4	1,2	1,2

Escolho:			

Entrada na ponte entre 07h e 08h – Sentido Rio de Janeiro

Cenário 1 (C1)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**7:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	16	18
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 2 (C2)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**7:30**	**5:50**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	16	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	19	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 3 (C3)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**7:30**	**5:50**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	16	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	30	22	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) **(pagamento em ambos os sentidos)**	4	1,2	1,2

Escolho:			

Cenário 4 (C4)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**7:30**	**5:50**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	16	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	34	22	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) **(pagamento em ambos os sentidos)**	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 5 (C5)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**7:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	34	16	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 6 (C6)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**7:30**	**5:30**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	30	19	19
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos	4	1,2	1,2

Escolho:			

Entrada na ponte entre 08h e 09h – Sentido Rio de Janeiro

Cenário 1 (C1)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**8:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	16	18
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 2 (C2)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**8:30**	**5:50**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	16	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	19	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 3 (C3)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**8:30**	**5:50**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	16	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	30	22	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) **(pagamento em ambos os sentidos**	4	1,2	1,2

Escolho:			

Cenário 4 (C4)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**8:30**	**5:50**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	16	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	34	22	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) **(pagamento em ambos os sentidos**	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 5 (C5)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**8:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	34	16	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 6 (C6)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**8:30**	**5:30**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	30	19	19
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos	4	1,2	1,2

Escolho:			

Entrada na ponte entre 09h e 10h – Sentido Rio de Janeiro

Cenário 1 (C1)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**9:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	16	18
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 2 (C2)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**9:30**	**5:50**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	16	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	39	19	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 3 (C3)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**9:30**	**5:50**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	16 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	15
1 vez na semana demoraria (min)	30	22	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos	4	1,2	1,2

Escolho:			

Cenário 4 (C4)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**9:30**	**5:50**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	16 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	13
1 vez na semana demoraria (min)	34	22	16
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 5 (C5)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**9:30**	**5:30**	**10:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	13	15
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	34	16	21
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 6 (C6)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**9:30**	**5:30**	**10:30**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	19	13	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	30	19	19
Tarifa pedágio NITERÓI-RIO (R$) (pagamento em ambos os sentidos	4	1,2	1,2

Escolho:			

Entrada na ponte entre 16h e 17h – Sentido Niterói

Cenário 7 (C7)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**16:30**	**15:30**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	46	18	22
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 8 (C8)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**16:30**	**15:50**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	17	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	46	22	18
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 9 (C9)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**16:30**	**15:50**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	17 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	17
1 vez na semana demoraria (min)	36	27	27
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	4	1,2	1,2
Escolho:			

Cenário 10 (C10)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**16:30**	**15:50**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	17 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	13
1 vez na semana demoraria (min)	40	27	18
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2
Escolho:			

Cenário 11 (C11)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**16:30**	**15:30**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	40	18	27
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 12 (C12)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**16:30**	**15:30**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	24	13	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	36	23	23
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	4	1,2	1,2

Escolho:			

Entrada na ponte entre 17h e 18h – Sentido Niterói

Cenário 7 (C7)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**17:30**	**15:30**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	29	13	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	46	18	22
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 8 (C8)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**17:30**	**15:50**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	29	17	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	46	22	18
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 9 (C9)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**17:30**	**15:50**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	29	17 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	17
1 vez na semana demoraria (min)	36	27	27
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	4	1,2	1,2
Escolho:			

Cenário 10 (C10)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**17:30**	**15:50**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	29	17 Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	13
1 vez na semana demoraria (min)	40	27	18
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2
Escolho:			

Cenário 11 (C11)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**17:30**	**15:30**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	29	13	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	40	18	27
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 12 (C12)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**17:30**	**15:30**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	29	13	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	36	23	23
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	4	1,2	1,2

Escolho:			

Entrada na ponte entre 18h e 19h – Sentido Niterói

Cenário 7 (C7)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**18:30**	**15:30**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	28	13	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	46	18	22
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 8 (C8)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**18:30**	**15:50**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	28	17	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	46	22	18
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 9 (C9)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**18:30**	**15:50**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	28	17	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	36	27	27
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	4	1,2	1,2

Escolho:			

Cenário 10 (C10)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**18:30**	**15:50**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	28	17	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	40	27	18
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	3,1	2	2

Escolho:			

Cenário 11 (C11)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**18:30**	**15:30**	**19:10**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	28	13	17
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	40	18	27
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	5	0,3	0,3

Escolho:			

Cenário 12 (C12)

	Habitual	Cedo	Tarde
Horário ENTRA na ponte	**18:30**	**15:30**	**19:40**
Tempo para ATRAVESSAR a ponte (min)	28	13	13
		Lembre que viajando **FORA** do **PICO** haverá também uma **REDUÇÃO** no seu **TEMPO TOTAL** de viagem da origem ao destino	
1 vez na semana demoraria (min)	36	23	23
Tarifa pedágio RIO-NITERÓI (R$) (pagamento em ambos os sentidos)	4	1,2	1,2

Escolho:			

APÊNDICE 2 – QUESTIONÁRIO OD

Formulário para veículos leves

Pergunta	Perguntas e Respostas Possíveis
Município de Origem	Municípios Brasil
Bairro de Origem	Bairros de Municípios escolhidos
Município de Destino	Municípios Brasil
Bairro de Destino	Bairros de Municípios escolhidos
Frequência Quantidade	Número
Frequência Unidade	Por dia
	Por semana
	Por mês
	Por ano
	Primeira vez
	Eventual
Local de Origem / Destino	Compras
	Estudo
	Local de trabalho
	Negócios
	Outros
	Passeio / Visita / Lazer
	Residência
	Saúde
Marca	XXX
Modelo	YYY
Propretário	1. próprio (motorista)
	2. Alugado (Localiza/Movida)
	3. Emprestado (parente)
	4. empresa
	5. outra
Fianciador do Pedágio	1. Motorista
	2. Empresa
	3. Dividido entre todos os ocupantes
Cobrança Automática (AVI)	Sim / Não
interesse em cobrança Automática (AVI)	Sim / Não
Número de Passageiros	Número
Renda do Motorista	Renda A: Acima de R$11.261
	Renda B: De R$ 8.641 a R$ 11.261
	Renda C: De R$ 2.004 a R$ 8.640
	Renda D: De R$ 1.254 a R$ 2.004
	Renda E: Até R$ 1.254
Este veículo tem isenção do pagamento do pedágio?	Não
	Polícia
	Prefeitura
	Bombeiro
	Ambulância
	Estado
	Veículo Oficial
	Outros

Formulário para veículos pesados

Pergunta	Perguntas e Respostas Possíveis	
Município de Origem	Municípios Brasil	
Bairro de Origem	Bairros de Municípios escolhidos	
Município de Destino	Municípios Brasil	
Bairro de Destino	Bairros de Municípios escolhidos	
Frequência Quantidade	Número	
Frequência Unidade	Por dia	Por semana
	Por mês	Por ano
	Primeira vez	Eventual
Caminhão Carregado	1. Carregado	
	2. Vazio	
Local de Origem / Destino	1. Fábrica / Depósito	
	2. Centro de Distribuição	
	3. Usina ou Silo	
	4. Fazenda	
	5. Porto	
	6. Loja / Supermercado	
	7. Terminal Ferroviário	
	8. Terminal de Cargas	
	9. Transportadora (Garagem)	
Tipo de Carga	ZZZ	
Carga tipo Container	Sim / Não	
Marca	XXX	
Modelo	YYY	
Eixos Totais e Eixos Suspensos	Número	
Propretário	1. próprio (motorista)	
	2. transportadora	
	3. empresa / proprietário carga	
	4. outra	
Fianciador do Pedágio	1. próprio (motorista)	
	2. transportadora	
	3. empresa / proprietário carga	
	4. Outra	
Cobrança Automática	Sim / Não	
Interesse em cobrança Automática	Sim / Não	
Quem Decidiu a rota	1. Motorista	
	2. Transportadora	
	3. Empresa	
	4. Empresa de escolta	
	5. Proprietário da carga	
	6. Outros	
Renda do Motorista	Renda A: Acima de R$11.261	
	Renda B: De R$ 8.641 a R$ 11.261	
	Renda C: De R$ 2.004 a R$ 8.640	
	Renda D: De R$ 1.254 a R$ 2.004	
	Renda E: Até R$ 1.254	
Este veículo tem isenção do pagamento do pedágio?	Não	
	Polícia	Prefeitura
	Bombeiro	Ambulância
	Estado	Veículo Oficial
	Outros	

APÊNDICE 3 – PROJETO DE INSTALAÇÃO DE SISTEMA MULTI-LANE FREE FLOW

Análise do contexto geral

Este documento contém o projeto de alto nível de um sistema Multi-Lane Free Flow (MLFF) para o mercado brasileiro com o objetivo de construir, instalar e implementar um pórtico teste em ambiente real.

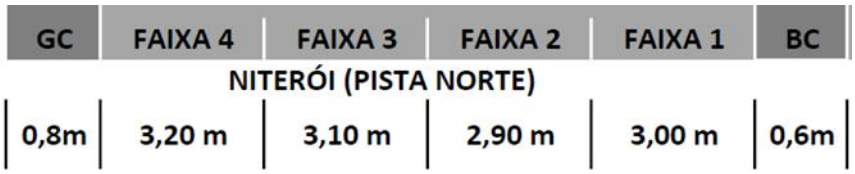

Figura A3.1 - Esquema da sessão no local de instalação do sistema MLFF

O pórtico foi instalado suspenso sobre 4 faixas, conforme exemplificado na Figura A3.1, garantindo uma área desobstruída de 6,35m de altura. Optou-se por criar uma solução sem dispositivos no chão, fazendo uso de tecnologias inéditas. O pórtico foi equipado com os dispositivos necessários para:

- detectar veículos;
- identificar veículos por meio de leitura de TAG, se aplicável;
- registrar a imagem de placas traseira e/ou dianteira;
- classificar o veículo de acordo com o tipo, quantidade de eixos e pneus em rodados duplos.

Todas as faixas terão a mesma configuração necessária para a contagem de eixos pelos dispositivos, os quais foram instalados em apenas duas faixas.

Além dos dispositivos, foi instalada na parte superior do pórtico a parte eletrônica para garantir energia e comunicação aos dispositivos, enquanto o controlador de zona foi instalado em um outro local coberto.

Para cada veículo que passou por baixo do pórtico, foi criada uma transação contendo todos os dados gerados pelos dispositivos; esses dados e todas as fotos relacionadas foram coletados e disponibilizados em um aplicativo para verificação e análise.

Todos os dados coletados foram utilizados para calcular KPIs para avaliação do desempenho do sistema e dos dispositivos.

Análise do esquema de classificação

Durante a prova de conceito (POC), o esquema tradicional de classificação pode ser comparado a um esquema de classificação feito simplesmente com base no formato de veículos e no output específico de dispositivos a laser, destacando as diferenças em termos de receita por classe única que confere pequenas variações no total de receitas.

O atual esquema de classificação é determinado com base em:

- Número de eixos
- Identificação de pneus em rodados duplos
- Eixos suspensos

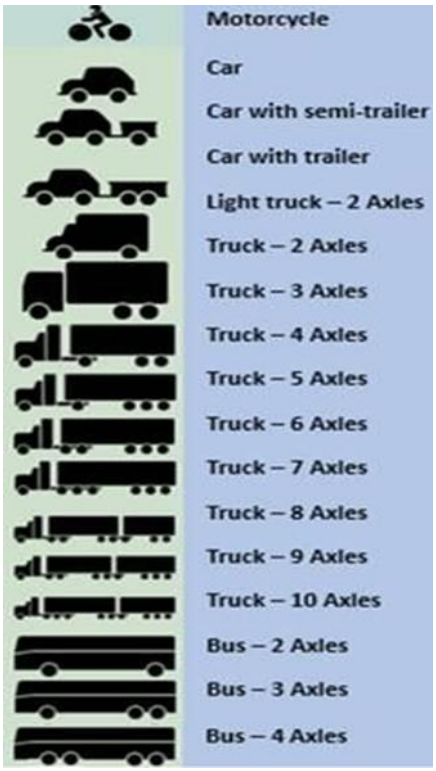

Figura A3.2 - Tabela de classificação

Define-se uma classe universal:

Código	Classe Universal	Descrição	Número de eixos	Pneus em rodados duplos
1	CAT 01	Veículo	2	NÃO
2	CAT 02	Caminhão pequeno com 2 eixos	2	SIM
3	CAT 03	Caminhão com 3 eixos	3	SIM
4	CAT 04	Caminhão com 4 eixos	4	SIM
5	CAT 05	Caminhão com 5 eixos	5	SIM
6	CAT 06	Caminhão com 6 eixos	6	SIM
7	CAT 07	Veículo com 1 eixo adicional	3	NÃO
8	CAT 08	Veículo com 2 eixos adicionais	4	NÃO
9	CAT 02	Ônibus com 2 eixos	2	SIM
10	CAT 03	Ônibus com 3 eixos	3	SIM
11	CAT 6 + 1	Caminhão com 7 eixos	7	SIM
12	CAT 6 + 2	Caminhão com 8 eixos	8	SIM
13	CAT 6 + 3	Caminhão com 9 eixos	9	SIM

14	CAT 6 + 4	Caminhão com 10 eixos	10	SIM
15	MOTO	Motocicleta	2	NÃO
16	CAT 04	Ônibus com 4 eixos	4	SIM

"Número de eixos" se refere aos eixos com pneus em contato com o solo (ou seja, eixos suspensos não devem ser considerados).

Projeto do sistema

Os principais objetivos da solução de pórtico desenvolvida para a POC são:

coleta e medição de KPIs;

avaliação do desempenho do sistema em uma instalação brasileira;

validação do funcionamento adequado em comparação à praça de pedágio tradicional usada como referência.

A solução S*Gate utiliza sensores robustos, padronizados e testados na prática, bem como equipamentos de Pagamento Eletrônico de Pedágio (ETC) para atingir um desempenho de alto nível, sendo projetada para maximizar a disponibilidade do sistema, a facilidade de manutenção e o processo geral de verificação de limitações por meio da teoria de restrições (TOC).

A instalação consiste em:

Câmeras para leitura automática de placas dianteiras e traseiras;

Uma linha de antenas conectadas aos leitores de Identificação Automática de Veículos (AVI) para a leitura de TAG;

Um sistema de detecção e escaneamento de perfis de veículos com base em dispositivos com tecnologia dupla laser/radar, capazes de fornecer gatilhos externos e classificação de veículos com base em um esquema volumétrico;

Um sistema suspenso de contagem automática de veículos com base em análise de imagens de vídeos, sem a necessidade de loops ou dispositivos no solo (apenas para duas faixas);

Equipamentos de comunicação.

Com base nas metas estabelecidas para a POC, a solução não implementa a configuração de Cobrança de Pedágio Integralmente Eletrônica (AET) totalmente redundante e tolerante a

falhas; os dois recursos podem ser desenvolvidos em uma segunda etapa, com o aperfeiçoamento da configuração instalada após o atingimento dos KPIs esperados.

Os equipamentos instalados ficarão protegido contra interrupções de energia e sobretensão por uma fonte de alimentação ininterrupta (UPS) instalada no local; a UPS fornece energia durante interrupções repentinas e curtas e permite um encerramento suave em caso de longas interrupções de energia.

A correlação de dados em tempo real é a característica principal do sistema que permite a geração de transações únicas e precisas quando os veículos passam sob o pórtico. É gerada uma única transação por veículo, utilizando e correlacionando as várias fontes de informações disponíveis durante a operação normal:

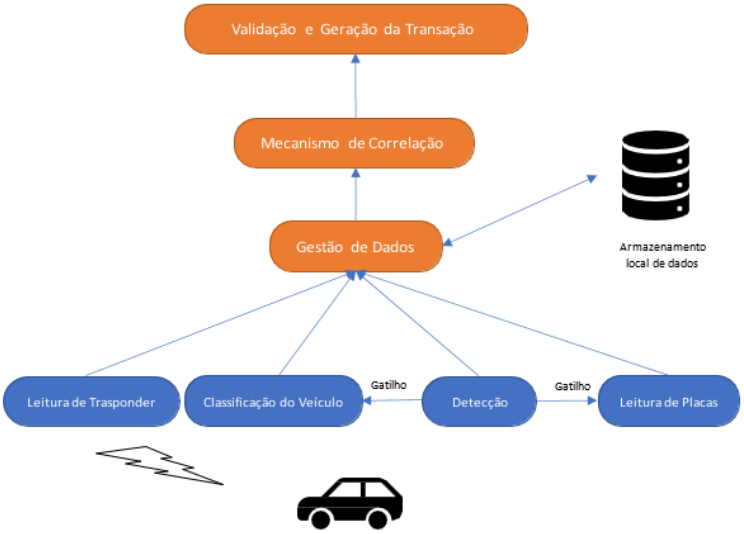

Figura A3.3 - Esquemático da movimentação e gestão dos dados.

- a movimentação do veículo atravessando o campo de escaneamento a laser e por radar permite o acionamento do evento de detecção de presença a ser consumado pelo sistema;
- as mensagens de dados do transponder originadas pelo leitor AVI são coletadas em tempo real e a faixa por onde o veículo esteja passando é estimada em uma análise de espaço de tempo/potência para uma correlação ideal entre o veículo e o transponder;
- câmeras frontais de Reconhecimento Automático de Número de Placas (ANPR) são ativadas a partir da captação da mensagem de gatilho de detecção e as imagens obtidas são automaticamente escaneadas por sistema de Reconhecimento Óptico de Caracteres (OCR) integrado; dois fluxos independentes para eventos de placas e imagens de placas são gerados em tempo real e as informações são transmitidas de forma autônoma para o controlador;
- câmeras traseiras de ANPR podem detectar automaticamente a presença de veículos e tirar fotos, que são automaticamente escaneadas pelo sistema OCR integrado; similar às câmeras frontais, dois fluxos independentes para eventos de placas e imagens de placas

são gerados em tempo real e as informações são transmitidas de forma autônoma para o controlador;

- o sistema de Contagem Automática de Eixos analisa de forma contínua o fluxo de vídeos para detectar veículos automaticamente, contar eixos e fornecer uma imagem reconstituída do veículo passante;
- o controlador correlaciona as informações geradas pelas diferentes fontes para criar uma transação completa para cada veículo passante; o registro da transação é composto por informações de placa, informações baseadas em transponder (caso disponível), informações de classificação incluídas pelo módulo de Controle Autônomo de Veículos (AVC) e de acordo com metadados específicos da transação e relativos às regras aplicáveis do negócio;
- as transações são reunidas e transmitidas para o mecanismo de validação de transação do Host de Pedágio (TH) em um intervalo de tempo a ser configurado ou quando é atingido um determinado número de transações em espera, que também pode ser configurado.

Equipamentos instalados

Quatro subestações independentes, sob a supervisão do aplicativo de controlador, funcionam de forma autônoma e em sinergia para extrair todos os dados relevantes dos veículos e gerar um registro de transação altamente confiável adequado para a aplicação de uma tarifa de pedágio em TH de acordo com as regras do negócio implementadas.

As quatro subestações são:

- Detecção e Classificação Automática de Veículos (AVD/C)
- Contagem Automática de Eixos
- Identificação Automática de Veículos (AVI)
- Sistema de Fiscalização de Evasão (VES)

A Figura A3.4 a seguir descreve a esquematização do pórtico, na qual cada bloco representa um elemento- chave do sistema S*Gate.

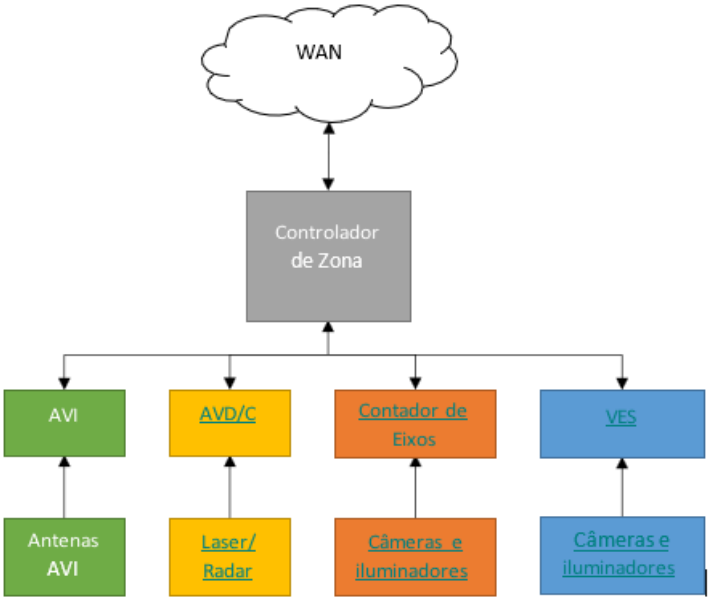

Figura A3.4 - Esquemático representativo do funcionamento dos dados do pórtico

Subsistema de Detecção e Classificação Automática de Veículos

O subsistema de Detecção e Classificação Automática de Veículos (AVD/C) é equipado com lasers Comark para entregar o melhor desempenho em detecção e separação de veículos. Para isso, dois dispositivos foram instalados para cada faixa:

Dispositivo Comark LSR2001 na margem esquerda da faixa, inclinado em 45°, perpendicular à faixa, para detectar o veículo e seu formato pela lateral (Figura A3.5). Dispositivo Comark RSR4001L no meio da faixa, inclinado em 45°, para detectar o veículo, comprimento e velocidade pela frente (Figura A3.6).

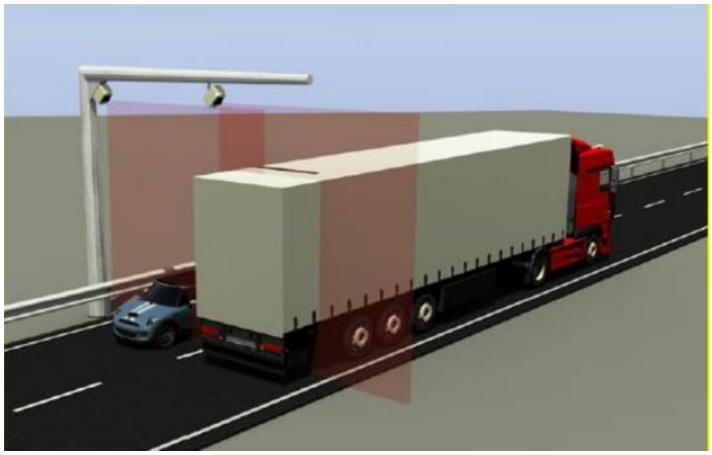

Figura A3.5 - LSR2001

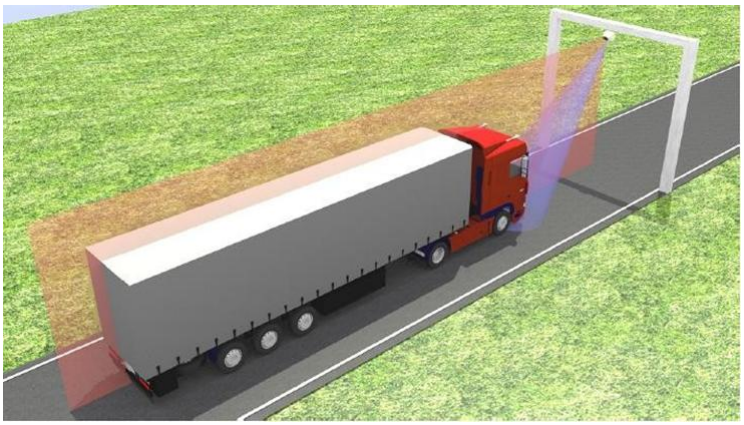

Figura A3.6 - RSR4001L

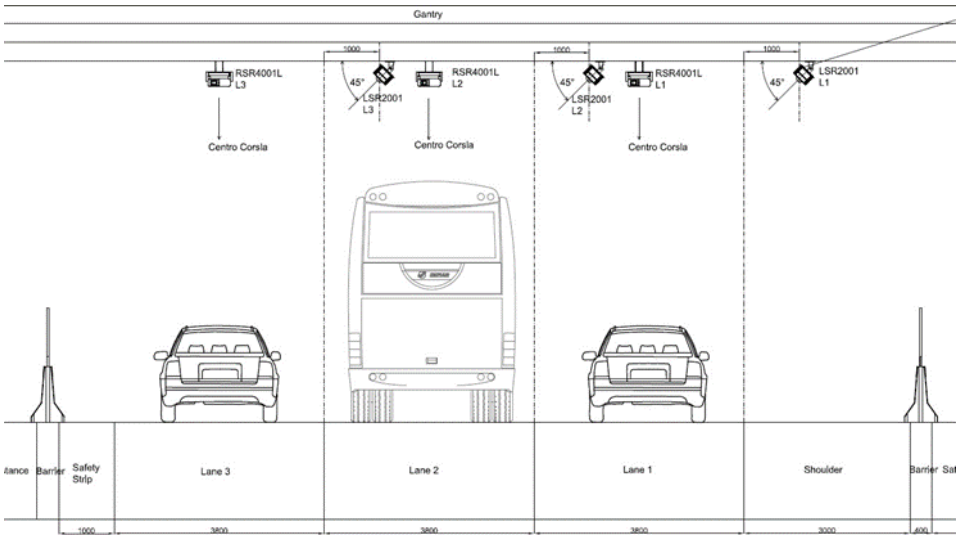

Figura A3.7 - Visão Traseira

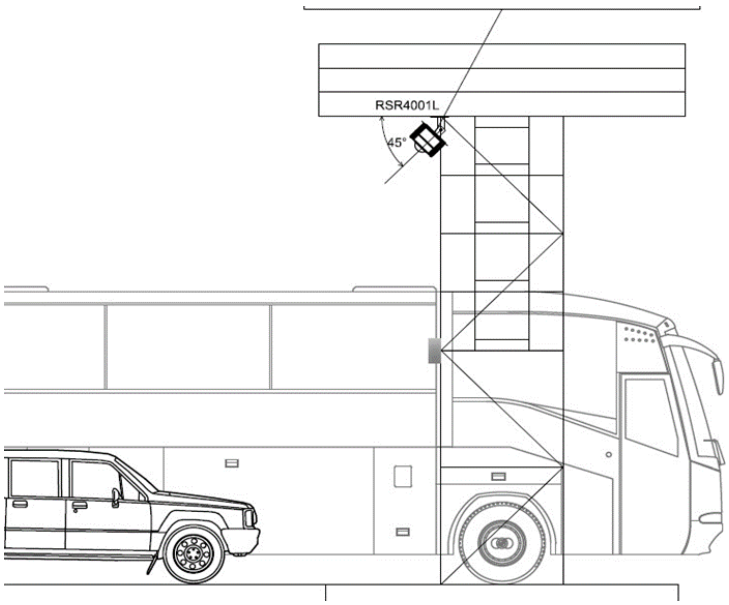

Figura A3.8 - Visão Lateral

A Figura A3.7 e Figura A3.8 representam respectivamente a visão traseira com o esquemático RSR4001L e LSR2001 detectando e registrando para a classificação do veículo e a visão lateral demonstrando a posição do sensor RSR4001L. Os dois dispositivos para cada faixa podem ser considerados como um único sensor, pois eles são sincronizados para criar um único output.

Quando o subsistema detecta a parte frontal do veículo, ele gera um evento utilizado para acionar as câmeras frontais com a tecnologia Reconhecimento Automático de Placas de Veículos (ALPR), que conseguem mensurar a velocidade e as dimensões do veículo, além de analisar o formato do veículo para categorizá-lo em uma das classes a seguir:

Classe Comark	Descrição da classe
0	Não Classificado
1	Pedestre
2	Bicicleta
100	Motocicleta
200	Carro
220	Suv
240	Picape
250	Carro com reboque
270	Suv com reboque
290	Picape com reboque
300	Van

350	Van com reboque
400	Ônibus
401	Ônibus de viagem
402	Ônibus articulado
403	Ônibus de dois andares
450	Ônibus com reboque
451	Ônibus de viagem com reboque
453	Ônibus de dois andares com reboque
500	Caminhão
501	Caminhão com reboque
502	Caminhão com semirreboque

Subsistema de Contagem de Eixos

O esquema de classificação atual no Brasil é feito com base na contagem de eixos e detecção de pneus em rodados duplos na cabine de Pedágio. Todos os contratos de concessão no Brasil determinam a tarifa com base na contagem de eixos, algumas concessões consideram somente os pneus em contato com o solo, outras consideram tanto os que tocam o solo quanto os eixos suspensos; além disso, as tarifas de pedágio são diferentes para veículos comerciais e não comerciais e para categorias especiais, como ônibus.

Por este motivo, a configuração do pórtico MLFF para a POC inclui um subsistema de contagem de eixos dedicado a coletar dados sobre os eixos do veículo, que são adicionados às transações.

O Sistema de Contagem Automática de Eixos proposto para a POC é fabricado pela Tattile e usa uma solução totalmente suspensa baseada em imagem. O sistema conta com câmeras e iluminadores infravermelho de alto desempenho que podem analisar o tráfego de fluxo livre e contar os eixos em condições diurnas e noturnas.

As câmeras são instaladas na parte superior do pórtico e ficam inclinadas em um ângulo apropriado para analisar a parte lateral dos veículos passantes; possuem algoritmos de processamento interno e rede de inteligência artificial (IA) instruídos para otimizar o reconhecimento de eixos, gerando os seguintes dados:

Número de eixos;

Imagem reconstituída do veículo;

Eixos suspensos;

Metadados (Carimbo de Data e Hora /ID da Faixa/etc.).

Uma implementação em curso pretende adicionar ao sistema o recurso de reconhecer eixos com pneus em rodados duplos. Esta funcionalidade, que está evoluindo para um estado de produção, foi incluída como avaliação em uma atualização futura do firmware.

O sistema de Contagem de Eixos proposto para a POC consiste em algumas câmeras de infravermelho (mod F02002-000) para cada faixa contando com iluminadores infravermelho próximo (NIR) externos dedicados de 850 nm (F01920-000) com ampla abertura (H80°/V30°); estes dispositivos são instalados na parte superior do pórtico, não sendo necessário nenhum dispositivo no solo para uma operação de alto nível (Figura A3.9).

Figura A3.9 - Iluminador Tattile e câmera Tattile para contagem de eixos

Conforme mencionado anteriormente, apenas duas faixas foram equipadas com o sistema de Contagem de Eixos. A Figura A3.10 mostra um exemplo do esquema de instalação projetado para o POC no qual as câmeras são instaladas de forma a otimizar a visão lateral dos veículos em cada faixa.

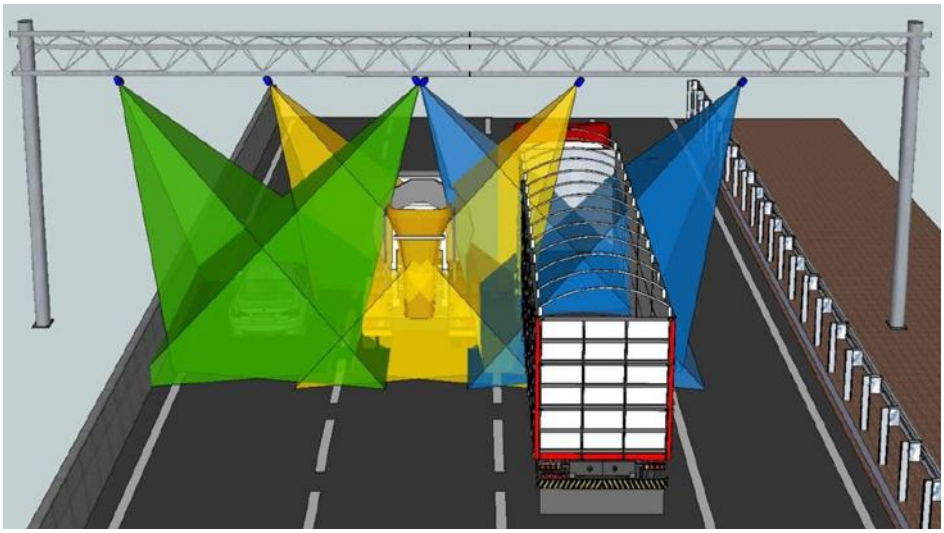

Figura A3.10 - Projeção de leitura das câmeras instaladas

Foi escolhida a configuração redundante (duas câmeras infravermelho por faixa) para maximizar o desempenho do sistema e contar de forma correta os eixos dos veículos passantes mesmo em caso de obstáculos e obstruções; o evento mais comum é quando um caminhão e um carro se deslocam lado a lado e o caminhão encobre a visão lateral do carro (Figura A3.11).

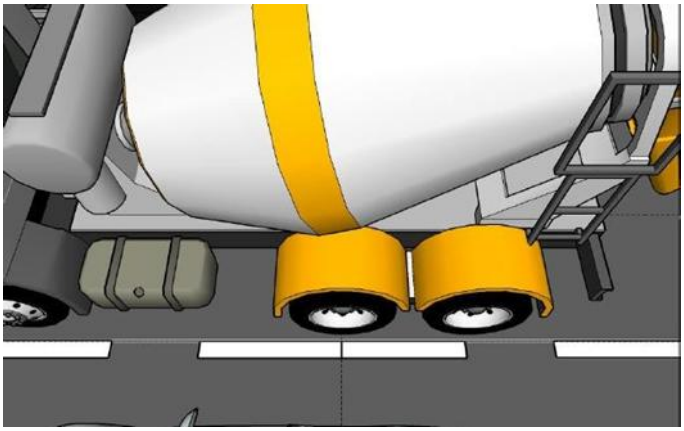

Figura A3.11 - Representação de veículo obstruindo a visão das demais faixas

Quando as câmeras e os iluminadores são instalados, devem ser consideradas as seguintes restrições:

- o ângulo de inclinação da câmera de infravermelho não pode exceder 60°, incluindo a inclinação transversal da rodovia;
- a câmera deve estar mais afastada de sua faixa para evitar o aumento do ângulo de inclinação;

- o iluminador infravermelho deve ser instalado ao lado da câmera de Contagem de Eixos;
- o iluminador infravermelho deve ser instalado a menos de 1,5m de sua câmera;
- a área de iluminação deve estar acima do campo de visão do sistema de Contagem de Eixos, já que o objetivo é iluminar a mesma área com o mesmo ângulo para evitar a criação de sombras.

Seguem abaixo algumas medidas comuns para o Sistema de Contagem de Eixos (Figura A3.12).

Parameters	Value	Notes
Axle Counter		
Offset	4.9 m (12.3 ft)	From lane center
Height	7 m (20 ft)	+/-30 cm (1ft). For different layouts, please contact Tattile.
Tilt Angle	55°	+/-2°
Roll Angle	0°	(+/- 1°) No rotation on the optical axis
Pan Angle	90°	Transverse to the driving direction
Illuminator		
Illuminator	Max distance 1.5 m (5 ft)	Installed beside the camera and pointing to the same area.

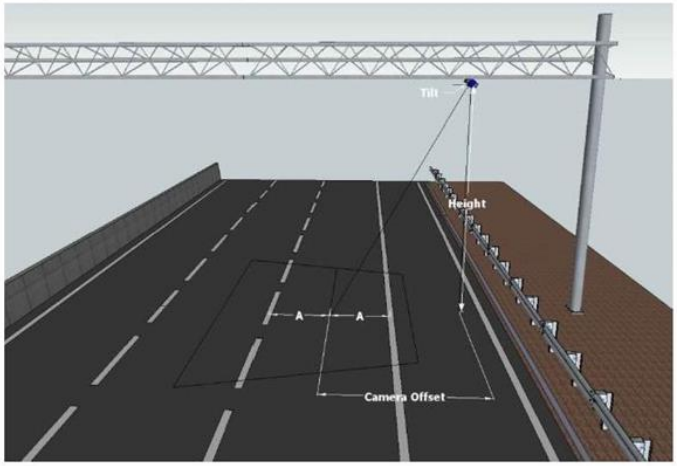

Figura A3.12 - Instalação do sistema de contagem de eixos

As câmeras são configuradas para funcionar no modo Ativação Automática e para fornecer sinal de início/fim do veículo quando a parte dianteira ou a parte traseira do veículo atravessar o centro da imagem (Figura A3.13).

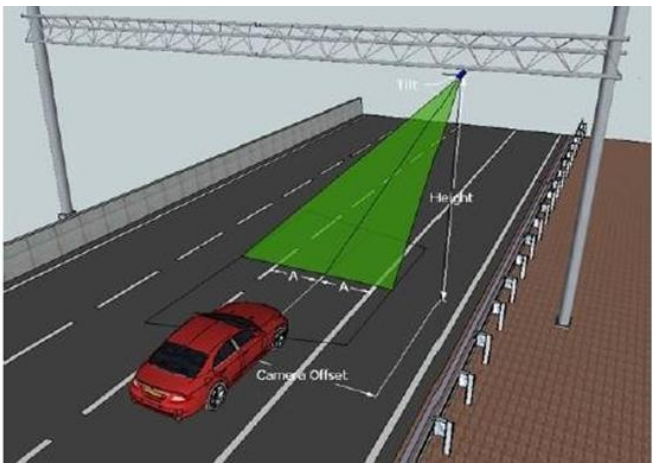

Figura A3.13 - Ativador automático do sistema de contagem de eixos

Conforme já mencionado, no fim da execução, o sistema de contagem de eixos gera uma mensagem de evento único que contém as informações reunidas durante a execução, bem como apenas uma imagem reconstituída do veículo formada por inúmeras imagens capturadas durante a passagem do veículo. A Figura A3.14 demonstra como uma série de imagens é transformada em uma única imagem restituída.

Figura A3.14 - Restituição das imagens capturadas em um único trânsito.

Sistema de Fiscalização de Evasão

O Sistema de Fiscalização de Evasão (VES) é responsável por detectar a imagem de veículo passando pelo pórtico, capturando imagens da parte dianteira e traseira, identificando e extraindo os números de placas.

Cada faixa foi equipada com uma câmera que detecta a aproximação do veículo e outra que detecta o distanciamento do veículo, com iluminadores que se adequem melhor às leis do estado (é proibido utilizar luzes visíveis) e com capacidade de detectar todos os tipos de placas. A Figura A3.15 e Figura A3.16 exemplificam como foi feita a leitura para fiscalização de evasões.

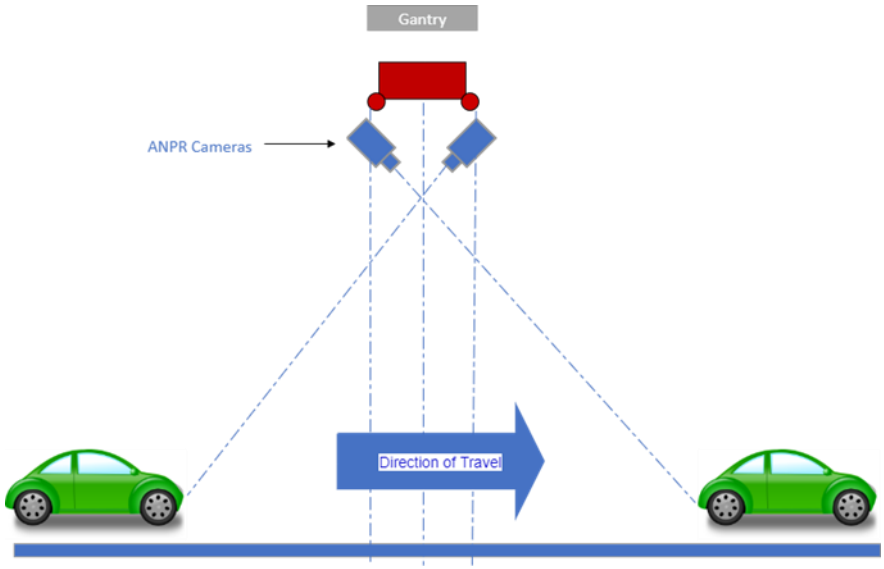

Figura A3.15 - Visão Lateral do VES

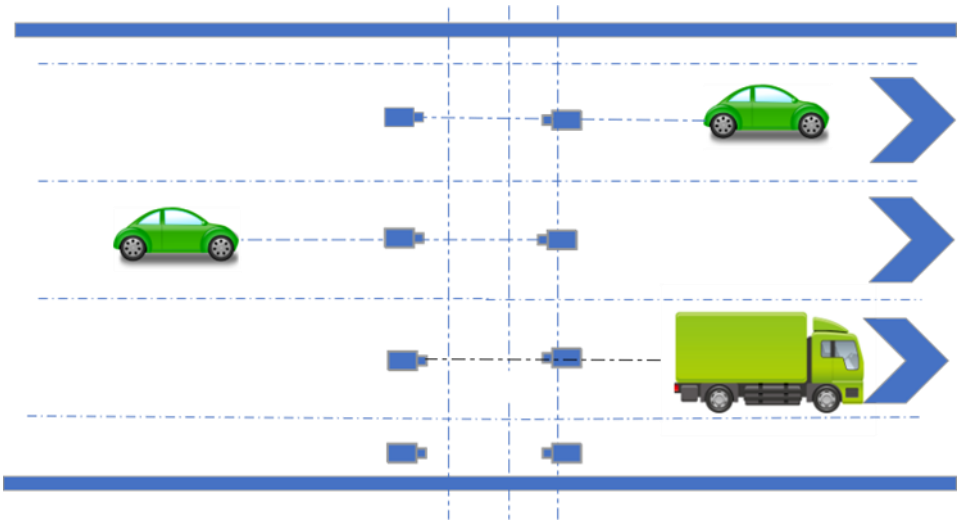

Figura A3.16 - Visão de Cima do VES

Geralmente, para cada veículo, são capturadas pelo menos as seguintes fotos:

- Placa dianteira, se aplicável;
- Cena geral da parte frontal;
- Placa traseira, se aplicável;
- Cena geral da parte traseira.

Para melhor desempenho (ou seja, não perder nenhuma imagem), foi utilizada uma combinação de ativação externa (fornecida pelo AVD) e ativação automática (detecção de movimento).

Na ausência de TAG, a placa dianteira deve ser utilizada para cobrança de pedágio, se aplicável, ou a placa traseira (como no caso de motocicletas).

ALPR

A funcionalidade ALPR é utilizada para os dois tipos de placas e fornecida diretamente pelas câmeras ALPR, que processam as imagens e registram:

- os caracteres de placas de veículos;
- a classificação de confiança;
- nacionalidade.

É possível gerenciar países com diversos tipos de placas de veículos por configuração e introduzir um segundo mecanismo de OCR (integrado ou não) para fortalecer a confiança do ALPR.

Placas antigas

As placas antigas têm diferentes combinações de cores para caracteres e para o fundo e não são reflexivas, então não são de fácil leitura principalmente à noite. As placas vermelhas, particularmente, podem causar alguns problemas.

A POC foi útil para testar e ajustar uma boa solução para a leitura do maior número possível de placas diferentes. Não é necessário detectar a cor das placas.

Figura A3.17 - Exemplo de placas antigas

Novas placas

As novas placas têm um fundo branco e reflexivo, com caracteres coloridos, então podem ser lidas facilmente pelas câmeras com iluminadores infravermelhos. Por não ser necessário detectar cores, não é preciso utilizar câmeras em cores. A Figura A3.18 exemplifica as placas e cores na versão Mercosul.

Categorias

A cor dos caracteres alfanuméricos e das bordas da placa de identificação veicular, cujo fundo é sempre branco, é determinada de acordo com a categoria dos veículos, conforme o seguinte esquema:

Categoria	Exemplo		Cor dos Caracteres	Pantone	Observação
Particular	ABC1D23		Preto	—	Uso geral para veículos que não se enquadrem nas demais categorias
Comercial	ABC1D23		Vermelho	Fórmula Sólido Brilhante 186C	Aluguel (veículos que realizam transporte pago, p. ex.: táxis, ônibus, caminhões, etc.) Aprendizagem (autoescolas e CFCs)
Oficial/ Representação	ABC1D23		Azul	Fórmula Sólido Brilhante 286C	Veículos pertencentes aos órgãos da administração pública direta nos níveis federal, estadual, distrital e municipal
Diplomático/ Consular	ABC1D23		Dourado	Fórmula Sólido Brilhante 130C	Missão Diplomática, Corpo Consular, Corpo Diplomático, Organismo Consular e/ou Internacional e Acordo de Cooperação Internacional
Especiais	ABC1D23		Verde	Fórmula Sólido Brilhante 341C	Experiência Fabricantes de veículos, peças e implementos
Coleção	ABC1D23		Cinza Prata	SwopPantoneGrey	Veículos com mais de 30 anos com alto grau de originalidade

Tipos de placas brasileiras no padrão Mercosul. Note-se que o fundo é sempre branco: a categoria é indicada pela cor dos caracteres alfanuméricos e da borda da placa.

Figura A3.18 - Exemplo de placas Mercosul

Câmera frontal

A câmera escolhida para detectar placas dianteiras é um modelo específico capaz de identificar placas não reflexivas, equipadas com iluminador infravermelho e duas óticas iguais com diferentes sensores, um infravermelho e um em cores.

Câmera traseira

A câmera escolhida para detectar placas traseiras é equipada com iluminador vermelho claro (ou seja, uma tecnologia entre infravermelho e luz vermelha) com um pequeno ângulo e duas câmeras de infravermelho.

Subsistema AVI

O subsistema Identificação Automática de Veículos (AVI) é responsável pela leitura de TAGs instaladas em veículos passando em alta velocidade sob o pórtico MLFF.

O subsistema AVI proposto pela POC baseia-se no leitor RFID da empresa Star Systems International chamado Titan, equipado com uma antena específica de cobrança de pedágio chamada Avior, projetada e fabricada especificamente para ser uma antena suspensa sob a rodovia para sistemas de cobrança de pedágio em alta velocidade por meio de tags passivas.

O Titan é um leitor UHF Multi-Protocolo de excelente nível, projetado especificamente para cobranças de pedágio em alta velocidade, como Multi-Lane Free Flow (MLFF) e High Occupancy Tolling; o Titan (Figura 20) identifica diversos protocolos simultaneamente e suporta o Protocolo Artefato ISO/IEC 18000-63 (SJ5511) sob uma licença de software (implementação de criptografia-128-ECB/CBC/CGCN do Padrão de

Criptografia Avançada (AES), também especificada de acordo com o ISO/IEC NP 29167-10, disponibilizada pela Agência de Transportes do Estado de São Paulo – ARTESP).

Com quatro portas de antena de alta velocidade, é possível ter uma cobertura estendida de diversas faixas a partir de apenas um leitor, sendo aplicável ao projeto da POC.

Figura A3.19 - Leitor Titan SSI

A Avior é uma antena robusta e comprovada, projetada e produzida especificamente para ser uma antena suspensa para sistemas de cobrança de pedágio em alta velocidade por meio de tags passivas.

Equipada com um feixe estreito focado com largura de 30 graus, a Avior permite garantir não somente a maximização das taxas de leituras em alta velocidade, mas também o isolamento da zona de leitura desejada, evitando leituras cruzadas de faixas e interferência de faixas adjacentes.

A Avior (Figura A3.20) também possui a capacidade de operar em uma faixa de frequência de 865–928 MHz, o que a torna adequada para o mercado brasileiro.

Figura A3.20 - Antena Avior SSI

Para este projeto, há apenas uma zona de cobrança de pedágio e um controlador que coleta todas as Tags lidas pelo subsistema AVI. Para um excelente desempenho de AVI, recomenda-se uma cobertura de ponta a ponta da rodovia completa e sobreposta com duas antenas Avior por faixa.

Essa configuração oferece dois benefícios principais:

- cobertura redundante da antena no caso de falha em antena;
- diversidade espacial otimizada, o que permite a leitura de tag de múltiplos ângulos enquanto o veículo transita pela zona de leitura.

Considerando que não há nenhuma redundância ativada no sistema durante a primeira fase da POC, embora uma configuração totalmente redundante de AVI possa ser aplicada facilmente em uma segunda fase, e considerando que o local escolhido para a POC é uma autoestrada de 4 faixas, a Figura A3.21 sugere a seguinte configuração para maximizar o desempenho e garantir uma cobertura completa da rodovia:

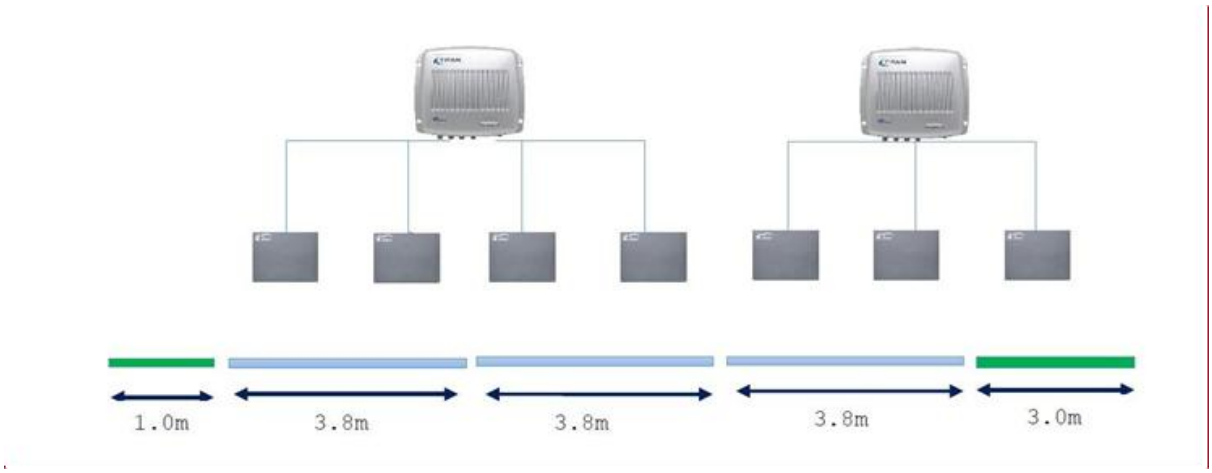

Figura A3.21 - Configuração de antenas para maximizar o desempenho e garantir uma cobertura completa da rodovia

Conforme explicado na imagem, o subsistema AVI consiste em dois leitores Titan em uma configuração não redundante mais 8 antenas Avior; os dois leitores Titan são instalados na parte superior do pórtico para diminuir o comprimento dos cabos de radiofrequência (RF) e para reduzir a perda de energia:

- Um leitor instalado no lado superior esquerdo do pórtico;
- Um leitor instalado no lado superior direito do pórtico.

Essas sugestões de posicionamento assumem que há energia disponível em cada gabinete.

Durante a passagem de um veículo, as antenas ativam a Tag passiva do veículo e começam a ler as informações armazenadas. A ativação da tag resulta em múltiplas leituras a partir das antenas que são armazenadas e geridas pelo leitor Titan.

O Titan cria múltiplas mensagens lidas de acordo com a posição do veículo e envia todas elas para o controlador. No caso de perda de NW, o armazenamento persistente interno tem capacidade para até 1.000.000 de transações únicas.

No Controlador de Zona, são implementados passos de execução necessários para descriptografar o ID da Tag e identificar a faixa de entrada e saída do veículo.

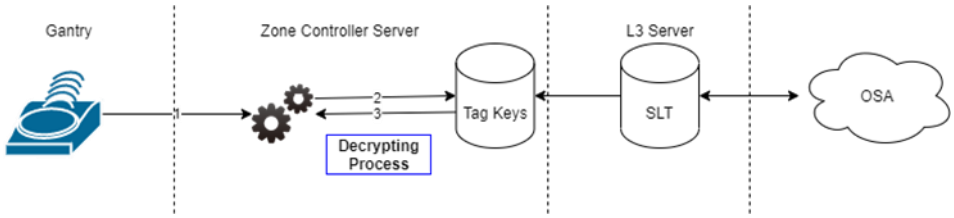

Figura A3.22 - Fluxo de descriptografia de TAG

As informações geradas pelo Controlador de Zona sobre ID da Tag, faixas, campos da tag passiva, são por fim adicionadas ao registro de transação única gerada para o veículo passante.

Condições para funcionamento

O desempenho do sistema deve ser mensurado levando em conta as seguintes condições específicas de funcionamento:

- velocidades baixas;
- velocidades normais;
- velocidades de rodovias;
- trânsito lento;
- trânsito pesado;
- mudanças de faixas;
- condições de luminosidade;
- condições do clima:
- chuva forte;
- neblina;
- diversas tags;

- eixos suspensos.

Funcionalidades e implementação de software

Arquitetura da Solução

A solução projetada para a POC consiste em:

- Aplicativo de controlador de zona: instalado no servidor à beira da rodovia, responsável por gerenciar todos os dispositivos, para coletar todos os eventos gerados pelos sensores e para gerar uma transação para cada veículo detectado;
- Aplicativo de Host de Pedágio: instalado em um servidor dedicado, responsável por coletar e gerenciar todas as transações geradas no controlador de zona;
- Painéis: responsáveis por exibir dados e calcular KPIs para verificação de desempenhos do sistema.

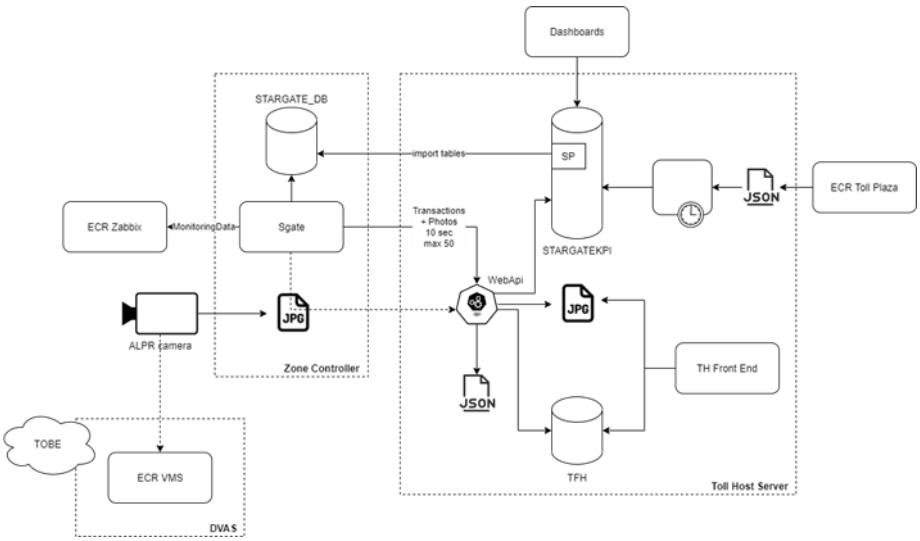

Figura A3.23 - Configuração de antenas para maximizar o desempenho e garantir uma cobertura completa da rodovia Arquitetura da Solução

Controlador de zona

O aplicativo de controlador de zona tem por finalidade:

- receber e armazenar localmente todos os dados gerados pelos dispositivos;
- processar todos os dados e associá-los aos seus respectivos veículos;
- gerar dados das transações;
- enviar dados de transações para sistemas externos;
- gerenciar dispositivos e enviar dados de monitoramento para sistemas externos.

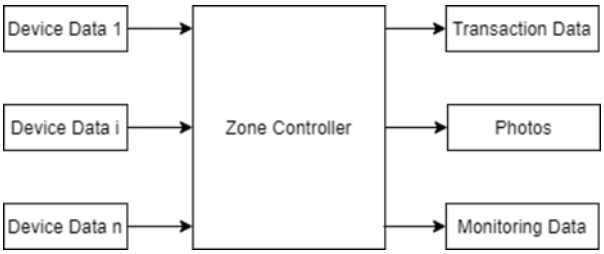

Figura A3.24 - Controlador de Zona

Funcionalidades

O controlador de zona implementa as seguintes funcionalidades:

ID	Funcionalidade	Descrição
F001	Atribuição de OCR	O controlador de zona correlaciona as imagens frontais e traseiras de cada veículo, mesmo quando captadas por múltiplas câmeras
F002	Atribuição de TAG	O controlador de zona correlaciona as leituras de TAG para cada veículo, mesmo quando lida por diversas antenas e quando o veículo possui diversas TAGs instaladas
F003	Atribuição de faixa	O controlador de zona identifica a faixa ou as faixas utilizadas pelo veículo
F004	Atribuição de classe	O Controlador de zona consegue utilizar os dados produzidos pelos sensores para determinar a classe do veículo de acordo com as regras do negócio definidas
F005	Gestão de troca de faixas	O controlador de zona consegue correlacionar dados mesmo quando o veículo troca de faixa
F006	Gestão de movimentação entre duas faixas	O controlador de zona consegue correlacionar dados mesmo quando o veículo se movimenta entre duas faixas
F007	Correlação de dados de dispositivos	O controlador de zona vincula todos os dados gerados pelos sensores com cada veículo que passa pelo pórtico
F008	Criação de transação	O controlador de zona gera dados únicos de transação para cada veículo que passa pelo pórtico

F009	Marcação de transação para revisão manual	O controlador de zona define regras para identificar transação possivelmente incorreta que precisa de revisão manual
F010	Envio de transação	O controlador de zona pode enviar as transações geradas para sistemas externos, gerenciando o resultado desse processo
F011	Gestão de transações rejeitadas	O controlador de zona pode gerenciar transação rejeitada por sistemas externos e enviá-la novamente após a correção de problemas
F012	Gestão de horário	Todos os dispositivos e o controlador de zona devem estar sincronizados
F013	Atribuição de ID de transação	O controlador de zona atribui um ID único para cada transação gerada
F014	Gestão de configuração de cancelas	O controlador de zona pode gerenciar a configuração de cancelas e dispositivos
F015	Gestão de fotos	O controlador de zona pode receber fotos de todos os dispositivos e armazená-las localmente até elas serem enviadas corretamente para sistemas externos
F016	Envio de fotos	O controlador de zona pode enviar fotos para sistemas externos, gerenciando o resultado desse processo
F017	Geração de dados de status de dispositivos	O controlador de zona define e calcula o status de dispositivos
F018	Geração de dados de status de cancelas	O controlador de zona define e calcula o status da cancela, com base no status do dispositivo e o status operacional

Dados da Transação

O output do sistema é uma transação, que contém todas as informações necessárias para a cobrança do pedágio.

A cobrança de pedágio não é aplicada na zona de controle, deixando a definição de regras de cobrança de pedágio para o host.

O modelo de dados de transação inclui:

- Tag de Pedágio: a TAG a ser utilizada no processo de cobrança de pedágio;
- Placa de Pedágio: a placa a ser utilizada no processo de cobrança de pedágio;
- Trânsito: coleta de todos os dados lidos pelos sensores
- Dados AVI (TAG)
- Dados VES (Placas Dianteira e Traseira)
- Dados AVC (Formato e Eixos)
- Dados Mestre: Impressão digital do veículo, utilizado para identificá-lo.

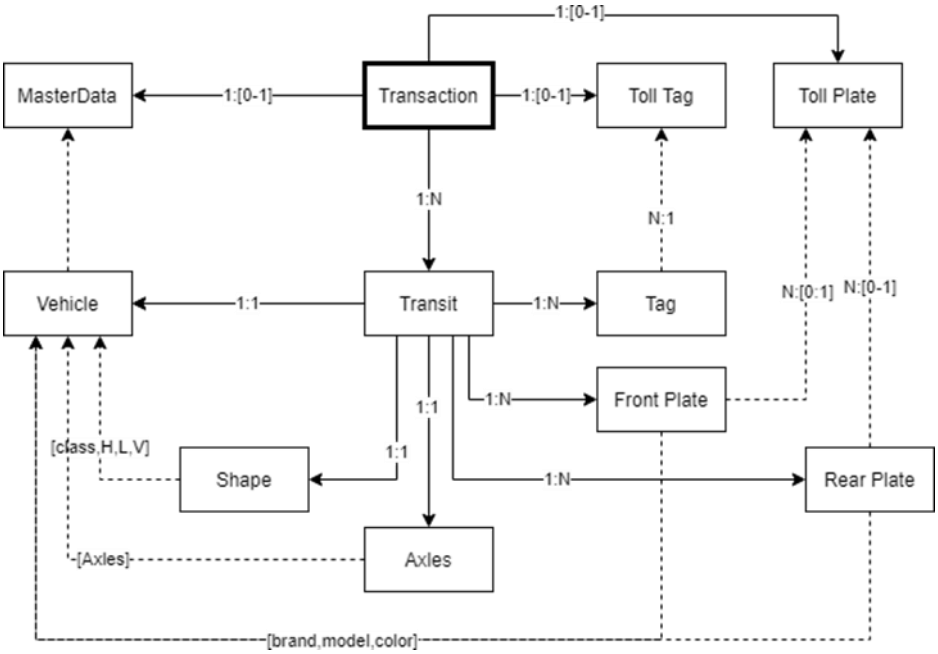

Figura A3.25 - Modelo de Dados de Transação

As transações são geradas em formato JavaScript Object Notation (JSON) e enviadas em lotes de no máximo 50 ou pelo menos a cada 30 segundos (é possível configurar os dois parâmetros).