

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Patrícia Pereira Arantes Inácio**

**Níveis de serviço e simulação computacional: um estudo de caso  
da influência de fatores no tempo de atendimento em uma praça  
de pedágio rodoviário**

Itajubá, 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Patrícia Pereira Arantes Inácio**

**Níveis de serviço e simulação computacional: um estudo de caso  
da influência de fatores no tempo de atendimento em uma praça  
de pedágio rodoviário**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção.**

**Área de Concentração:** Sistemas de Produção e Logística

**Orientador:** Prof.<sup>a</sup> Dr. Josiane Palma Lima

**Coorientador:** Prof. Dr. Fabiano Leal

Itajubá, 2017

## RESUMO

A capacidade e o nível de serviço das instalações de pedágio ainda não foram formalmente abordados no *Highway Capacity Manual*, que reconhece e afirma que deve ser dada especial atenção às características únicas, restrições e atrasos causados por estas instalações de cobrança. Essa pesquisa buscou elucidar os seguintes questionamentos: como fatores humanos e operacionais influenciam o tempo de atendimento manual em praças de pedágio? E qual a relação com os níveis de serviço proporcionados pela empresa? Teve por objetivo avaliar os níveis de serviço oferecidos em uma praça de pedágio rodoviário por meio da simulação computacional, testando a influência de fatores na capacidade de atendimento manual. Para alcançar esse objetivo foi realizado um estudo de caso em uma praça de pedágio localizada no estado de Minas Gerais. A coleta de dados, realizada por intermédio de vídeos, documentos e visitas ao local, forneceu informações como a categoria do veículo, a forma de pagamento, o turno de trabalho, dia da semana e sexo do arrecadador; também forneceu o volume de veículos que passaram pela praça e sua composição. O trabalho pode ser dividido em duas etapas: a primeira buscando analisar a influência de fatores no tempo de atendimento por meio de análise estatística e DOE e a segunda etapa realizada por meio da modelagem e simulação, visando determinar o nível de serviço oferecido pela concessionária aos seus clientes. As conclusões principais da análise dos dados coletados mostram que os fatores Categoria do veículo, Forma de pagamento e Sexo do arrecadador são os que têm maior influência no tempo de atendimento, sendo o fator Categoria o mais impactante, aumentando significativamente o tempo de atendimento. A simulação computacional possibilitou avaliar o nível de serviço atual da praça de pedágio e também cenários diversos. A praça atualmente opera com um nível de serviço D em dias normais de funcionamento, no qual um veículo permanece no sistema entre 45 e 60 segundos. Entretanto, em feriados esse nível de serviço cai para E no turno da madrugada e para o F nos turnos da manhã e tarde. A pesquisa mostrou que existem alternativas e melhorias que podem ser aplicadas no ato de arrecadação manual da praça de pedágio estudada.

**Palavras-chave:** Praças de pedágio; Capacidade de atendimento; Nível de serviço.

## ABSTRACT

This research sought to answer the following questions: How do human and operational factors influence manual service time in toll plazas? And what is the relation with the levels of service provided by the company? The goal of the research was to analyze the influence of factors that interfere in toll plaza manual attendance capacity and the relation with service levels offered by the company considering the use of simulation. To achieve this objective, a toll plaza located in the state of Minas Gerais was studied. The data collect was made by using videos, documents and site visits, provided information such as vehicle category, form of payment, work shift, day of the week and sex of the collector. It also provided the volume of vehicles that passed through the toll plaza and its composition. The work can be divided into two stages: the first research to analyze an influence of factors without service time by means of statistical analysis and DOE and second stage performed through modeling and simulation, aiming to determine the level of service offered by the concession to its customers. The main conclusions of the collected data analyses show that the factors: vehicle category, form of payment and sex of the collector are those that have the greatest influences on the time of attendance, being the category the most relevant factor, significantly increasing the time of service. A computational simulation made it possible to evaluate the current service level of the toll plaza and also various scenarios. An operating square with a service level D on normal days of operation, without which a vehicle is left without a system between 45 and 60 seconds. However, this level of service is not for us. And it's not the time of dawn. In relation to the simulated scenarios, the scenario is not only addressed as a form of payment with money and without change, male collectors and as categories of smaller vehicles, for which it presented better level of service, and going to level D. There is a scenario that considers only female collectors, it was the same as equating to the real scenario.

**Key-words:** Toll plazas; Capacity of service; Service level.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Publicações e citações no ISI Web of Knowledge com o termo “traffic simulation” .....	17
Figura 2 - Publicações e citações no ISI Web of Knowledge com o termo “toll plaza” 18	
Figura 3 - Relação de variáveis que influenciam um sistema .....	22
Figura 4 - Elementos principais de um sistema de fila de espera.....	26
Figura 5 - Abordagens de simulação e níveis de detalhamento .....	29
Figura 6 - Sequências de passos para um projeto de simulação .....	30
Figura 7 - Vista aérea da praça de pedágio de Vargem (São Paulo) .....	34
Figura 8 - Categoria dos veículos segundo a ANTT .....	39
Figura 9 - Escala de níveis de serviços em praças de pedágio .....	43
Figura 10 - Etapas da pesquisa .....	47
Figura 11 - Mapeamento das atividades executadas pelo arrecadador e pelo motorista 50	
Figura 12 - Representação de cada categoria na amostra.....	52
Figura 13 - Formas de pagamento utilizadas.....	53
Figura 14 - Representação do volume de veículos por dia da semana.....	53
Figura 15 - Categoria de veículos por turno .....	54
Figura 16 – Representação dos momentos de chegada e saída dos veículos .....	55
Figura 17 - Histograma para o tempo de atendimento .....	55
Figura 18 – Efeitos principais para o tempo de atendimento .....	58
Figura 19 - Fatores e níveis adotados inicialmente .....	61
Figura 20 - Dendograma dos fatores analisados.....	62
Figura 21 - Experimento a ser realizado com 5 fatores e 2 níveis para cada fator.....	63
Figura 22 – Primeira réplica de dados do experimento .....	65
Figura 23 - Gráfico de Pareto com os fatores analisados .....	66
Figura 24 - Gráfico normal dos efeitos padronizados (a resposta é tempo de atendimento).....	67
Figura 25 - Gráfico de efeitos principais para a resposta tempo de atendimento.....	68
Figura 26 - Gráfico de interação dois a dois para a resposta tempo de atendimento ....	68
Figura 27 - Esquema da praça de pedágio estudada.....	71
Figura 28 - Árvore de decisão para os tempos de atendimento.....	74
Figura 29 – Tela do <i>software</i> representando a parte gráfica do modelo computacional 76	
Figura 30 - Teste de normalidade dos dados .....	79

Figura 31 – Representação da praça de pedágio no <i>software</i> de simulação PTV VISSIM .....	81
Figura 32 - Nível de serviço para um fluxo normal .....	85
Figura 33 - Nível de serviço para fluxo típico nos turnos 1, 2 e 3 .....	86
Figura 34 - Nível de serviço no feriado de Corpus Christi.....	89
Figura 35 - Nível de serviço no feriado de Corpus Christi nos turnos 1, 2 e 3 .....	90
Figura 36 - Nível de serviço para no feriado de Nossa Senhora Aparecida.....	92
Figura 37 - Nível de serviço no feriado de Nossa Senhora Aparecida nos turnos 1, 2 e 3 .....	93
Figura 38 - Nível de serviço no feriado de Natal .....	95
Figura 39 - Nível de serviço no feriado de Natal nos turnos 1, 2 e 3 .....	96
Figura 40 - Nível de serviço no feriado de Ano Novo .....	98
Figura 41 - Nível de serviço para o feriado de Ano Novo nos turnos 1, 2 e 3 .....	99

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Indicadores de desempenho utilizados em praças de pedágio .....	45
Quadro 2 - Resumo dos cenários analisados .....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média do tempo de atendimento para as categorias de veículos .....	57
Tabela 2 – Média do tempo de atendimento por dia da semana .....	58
Tabela 3 - Níveis de serviços para praças de pedágio segundo Lin e Su (1994).....	72
Tabela 4 - Distribuições estatísticas utilizadas no projeto de simulação.....	75
Tabela 5 - Taxa de chegada (veículos/hora).....	76
Tabela 6 - Parâmetros médios observados na desaceleração e aceleração.....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCR .....	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
ANTT .....	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AVI.....	Identificação automática de veículos
BPM.....	<i>Business Process Modeling</i>
CNT .....	Confederação Nacional do Transporte
DOE.....	<i>Design of Experiments</i>
FIFO .....	<i>First in first out</i>
FRN .....	Fundo Rodoviário Nacional
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LIFO .....	<i>Last in first out</i>
OOCEA .....	<i>Orlando Orange County Expressway Authority</i>
PPP .....	Parcerias Público-Privadas
PRI.....	<i>Priority</i>
SIRO .....	<i>Served in random order</i>
TPM.....	<i>Toll Plaza Model</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Relevância .....	16
1.2	Justificativa .....	18
1.3	Problema de pesquisa.....	19
1.4	Objetivos.....	19
1.4.1	Objetivos específicos .....	19
1.5	Estrutura do trabalho .....	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	Design of Experiment (DOE).....	21
2.2	Funcionamento deficiente de um sistema e projeto de simulação.....	24
2.2.1	Simulação de trafego .....	31
2.3	Concessões rodoviárias .....	32
2.3.1	Praça de pedágio .....	34
2.3.1.1	Fatores humanos e capacidade de atendimento.....	37
2.3.1.2	Fatores operacionais e capacidade de atendimento.....	37
2.3.1.3	Classificação dos veículos.....	38
2.4	Níveis de serviço.....	39
2.4.1	Nível de serviços em praças de pedágio .....	41
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>	<b>46</b>
3.1	Etapas de trabalho.....	46
<b>4</b>	<b>COLETA E ANÁLISE DOS DADOS PRIMÁRIOS .....</b>	<b>49</b>
4.1	Empresa concessionada (objeto de estudo) .....	49
4.2	Dimensão e discriminação da coleta de dados .....	51
4.3	Análise preliminar dos dados coletados .....	52
4.4	Tempo de atendimento .....	54
4.5	Conclusões do capítulo .....	58

<b>5</b>	<b>FATORES HUMANOS E OPERACIONAIS E A RELAÇÃO COM O TEMPO DE ATENDIMENTO .....</b>	<b>60</b>
5.1	Reconhecimento e relato do problema .....	60
5.2	Escolha dos fatores e dos níveis .....	60
5.3	Seleção da variável de resposta .....	64
5.4	Planejamento do experimento .....	64
5.5	Realização do experimento .....	64
5.6	Análise dos dados.....	65
5.7	Conclusões do experimento.....	69
<b>6</b>	<b>NÍVEL DE SERVIÇO DA PRAÇA DE PEDÁGIO - PROJETO DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>71</b>
6.1	Concepção .....	71
6.1.1	Objetivos e definição do sistema.....	71
6.1.2	Construção e validação do modelo conceitual .....	72
6.1.3	Modelagem dos dados de entrada.....	73
6.2	Implementação do modelo computacional.....	76
6.2.1	Construção do modelo computacional .....	76
6.2.2	Calibração do modelo computacional .....	77
6.2.3	Validação do modelo computacional .....	78
6.3	Cenários simulados e análises.....	80
6.3.1	Fluxo Típico .....	84
6.3.1.1	Situação real .....	84
6.3.1.2	Cenários simulados .....	85
6.3.2	Fluxos atípicos.....	87
6.3.2.1	Feriado de Corpus Christi .....	88
6.3.2.1.1	Situação real.....	88
6.3.2.1.2	Cenários simulados .....	89
6.3.2.2	Feriado de Nossa Senhora Aparecida.....	91

6.3.2.2.1	Situação real.....	92
6.3.2.2.2	Cenários simulados .....	92
6.3.2.3	Feriado de Natal .....	94
6.3.2.3.1	Situação real.....	94
6.3.2.3.2	Cenários simulados .....	95
6.3.2.4	Feriado de Ano Novo .....	97
6.3.2.4.1	Situação real.....	97
6.3.2.4.2	Cenários simulados .....	98
<b>6.4</b>	<b>Conclusões e recomendações do capítulo .....</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>103</b>
<b>7.1</b>	<b>Sugestão de trabalhos futuros .....</b>	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O funcionamento deficiente de um sistema é percebido através do congestionamento de clientes (CHAMBERS; KOUVELIS, 2006). Andrade (2000) comenta que a Pesquisa Operacional e a Teoria das Filas possuem conceitos importantes para o estudo de problemas de congestionamento de sistemas que, segundo o autor, tem como característica principal a presença de “clientes” solicitando “serviços” de alguma maneira. Ernst *et al.* (2004) citam que a Teoria das Filas e a Modelagem e Simulação são as duas abordagens mais comumente usadas para traduzir as chegadas de clientes em diferentes intervalos de tempo para que os níveis necessários de serviço sejam alcançados.

Para Rangel *et al.* (2012) a simulação teve grande expansão nas últimas décadas, ganhando contorno científico bem definido em congressos e periódicos que abordam esse assunto. A Teoria das Filas, de acordo com Fogliatti e Mattos (2007), consiste na modelagem analítica de processos ou sistemas que resultam em espera e tem como objetivo determinar e avaliar quantidades, denominadas medidas de desempenho, que expressam a produtividade/operacionalidade. De posse destas informações, buscar meios para minimizar os impactos negativos das esperas nos processos. É usada como ferramenta poderosa na modelagem e análise de desempenho de muitos sistemas complexos tais como sistemas de telecomunicações, *call centers*, redes de computadores e sistemas de serviço (FILIPOWICZ; KWIECIEN, 2008).

Oliveira (2000) comenta que estudar um sistema em congestão tem como objetivo entendê-lo e, se possível melhorá-lo, mudando-o de alguma forma. O fenômeno da congestão pode ser descrito de várias formas, por exemplo, com relação ao número médio de usuários na fila, a proporção de tempo em que todos os servidores estão ocupados, o número médio de usuários no sistema, entre outras, que correspondem às medidas de desempenho do sistema. A teoria de filas, pela análise matemática detalhada, procura calcular essas medidas, com a intenção de melhor entender o comportamento do sistema (GROSS *et al.*, 2008).

A simulação tem sido uma técnica utilizada para auxiliar processos de tomada de decisão, abrangendo decisões de investimento em infraestrutura e na melhoria de operações, entre outras (PRAIA; GOMES, 2015). Para Jahangirian *et al.* (2010) desde a sua criação, simulação foi aplicada a diversos setores, tais como indústria, serviços, defesa, saúde e serviços públicos. A simulação é reconhecida como a segunda técnica mais utilizada no domínio da gestão de operações, sendo o mais popular a "Modelagem"

(PANNIRSELVAM *et al.*, 1999; AMOAKO-GYMPAH; MEREDITH, 1989). Portanto, a simulação é um termo extremamente amplo e pode ser definido como o processo de elaboração de um modelo de um sistema real (ou hipotético) e a condução de experimentos com a finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação (SHANNON, 1975). Para Montevechi *et al.* (2007) há três modelos que devem ser realizados em um estudo de simulação: o modelo conceitual, o modelo computadorizado e o modelo operacional. Estes modelos devem ser validados ou verificados.

Atualmente existe uma ampla variedade de estudos e práticas que utilizam a simulação computacional, podendo ser aplicada em diversas áreas, destacando: sistemas computacionais; sistemas de telecomunicações; fabricação; negócios; logística; militar; treinamento; científica; econômica; serviços etc. (PRAIA; GOMES, 2015; DREYER *et al.*, 2014; ALFIERI; MATTA, 2013; OWENS *et al.*, 2013; ROSA; LUZ, 2012; JAHANGIRIAN *et al.*, 2010).

No que tange a área de transportes, Cunnard *et al.* (1975) citam que os primeiros passos no estudo da circulação de tráfego datam dos anos 30 do século XX, com uma teoria probabilística de descrição do tráfego. Os primeiros estudos sobre teorias do fluxo do tráfego de veículos começaram a ser desenvolvidos com o trabalho de Bruce Greenshields, que relacionou grandezas como: fluxo, densidade e velocidade, e a aplicação da teoria de probabilidades para tentar descrever o fluxo de tráfego (ADANS, 1936). Segundo Bogo *et al.* (2015), com o fim da segunda grande guerra, houve um desenvolvimento da rede viária e da indústria do automóvel, que impulsionou novos estudos sobre a circulação de tráfego. No início da década de 50 do século XX surge uma teoria que faz a analogia entre os veículos no tráfego e as partículas num fluido, designada por “*Traffic Flow Theory*” da autoria de Lighthill e Whitham (HOOGENDOORN; BOVY, 2001). Esse trabalho foi fundamental para uma quantidade de estudos de formulação matemática, resultando em vários modelos que descrevem os diferentes aspectos da teoria. Assim, a simulação de tráfego tem como objetivo reproduzir situações de interação entre os veículos, condutores, infraestrutura e condições de circulação em uma rede viária.

O pedágio rodoviário é uma intervenção física instalada na rodovia que restringe o direito de passagem mediante pagamento de tributo ao poder público ou à concessionária privada (ALVARENGA *et al.*, 2006). Já sob o ponto de vista da engenharia de tráfego, o pedágio é tido como um gargalo ao fluxo nas rodovias, uma

vez que a capacidade das praças costuma ser menor do que a capacidade das rodovias onde estas praças estão inseridas (OBELHEIRO *et al.*, 2010). Araújo (2001) comenta que essas paradas impedem o fluxo contínuo do tráfego, aumentam o tempo total de viagem e potencialmente podem reduzir o nível de serviço na rodovia. Apesar de diferentes tecnologias (VATS *et al.*, 2014; ISMAIL; SARKAR, 2012) estarem sendo implementadas, ainda há um grande número de praças de pedágio em todo o mundo onde os veículos precisam parar e muitas vezes enfrentar uma fila. Se mal projetadas ou mal concebidas, as praças de pedágio podem atuar como importantes pontos de estrangulamento (DUBEDI *et al.*, 2012).

Os *softwares* de simulação de tráfego vêm se tornando cada vez mais populares como uma ferramenta de análise do fluxo de tráfego. Uma das razões para o aumento no uso de simulação é a necessidade de modelar e analisar o funcionamento dos sistemas de transporte complexos em condições congestionadas (ZHANG *et. al.*, 2001; FELLENDORF; VORTISCH, 2010).

A forma de cobrança praticada, a configuração geométrica da praça, o fluxo de tráfego e sua composição, dentre outros parâmetros operacionais; bem como o tipo de usuário e o arrecadador, que são considerados parâmetros humanos, podem influenciar no desempenho da praça de pedágio. A parcela de envolvimento de cada um dos tipos desses fatores (operacionais ou humanos) nas etapas de processo terá impacto direto com o desempenho da praça de pedágio, isto porque influenciará nos tempos de atendimento (OLIVEIRA, 2004).

É devido à influência desses fatores no tempo de atendimento que o presente trabalho busca desenvolver um estudo para analisar quais fatores influenciam na capacidade de atendimento manuais de uma praça de pedágio e como isso pode refletir na qualidade dos serviços oferecidos pela empresa.

## **1.1 Relevância**

A cobrança do pedágio é um fator que afeta de maneira significativa a percepção dos níveis de serviços prestados em uma rodovia (ARAÚJO, 2001). Demoras no atendimento causadas por falhas na operação da arrecadação, no projeto, ou no dimensionamento geram insatisfação em relação à concessionária. Buscando aperfeiçoar os serviços prestados, é extremamente importante saber como cada fator influencia na capacidade de atendimento manual da praça de pedágio (ARDEKANI; TORRES, 1991). Com base nessas informações, os gestores podem atuar nas causas que

mais influenciam negativamente na capacidade da praça de pedágio. Desta forma, a concessionária e os usuários serão beneficiados. A concessionária usufrui com a melhoria da imagem, devido ao menor tempo de atendimento e possibilidade de elaborar estratégias para redução dos custos operacionais da praça de pedágio. Os usuários recebem um serviço de melhor qualidade, com o tempo gasto nas praças de arrecadação de pedágio otimizado e, conseqüentemente, têm uma percepção de que os valores gastos nas tarifas estão sendo revertidos em seu benefício (PEIXOTO, 2009).

De acordo com Al-Deek (2001), empresas que possuem uma metodologia definida para avaliação de capacidade e nível de serviço, utilizam informações sobre fatores operacionais e humanos, para avaliar suas medidas de eficiência. São considerados fatores operacionais as características do fluxo, a geometria da praça, a forma de cobrança, já os fatores humanos estão relacionados aos arrecadadores do pedágio e motoristas.

As medidas de eficiência constituem uma importante ferramenta para avaliação técnica e otimização da operação e, algumas destas medidas fazem parte dos contratos de concessão rodoviária no Brasil. Na literatura varios estudos buscam analisar a capacidade de atendimento e o nível de serviço em praças de pedágio (ARAÚJO; SETTI, 2006; OLIVEIRA, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2003; KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002a; AL-DEEK, 2001; AL-DEEK *et al.*, 1996; 1997; ZARRILLO *et al.*, 1997; BURRIS; HILDEBRAND, 1996; WOO; HOEL, 1991).

No que diz respeito ao interesse da comunidade científica ao tema proposto, uma busca foi realizada no banco de dados do *ISI Web of Knowledge* com o termo “*traffic simulation*”. Foram utilizados dois filtros para delimitar a pesquisa. Inicialmente foi escolhida a área de pesquisa “*Engineering*” e depois o tipo de documento “*Article*”. Foram obtidos 9608 artigos. A Figura 1 mostra a ascensão do tema nos últimos 20 anos.

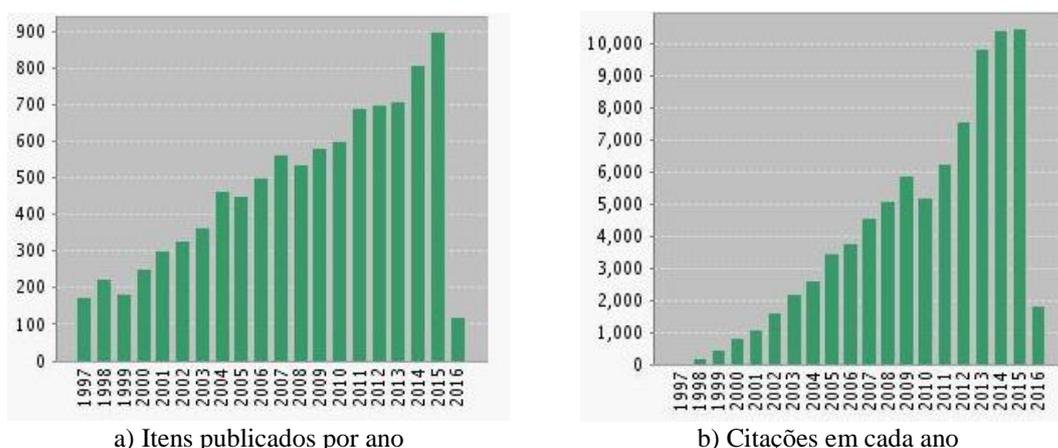


Figura 1 - Publicações e citações no ISI Web of Knowledge com o termo “*traffic simulation*”

Porém, quando a busca foi pelo termo “*toll plaza*”, foram retornados apenas 216 resultados, sendo 2010 o ano que mais se destaca, com 23 itens publicados, como pode ser observado na Figura 2.

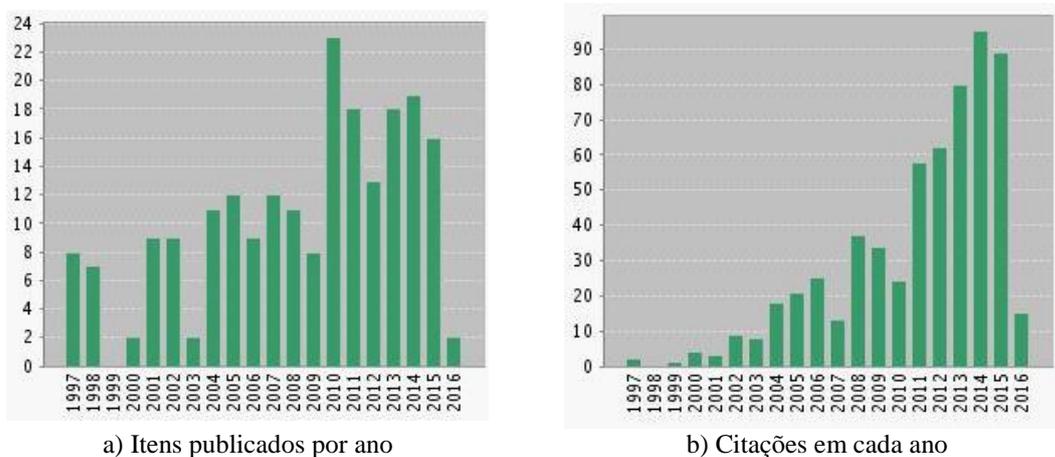


Figura 2 - Publicações e citações no ISI Web of Knowledge com o termo “toll plaza”

Assim, verifica-se que apesar da simulação de tráfego estar sendo muito pesquisado nos últimos anos, o objeto de pesquisa “praças de pedágio” não foi amplamente analisado, dando margem para novas pesquisas e publicações.

## 1.2 Justificativa

Em uma rodovia concessionada, a rapidez no atendimento dos usuários na hora da cobrança do pedágio afeta, significativamente, a percepção do usuário em relação ao nível do serviço prestado pela empresa. Quando ocorrem demoras no atendimento ou até mesmo filas de espera no sistema, devido ao aumento do fluxo ou má dimensionamento do projeto, isso gera insatisfação em relação à empresa.

Assim, saber como fatores humanos e operacionais influenciam no tempo de atendimento ao usuário na cabine de cobrança, bem como o nível de serviço que a empresa está oferecendo são de extrema importância para que gestores possam atuar e melhorar seus serviços e a imagem da empresa frente ao usuário. Além disso, empresas concessionadas são fiscalizadas por órgãos governamentais, necessitando assim cumprir normas acordadas por contrato, o que inclui um limite máximo de tempo no sistema, bem como outras restrições.

### **1.3 Problema de pesquisa**

A cobrança manual de pedágio ocorre em cerca de 60% do total de veículos que trafegam pela praça de pedágio estudada, por isso reduções no tempo de atendimento dessa forma de cobrança impactam de maneira significativa à companhia. Por isso os problemas de pesquisa são:

- a) Como fatores humanos e operacionais influenciam o tempo de atendimento manual em praças de pedágio?
- b) Qual a relação destes fatores com os níveis de serviço proporcionados pela empresa?

### **1.4 Objetivos**

Tem-se por objetivo geral avaliar os níveis de serviço oferecidos em uma praça de pedágio rodoviário por meio da simulação computacional, testando a influência de fatores na capacidade de atendimento manual.

#### **1.4.1 Objetivos específicos**

Para atender ao objetivo geral, pretende-se:

- a) Analisar a influência e a correlação de fatores humanos e operacionais no tempo de atendimento e como eles se relacionam;
- b) Testar a utilização do projeto de simulação a eventos discretos proposto por Montevechi *et al.* (2007) em um problema de simulação de tráfego.
- c) Avaliar o nível de serviço ofertado pela concessionária, através do uso da simulação computacional, e verificar como esses níveis se comportam quando são variados os fatores.

### **1.5 Estrutura do trabalho**

Para melhor organização e compreensão, este trabalho foi dividido em seis capítulos. O capítulo 1, introdutório, apresenta o contexto do trabalho, a relevância do tema e suas justificativas, o problema de pesquisa, os objetivos geral e específico a serem alcançados e a delimitação do tema.

A fundamentação teórica é abordada no capítulo 2, trazendo os conceitos e origens da Teoria das Filas, simulação de maneira geral e voltada para o tráfego de veículos, além de abordar como as concessões de rodovias foram criadas e o funcionamento das praças de pedágio. No tópico sobre praças de pedágio são abordados

os fatores, citados na literatura, tanto operacionais quanto humanos que podem influenciar a capacidade de atendimento.

A metodologia de pesquisa utilizada é apresentada no capítulo 3 juntamente com as principais características dos métodos definidos. O desenvolvimento da pesquisa propriamente dito é mostrado no capítulo 4 em diante, sendo esse capítulo responsável por elucidar os dados coletados e suas principais características, oferecendo uma visão ampla do comportamento da praça de pedágio estudada. O capítulo 5 mostra como os fatores, operacionais e humanos, influenciam o tempo de atendimento por meio de um *Design of Experiment* (DOE). E no capítulo 6 são mostrados todos os passos seguidos para criar o projeto de simulação, tais como a concepção do modelo conceitual, a implementação do modelo computacional e as análises realizadas. Por fim, o capítulo 7 aborda a conclusão da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico busca elucidar os conceitos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa como a Teoria das Filas, que se trata de um método estatístico no qual é permitido estimar as demoras ocorridas quando um serviço tem de ser proporcionado a clientes cuja chegada se dê ao acaso. Estudar um sistema em congestão tem como objetivo entendê-lo e, se possível melhorá-lo, mudando-o de alguma forma.

Neste tópico também será tratado sobre o planejamento de experimentos, do inglês *Design of Experiment* – DOE, que busca elucidar como determinados fatores influenciam a variável de resposta determinada. Também será apresentados conceitos a respeito da modelagem e a simulação computacional, que busca a manipulação das condições de operações das entidades modeladas quando, na prática, seriam muito difíceis de serem realizadas, devido às limitações de naturezas diversas. Assim, por meio desta técnica é possível avaliar como o sistema se comporta em diferentes situações. Também é explicado, com base na literatura, o que são as concessões rodoviárias e como essa medida, adotada pelo governo, busca melhorar as rodovias brasileiras oferecendo um serviço de qualidade aos usuários.

### 2.1 Design of Experiment (DOE)

Um experimento planejado é um procedimento no qual alterações propositais são realizadas, nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões dessas alterações (MONTGOMERY, 2004; CALEGARE, 2001; WERKEMA, 1996). De acordo com Sanchez (2008), as técnicas de projeto de experimentos são úteis para verificar se determinado fator influencia, ou não, a resposta de um sistema.

O planejamento de experimentos, do inglês *Design of Experiments* (DOE), pode ser definido como uma metodologia fundamentada em conceitos estatísticos, que tem por objetivo otimizar o planejamento e executar e analisar o experimento (MACEDO, 2007). Essa metodologia foi desenvolvida entre 1920 e 1930 por Fisher e, posteriormente, incrementada por pesquisadores na área de estatística como Box *et al.* (1978) e Taguchi (1986).

O DOE é uma abordagem que envolve um exame sistemático e eficiente de múltiplas variáveis, simultaneamente, para criar um modelo empírico que correlaciona as respostas do processo para os vários fatores. A concepção experimental é utilizada para minimizar a variação relativa na estimativa dos parâmetros do modelo, seguido

pela análise estatística para filtrar os valores reais dos vários erros que existem no sistema. Ambas as etapas estão intimamente ligadas como o método de análise e sua confiabilidade dependem diretamente do *design* (KUMAR *et. al.*, 2014).

Fundamental no projeto de um novo processo, no estudo e determinação de condições operacionais e no melhoramento contínuo da qualidade de um produto ou de um processo, o DOE tem sido estabelecido como um meio eficaz de caracterização e otimização de sistemas desconhecidos ou complexos. Especialmente quando estudos analíticos sobre a ligação entre a entrada e saída do sistema se revelem difícil ou impossível. Também tem sido uma ferramenta para identificar as causas mais prováveis de um determinado problema e testá-las em menor tempo e custos reduzidos, mantendo o nível de confiança por meio da realização de experimentos estatisticamente planejados (FREITAS; CHIMENDES, 2015; GOH, 2014; MONTGOMERY, 2013; NETO *et al.*, 2007; BOX *et. al.*, 2005).

“Resposta”, “fator” e “nível” são os termos usados no DOE e são definidos como: resposta indica um experimento que resulta em uma causa; o fator denota uma variável independente na experiência e um nível denota o valor de um fator (FRALEY *et al.*, 2006). O DOE organiza as combinações de níveis de fator, avaliando os efeitos de vários fatores e, simultaneamente, tem como objetivo revelar a relação entre o fator e a resposta (GIUNTA; WOJTKIEWICZ, 2003).

Na Figura 4, segundo Montgomery (2009), os fatores de controle são apresentados como as variáveis do processo cujo valor é possível controlar, enquanto os fatores não controláveis são as variáveis cujo valor não é possível controlar. A saída corresponde às variáveis de resposta, que fornecem os resultados do sistema.

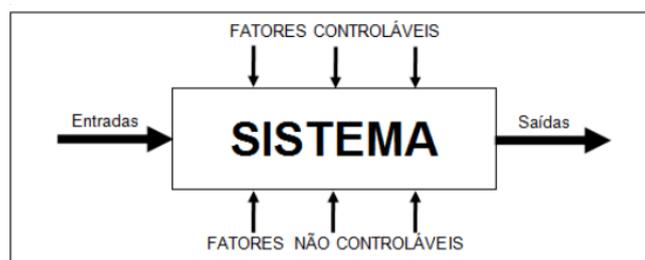


Figura 3 - Relação de variáveis que influenciam um sistema

Fonte: Montgomery (2009)

O uso dessa técnica, de acordo com a visão de Domenech (2002), proporciona benefícios como: a) permitir aos pesquisadores entender quais variáveis influenciam na qualidade dos produtos e, dessa maneira, mudá-las ou controlá-las; b) possibilita o estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos; c) permite mapear a

relação entre variáveis e respostas, de maneira a conhecer o efeito que as variações nas variáveis de controle têm na resposta; e d) representa o processo estudado através de expressões matemáticas.

O DOE tem início com a identificação e seleção dos fatores que podem contribuir para a variação. Em seguida, deve ser realizada a seleção de um modelo que inclua os fatores escolhidos e planejar experimentos eficientes para estimar seus efeitos. Uma vez realizados os experimentos, deve ser executada a análise para se estimar os efeitos dos fatores incluídos no modelo, utilizando métodos estatísticos adequados. Por fim os resultados devem ser interpretados e discutidos, além da recomendação de melhorias quando necessárias (CAMPOS *et. al.*, 2015).

Ainda sobre as etapas de execução de um DOE, Montgomery (2004, 2005, 2009) recomenda os seguintes passos:

- a) Reconhecimento e relato do problema: desenvolver todas as ideias e objetivos específicos do experimento.
- b) Escolha dos fatores e dos níveis: escolher os fatores que devem variar, os intervalos sobre os quais esses fatores variarão e os níveis específicos em que cada rodada será feita.
- c) Seleção da variável resposta: verificar se a variável fornece informações úteis para o que será estudado, a fim de alcançar o objetivo proposto.
- d) Escolha do planejamento experimental: considerar o tamanho da amostra (número de réplicas), a sequência de execução dos ensaios e a necessidade de aleatorização ou do uso de blocos.
- e) Realização do experimento: nesta etapa, o monitoramento e o controle do processo são de imensa importância para garantir a validade do experimento.
- f) Análise dos dados: fazer o uso de métodos estatísticos, a fim de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas, garantindo a confiabilidade e validade dos resultados.
- g) Conclusões e recomendações: o experimento deve acarretar soluções práticas sobre os resultados e recomendar um curso de ação.

A primeira fase é chamada de triagem e envolve a identificação de fatores que têm um efeito estatisticamente significativo sobre o processo. A segunda etapa envolve a previsão das superfícies de resposta e encontrar os pontos de ajuste ideal. Vale salientar a importância da eliminação dos fatores insignificantes nos primeiros passos,

pois essa eliminação auxilia na redução de esforços experimentais necessária nos próximos passos (KUMAR *et al.*, 2014).

O DOE tem sido amplamente utilizado em diversas áreas como biotecnologia (KUMAR *et al.*, 2014; KAZEM *et al.*, 2014; JELMY *et al.*, 2013; MAHESHWARI *et al.*, 2013; NISTA *et al.*, 2012), computação (ARAGÃO *et al.*, 2016; LAZIC; MILINKOVIC, 2015; AMANNA *et al.*, 2012), produção industrial (GIASIN *et al.*, 2016; GRIFFITHS *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2015) e até mesmo em pesquisas aeroespaciais como pode ser visto no trabalho desenvolvido por Zhang *et al.* (2012). Entretanto, poucos planejamentos de experimentos vêm sendo desenvolvidos na área de transporte.

Quando análises são feitas para verificar a interação entre os fatores no setor de transportes, outras técnicas vêm sendo aplicadas como modelos de regressão não paramétricos, como é caso do estudo realizado por Xu e Lin (2015) que analisou o aumento do consumo de energia e emissões de dióxido de carbono por parte do setor de transportes. Já Macatangay *et al.* (2014) realizaram uma regressão linear múltipla e um modelo de transporte lagrangeano em uma pesquisa sobre fatores que contribuem para as concentrações de CO<sub>2</sub> em superfícies. Yang *et al.* (2016) realizaram uma análise de correlação para identificar possíveis características espaciais críticas de ciclones tropicais que contribuem para danos funcionais a uma rede rodoviária.

## **2.2 Funcionamento deficiente de um sistema e projeto de simulação**

Um dos sintomas frequentes do funcionamento deficiente de um sistema é o congestionamento de clientes (CHAMBERS; KOUVELIS, 2006). Embora seja geralmente associada a um efeito maléfico, a fila representa um importante papel na gestão de operações de serviços, pois em muitos casos seria impraticável a oferta de uma infraestrutura suficiente para atender à procura de todos os usuários (ANTONIOLO *et al.*, 2004).

De acordo com Andrade (2000), um dos campos da Pesquisa Operacional é a Teoria das Filas, que trata de problemas de congestionamento de sistemas, onde a característica principal é a presença de “clientes” solicitando “serviços” de alguma forma. De acordo com Ernst *et al.* (2004), a Teoria das Filas e modelagem de simulação são as duas abordagens mais comumente usados para traduzir as chegadas de clientes em diferentes intervalos de tempo para que os níveis necessários de serviço sejam alcançados. Para Prado (2006, p. 19), “[...] a modelagem de filas pode ser analisada pelo

ângulo da simulação, em que não mais se usam fórmulas matemáticas, mas apenas tenta-se imitar o funcionamento do sistema real através de recursos computacionais”.

Assim, a Teoria das Filas é um método estatístico no qual se permite estimar as demoras ocorridas quando um serviço tem de ser proporcionado a clientes cuja chegada se dê ao acaso. Como por exemplo, fregueses que esperem para ser atendidos numa loja e/ou automóveis que se congestionem num posto de pedágio (FOGLIATTI; MATTOS, 2007; LOVELOCK; WRIGHT, 2001). A teoria tem como objeto de estudo os sistemas geradores de espera, também chamados sistemas de filas. O que existe de comum nesses sistemas é o fluxo de usuários em busca de serviço e algum tipo de restrição no serviço a ser provido (ARENALES *et al.*, 2007; FILIPOWICZ; KWIECIEN, 2008).

Bateson e Hoffman (2001) apresentam uma visão mais específica, quando afirmam que a teoria das Filas é um ramo da probabilidade que estuda a formação de filas, através de análises matemáticas precisas e propriedades mensuráveis das filas. Ela provê modelos que demonstram o comportamento de um sistema que ofereça serviços cuja demanda cresce aleatoriamente, tornando possível dimensioná-lo de forma a satisfazer os clientes, ser viável economicamente para o provedor do serviço, evitando desperdícios e gargalo e, se possível, melhorá-lo mudando o sistema de alguma forma (CHOWDHURY, 2013; FUIGUEIREDO, ROCHA, 2010; OLIVEIRA, 2000).

O fenômeno da congestão pode ser descrito de várias formas, por exemplo, com relação ao número médio de usuários na fila, a proporção de tempo em que todos os servidores estão ocupados, o número médio de usuários no sistema, entre outras, que correspondem às medidas de desempenho do sistema. A teoria de filas, pela análise matemática detalhada, procura calcular essas medidas, com a intenção de melhor entender o comportamento do sistema (GROSS; HARRIS, 1974). Quando, por exemplo, o número de clientes à espera de atendimento é permanentemente muito grande ou quando os atendentes ficam ociosos a maior parte do tempo, há evidência de que o número de atendentes não está adequadamente dimensionado (ANDRADE, 2000).

Um modelo ou sistema de filas pode ser brevemente descrito da seguinte forma: usuários (ou fregueses ou clientes) chegam para receber certo serviço e, devido à indisponibilidade de atendimento imediato, formam uma fila de espera (ADAN *et al.*, 2000) conforme pode ser verificado na Figura 3. Os termos “usuário” e “serviço” são usados com sentido amplo, podendo estar se referindo a carros chegando a um posto de

pedágio, máquinas esperando para serem consertadas, peças que seguem uma linha de montagem ou mensagens transmitidas pelos canais de comunicação (LIU, 2009).

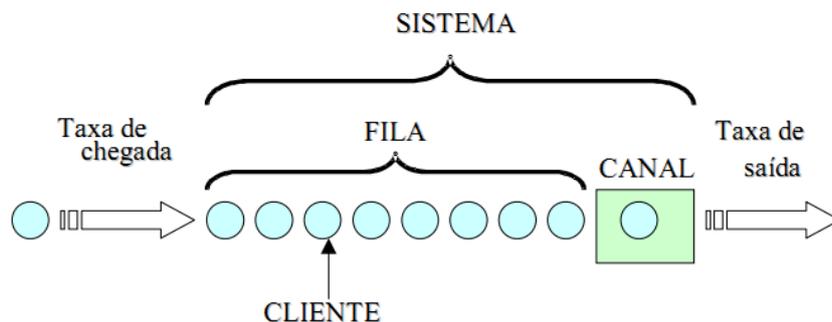


Figura 4 - Elementos principais de um sistema de fila de espera  
Fonte: Shamblin e Stevens (1989)

Considera-se as seguintes terminologias: a) cliente: unidade de chegada que requer atendimento, podendo ser máquina, pessoas e navios; b) fila: número de clientes esperando atendimento, normalmente a fila não inclui o cliente que está sendo atendido; e c) canal de atendimento: processo ou sistema que realiza o atendimento do cliente. Pode ser um canal múltiplo ou único (SILVA *et al.*, 2006).

Os sistemas de filas são caracterizados por cinco componentes: modelo de chegada dos usuários, modelo de serviço, número de atendentes, capacidade do estabelecimento para atender usuários e ordem em que os usuários são atendidos (KLASSEN; MENOR, 2007). O modelo de chegadas define o tempo entre chegadas sucessivas de usuários ao estabelecimento de prestação de serviços (GROSS *et al.*, 2008; KLEINROCK, 1975), se eles chegam a intervalos fixos de tempo o processo de chegadas é dito constante ou determinístico, já se as chegadas são aleatórias elas formam um processo estocástico (TAHA, 2008; BRONSON, 1985). Frequentemente em problemas de filas o número de entradas por unidade de tempo pode ser avaliado por uma distribuição de probabilidade conhecida como a distribuição de Poisson (CHOWDHURY, 2013; AURELIO, 2004; ANDRADE, 2002).

O modelo de serviços é normalmente especificado pelo tempo requerido para prestar o serviço ao usuário. Dentre as distribuições mais usadas destacam-se a exponencial, Erlang e hiperexponencial (GROSS *et al.*, 2008; TORRES, 1996; SHAMBLIN; STEVENS, 1989). O número de atendentes, ou número de canais, representa a oferta simultânea de pessoas ou equipamentos disponíveis (ALVES *et al.*, 2013; CHASE *et al.*, 2004; SHEU; BABBAR, 1996). A capacidade do sistema é o número máximo de usuários, tanto aqueles sendo atendidos quanto aqueles na(s) fila(s),

permitidos no estabelecimento de prestação de serviços ao mesmo tempo (LIU, 2009; SILVA *et al.*, 2006). Um sistema que não possui limite no número permitido de usuários no estabelecimento é considerado com capacidade infinita (ANDRADE, 2002). A suposição de uma fila infinita é o padrão para a maioria dos modelos de fila, mesmo para situações em que na verdade exista um limite superior finito (relativamente grande) no número permissível de clientes, uma vez que tratar com um limite superior seria um fator de complicação na análise (LIU, 2009; GROSS *et al.*, 2008).

A disciplina na fila é a ordem na qual os usuários são atendidos (FOGLIATTI; MATTOS, 2007). Essa ordem pode ser (TAHA, 2008): a) FIFO (*first in first out*): o primeiro a entrar na fila é o primeiro a ser atendido; b) LIFO (*last in first out*): o último a entrar na fila é o primeiro a ser atendido; c) SIRO (*served in random order*): a ordem no atendimento é escolhida de maneira aleatória; e d) PRI (*priority*): estipula-se uma prioridade de atendimento. Em uma fila, um cliente pode agir de três formas diferentes (XU *et al.*, 2007; BLACKBURN, 1972): a) deixar o local; b) entrar na fila, mas deixar após uma certa quantidade de tempo; e c) esperar na fila até que o serviço seja realizado.

A teoria das filas tem sido aplicada em diversas áreas do conhecimento como aeroportos (LANGE *et al.*, 2013), bancos (CHOWDHURY, 2013), hospitais (VANBERKEL *et al.*, 2014), empresas químicas (KALLRATH *et al.*, 2017), sistemas computacionais (WEN *et al.*, 2014; VILAPLANA *et al.*, 2014; FEDORENKO *et al.*, 2017), cadeia de suprimentos (SEYEDHOSEINI *et al.*, 2015), controle de inventário (RASHID *et al.*, 2015). Já no setor de transporte a Teoria das Filas vem sendo utilizada para o controle inteligente do sistema de tráfego que envolve semáforos (ZHAO *et al.*, 2016), no planejamento e controle do sistema de logística (LIMA *et al.*, 2015) e na logística reversa (KARAMOUZIAN *et al.*, 2011; DEMIREL; GOKÇEN, 2008; KRIS; NICO, 2007; VORASAYAN; RYAN, 2006; BAYINDIR *et al.*, 2003; KETZEMBERG; SOUZA, 2003).

Diversos estudos na área de transportes foram desenvolvidos para estudar como as filas se formam e geram os congestionamentos (JIANG; CHENG, 2016; HSU; ZHANG, 2014; ANDERSON, 2014; SHAN; LIU, 2014; YIN, 2014; WNAG *et al.*, 2013; KERNER, 2013 ). Guerrouahane *et al.* (2016) apresentam um modelo estocástico de filas para o tráfego rodoviário, a fim de estudar as relações estacionárias de densidade-fluxo em condições de congestionamento. O modelo desenvolvido pelos autores baseia-se no modelo de filas dependentes do estado M/g/c/c. Nagatani (2014)

estudou a formação de congestionamentos em uma praça de pedágio através de um modelo estocástico para filas. O autor relata que os congestionamentos são gerados principalmente pelo aumento do número de veículos que chegam à praça de pedágio e que o crescimento das filas não depende da probabilidade de escolha do motorista em relação a qual faixa ele vai se direcionar.

A simulação teve grande expansão nas últimas quatro décadas, ganhando contorno científico bem definido em congressos e periódicos especializados no assunto (RANGEL *et al.*, 2012). A simulação tem sido uma técnica utilizada para auxiliar processos de tomada de decisão, abrangendo decisões de investimento em infraestrutura e na melhoria de operações, entre outras (PRAIA; GOMES, 2015). Desde a sua criação, a simulação foi aplicada a diversos setores, tais como indústria, serviços, defesa, saúde e serviços públicos (JAHANGIRIAN *et al.*, 2010; PORTUGAL, 2005).

A simulação é uma técnica que pode ser aplicada tanto para projeto e avaliação de novos sistemas, como para reconfiguração física ou mudanças no controle e/ou regras de operação de sistemas existentes. A grande variedade de *softwares* de simulação disponíveis no mercado, alguns específicos para determinados processos, outros de caráter mais generalista, favorecem a aplicação da simulação de uma forma geral (SAKURADA; MIYAKE, 2009). Para Rosa e Luz (2012) a simulação é uma ferramenta que possibilita estimar o comportamento de um modelo de sistema discreto, contínuo ou misto de operação, com um determinado nível de detalhamento, por meio da sua modelagem lógico-matemática como observado na Figura 5.

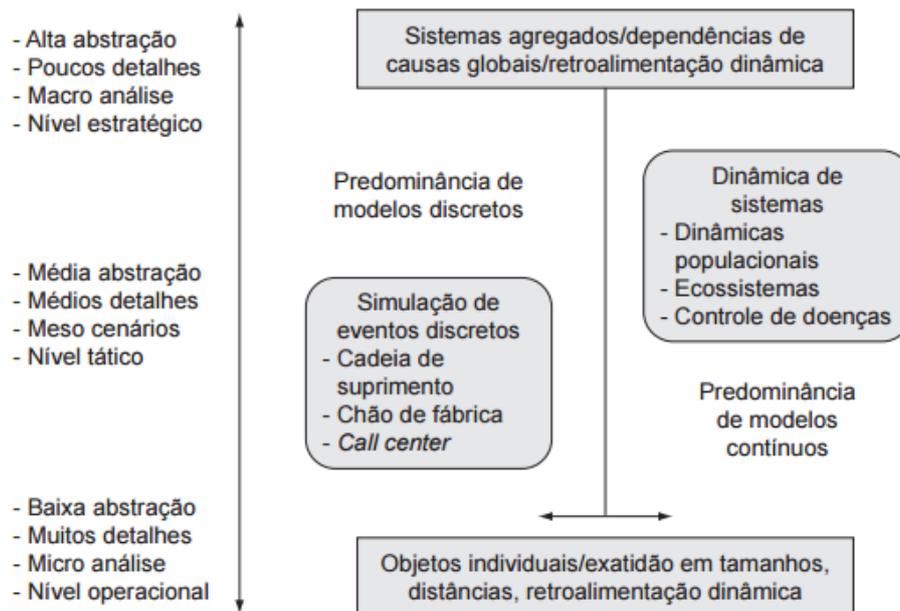


Figura 5 - Abordagens de simulação e níveis de detalhamento  
 Fonte: Adaptado Borshchev e Filippov (2004)

A principal vantagem da simulação é poder manipular condições de operações das entidades modeladas quando, na prática, seriam muito difíceis de serem realizadas, devido às limitações de naturezas diversas. Além de reduzir prejuízos causados por investimentos contestáveis, a simulação permite reduzir o tempo de observação dos efeitos de decisões, visto que, com o auxílio do computador, pode-se simular em alguns minutos o comportamento de um processo ou sistema real (ROSA; LUZ, 2012; PRAIA; GOMES, 2015).

Para Montevechi *et al.* (2007) há três etapas que devem ser realizados em um estudo de simulação: o modelo conceitual, o modelo computadorizado e o modelo operacional. De acordo com a Law (1991), a fase de criação do modelo conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação. Chwif e Medina (2006) dedicam atenção especial a este modelo, uma vez que, segundo eles, muitas pesquisas de simulação não demonstram esta fase. De acordo com Shannon (1975), um modelo conceitual eficaz pode levar à identificação de uma solução adequada, evitando a necessidade de um estudo completo de simulação. Obras como Greasley (2006) usam o mapeamento de processos como forma de descrever a lógica e determinar os pontos de decisão, antes mesmo de o modelo de computador, criado na área de *software*. O modelo proposto por Montevechi *et al.* (2007) encontra-se exposto na Figura 6.

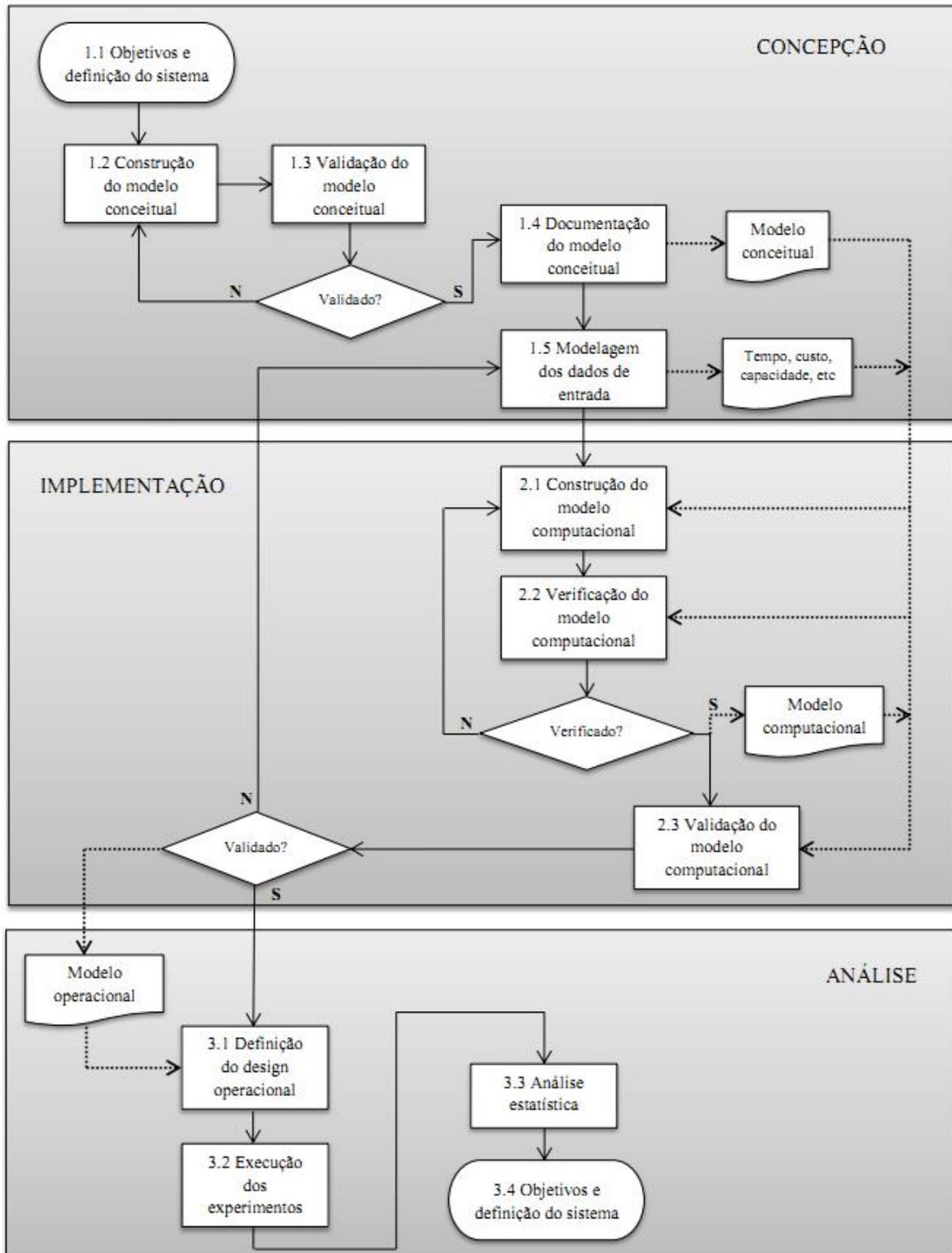


Figura 6 - Sequências de passos para um projeto de simulação  
 Fonte: Montevechi *et al.* (2007)

A simulação pode ser aplicada em diversas áreas, destacando: sistemas computacionais (SHUANGSHUANG *et al.*, 2016; SAMUTHIRA *et al.*, 2016; ABDELKADER *et al.*, 2016), logística (KHALEGHI *et al.*, 2016; SUYABATMAZ *et*

*al.*, 2014; BOTTANI; MONTANARI, 2010), medicina (SANTALUCIA *et al.*, 2015; ABUKHOUSA *et al.*, 2014; MCGAGHIE *et al.*, 2010; ISSEMBERG *et al.*, 2005); educação (CLAPPER, 2016; HARVIAINEN, 2016; KORTELING *et al.*, 2016) etc.

### 2.2.1 Simulação de tráfego

De acordo com Hoogendoorn e Bovy (2001) as aplicações da teoria da simulação de tráfego são amplas, entre elas estão:

- a) Avaliação de tratamentos alternativos em gestão de tráfego;
- b) Concepção e ensaio de novas vias;
- c) Modelos de fluxo operacional servindo como um sub-módulo em outras ferramentas (por exemplo, baseados em modelos de controle de tráfego e otimização e atribuição de tráfego dinâmico);
- d) Formação de gestores de tráfego.

O nível de agregação com que o tráfego é tratado na modelagem define características e propriedades importantes que repercutem na aplicação prática dos modelos (CHOWDHURY *et al.*, 2000), sendo o seu nível de detalhamento classificado como macroscópicos, microscópicos e mesoscópicos (VILARINHO, 2008). Os modelos macroscópicos consideram o tráfego como um todo, não fazendo distinção entre as partes que o compõe. Os estados de tráfego são determinados pela análise integrada das correntes de tráfego e as relações entre as variáveis: fluxo, densidade e velocidade (VILARINHO, 2008; CHAKROBORTY, 2006; LIGHTHILL; WHITHAM, 1955). O modelo macroscópico tem um nível baixo de detalhes, pois não considera as entidades de tráfego individualmente e o descreve com alto nível de agregação não sendo feita a distinção das suas partes integrantes, como pelotões e veículos. Esses modelos não consideram, por exemplo, ações como mudança de faixa (VASCONCELOS, 2004; HOOGENDOORN; BOVY, 2001).

Ao contrário dos modelos macroscópicos, os modelos microscópicos, ou microsimulação, não fazem uma modelagem com agregação dos elementos constituintes, mas sim por agentes no qual são simuladas as ações e interações de indivíduos autônomos com o objetivo de compreender o efeito dos seus comportamentos no sistema em geral. O sistema de interesse é simulado capturando o comportamento dos agentes individuais, ou seja, os indivíduos, e as suas interligações (CORREIA, 2011; BURGHOUT, 2005). A construção de um modelo microscópico deve conter todas as características físicas relevantes do sistema viário a ser estudado

como limites de velocidade, plano de transporte público, sinalização e outras características que afetem o fluxo de tráfego, como faixas de pedestres e pontos de ônibus (MORRIS; SYKES, 2005).

Os modelos mesoscópicos possuem características intermediárias entre os modelos macro e microscópicos descritos anteriormente. Eles descrevem as entidades de tráfego com alto nível de detalhes, mas as suas interações e comportamentos são menos detalhadas (VILARINHO, 2008; BURGHOUT, 2005). Estes modelos fazem uma aproximação ao comportamento individual de cada veículo, ou grupos de veículos – pelotões, mas associando-lhes as leis fundamentais dos modelos macro, especificando também os comportamentos dos indivíduos (veículos) (HOOGENDOORN; BOVY, 2001; VASCONCELOS, 2004). A abordagem mesoscópica provê uma forma de traduzir o comportamento micro para o macro (ARIOTTI, 2010; TAMPERE; AREM, 2001).

A simulação vem sendo amplamente utilizada na área de transportes (BANAEI; ALIZADEH, 2016; ALI *et al.*, 2015; GRAMAGLIA *et al.*, 2014; CARLSON *et al.*, 2011). O trabalho desenvolvido por Steffens *et al.* (2014) usa o modelo LES (*Large-Eddy Simulation*) para investigar como as estruturas de fluxo tem impactado nas características de rodovias e na qualidade do ar e quais as medidas podem ser tomadas para reduzir a poluição. Rossetti e Ni (2010) apresentaram um método de simulação microscópica para analisar a melhor maneira de realizar evacuações, de grande escala, em um estacionamento dentro de um distrito comercial em caso de emergência. Carlson *et al.* (2011) utilizam o *software* de simulação macroscópico METANET para gerenciar o trânsito de uma autoestrada e demonstrar sua eficiência através de sofisticados métodos de controle ótimos.

Já Mehar *et al.* (2014b) utilizam o *software* de microsimulação VISSIM para analisar a capacidade de autoestradas na Índia. Nesses trabalhos não foi observado um projeto de simulação como o especificado por Montevechi *et al.* (2007) apenas algumas etapas como: a coleta de dados, a calibração do modelo e a validação do modelo computacional.

### **2.3 Concessões rodoviárias**

No Brasil, o marco fundamental para a expansão rodoviária ocorreu após a década de 1930. Este marco se dá pelo Decreto 8.463, de 27 de dezembro de 1945, que instituiu o Fundo Rodoviário Nacional (FRN), iniciando um processo bem-sucedido de

financiamento público em infraestrutura (PARANAÍBA; FORTES, 2014; CASTRO 1999). Apesar da expansão histórica da malha rodoviária, o investimento do governo na manutenção e expansão da infraestrutura rodoviária foi reduzido, o que levou os estados a contraírem dívidas para manter a malha rodoviária (PARANAÍBA; FORTES, 2014).

Devido aos gastos excessivos os estados reduziram o investimento, o que levou à deterioração e precarização do sistema de transporte nas vias públicas, pois o país, que tradicionalmente utiliza intensamente o modal rodoviário, encontrava-se diante de um apagão logístico (MACHADO, 2005). Para buscar uma solução, surgiu à possibilidade de investimentos privados através das Parcerias Público-Privadas (PPP) e, assim, foi implantado o Programa de Concessões de Rodovias (PARANAÍBA; FORTES, 2014).

A matriz de transportes de cargas e pessoas no Brasil está concentrada no modal rodoviário, o qual, em 2014, respondeu por 61,1% do total dos modais utilizados no país. Completando esta lista o modal ferroviário com 20,7%, aquaviário com 13,6% e o aeroaviário com 0,4%, segundo dados da Confederação Nacional do Transporte - CNT (2010). O transporte rodoviário encontra-se com uma estrutura inadequada para suportar a demanda exigida e, devido a esse quadro, as parcerias entre os setores público e privado ganharam força (SOARES; NETO, 2006).

No Brasil, em 1996, foi publicada a Lei nº 9.277/96, que possibilitou a União delegar suas rodovias por até vinte e cinco anos aos estados, municípios e Distrito Federal para que eles pudessem incluí-las em seus programas de concessão (BRASIL, 2015). Segundo Kohama (2006) a concessão é a autorização de exploração de serviço público dada à iniciativa privada. É formalizada por meio de contrato. Ambas as partes possuem direitos e obrigações contratuais. Normalmente, o prazo de concessão varia entre 20 e 30 anos. O contrato pode ser rompido quando uma das partes não cumpre suas obrigações (GASTARDELO *et al.*, 2012).

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2010), a condição básica para concessão é o equilíbrio financeiro para prestador do serviço e consumidor. Esses programas de concessões rodoviárias envolvem a instalação de praças de arrecadação de pedágio, uma vez que a remuneração das empresas responsáveis pela operação das rodovias privatizadas é feita através da cobrança de tarifas dos usuários (ARAÚJO; SETTI, 2006).

### 2.3.1 Praça de pedágio

O pedágio rodoviário é uma intervenção física instalada na rodovia que restringe o direito de passagem mediante pagamento de tributo ao poder público ou à concessionária privada (ALVARENGA *et al.*, 2006). De acordo com Dubedi *et al.* (2012) a praça de pedágio é uma estrutura construída em uma estrada em que o veículo tem que pagar um pedágio. Para isso este tem de parar ou desacelerar. Uma praça de pedágio pode ser definida como a área onde o pedágio é cobrado, sendo que esta tem início onde a estrada se alarga o suficiente para que sejam instalados quantos postos de cobrança sejam necessários para o atendimento da demanda do tráfego, continuando pelas ilhas de cobrança e terminando onde a rodovia volta à sua largura original (SCHAUFLENER, 1997).

Segundo dados do Relatório Anual da Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias - ABCR (2013), existem 283 pontos de cobrança de pedágio distribuídos entre 57 concessionárias associadas e que juntas tiveram um fluxo de 1.671.479.072 veículos passando pelas cabines de pedágio. A Figura 7 apresenta uma imagem aérea da praça de pedágio localizada na cidade de Vargem – SP.



Figura 7 - Vista aérea da praça de pedágio de Vargem (São Paulo)  
Fonte: Costa, Bragança-Jornal Diário (2012)

Cada praça de pedágio possui características únicas, definidas de acordo com as particularidades do tráfego que por ela passa e do tipo da via na qual é implantada. As praças de pedágio se diferenciam em função das características de sua operação que incluem: (i) forma de cobrança, (ii) localização dentro do sistema viário e (iii) *layout* (FARIA; CAMPOS, 2012).

A forma de cobrança pode ocorrer de três maneiras: manual, eletrônica e automática. Entende-se por cobrança manual aquela em que o veículo tem que parar na cabine de cobrança onde ocorrerá uma interação entre o usuário e o operador de caixa para realizar a transação (TIEFENSEE, 2005). Já a eletrônica é um sistema em que uma antena identifica automaticamente o veículo (AVI) equipado com uma etiqueta ou com um transponder quando este se aproxima da praça (AL-DEEK *et al.*, 1996; 1997; ZARRILLO *et al.*, 1997). Desta forma, o sistema debita o valor da tarifa correspondente ao veículo (FARIA; CAMPOS, 2012). Essa forma de cobrança é amplamente reconhecida como uma aplicação bem sucedida de sistemas de transporte inteligente, trazendo inúmeros benefícios, tais como: menor tempo de transação, melhor rendimento e redução da poluição atmosférica e do consumo de combustível (DUBEDI *et al.*, 2012; VENIGALLA; KRIMMER, 2006; COELHO *et al.*, 2005; LI *et al.*, 1999; HENSHER, 1991). A cobrança automática consiste no pagamento da tarifa em máquinas automáticas de moedas. O usuário se aproxima da cabine e, em vez de interagir com o arrecadador, insere quantas moedas sejam necessárias para efetuar o pagamento (FARIA; CAMPOS, 2012).

Sob o ponto de vista da engenharia de tráfego, a cobrança de pedágio geralmente atua como um gargalo ao fluxo nas rodovias, uma vez que a capacidade das praças costuma ser menor do que a capacidade das rodovias onde estas praças estão inseridas (OBELHEIRO *et al.*, 2010). De acordo com Araújo (2001) essas paradas impedem o fluxo contínuo do tráfego, aumentam o tempo total de viagem e potencialmente podem reduzir o nível de serviço na rodovia.

Harb *et al.* (2010) citam que, em 2006, o Orlando Orange County Expressway Authority (OOCEA), empresa responsável pela concessão de algumas rodovias em Orlando, revelou que a média anual de veículos em sua praça de pedágio mais movimentada era superior a 125.000 veículos. O OOCEA também estimou que em condições de pico de 60 a 70% dos usuários fazem uso de transponder eletrônicos para pagar o pedágio. Isto significa que 30 a 40% de todo o tráfego que passa nas praças de pedágio devem fazer uma parada completa para pagar o pedágio.

Os estudos sobre praças de pedágio evoluíram com o tempo, sendo seus enfoques voltados à avaliação do processamento de veículos (capacidades de atendimento), otimização de mão-de-obra para a coleta manual e avaliação do impacto da implantação de sistemas eletrônicos de pedagiamento (OLIVEIRA, 2004). Como testes de configuração de praças de pedágio no campo são dispendiosos, esses estudos

geralmente são baseados em modelos de simulação. Os *softwares* TPASS (REDDING; JUNGA, 1992), TPSIM (AL-DEEK *et al.*, 2005; GORDON, 2004; KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002a), SHAKER (SCHMITT, 2003) e TNCC (ZARRILLO *et al.*, 2002) são alguns exemplos para análise de praças de pedágio, utilizados por alguns pesquisadores. Outros estudos empregaram o VISSIM e PARAMICS para simular e investigar operações em instalações de pedágio (NEZAMUDDIN, 2005; CEBALLOS; CURTIS, 2003).

Russo *et al.* (2010) desenvolveram um estudo em praças de pedágio na Flórida através de um *software* de microsimulação voltado a eventos discretos denominado TPASS. Os autores buscaram estimar a capacidade de quatro diferentes praças de pedágio utilizando o modelo SHAKER de filas e levantando informações como demanda, rendimento, períodos de filas, entre outros. O modelo foi calibrado e sua validação se deu pela comparação com dados reais.

Os autores Harb *et al.* (2010) citam que vários pesquisadores indicaram que o tempo de processamento no pedágio (ou tempo de serviço) é o parâmetro chave mais significativo na calibração de praças de pedágio simuladas e uma das variáveis centrais que afetam a sua capacidade de faixa-faixa. Por isso, eles analisaram os efeitos de vários fatores nos tempos de serviço incluindo características de trânsito, características do veículo e características da praça de pedágio. Para essa análise os autores utilizaram o modelo de probabilidades aumentadas de regressão adaptativa multivariada (MARS) e os resultados mostraram que as tarifas inexatas e grandes demandas aumentam o tempo de processamento.

Spiliopoulou *et al.* (2010) analisaram a formação de congestionamentos quando o fluxo total que deixa as cabines de pedágio excede a capacidade das estradas a sua jusante. Para isso, eles propõem a utilização de um algoritmo conhecido a partir de operações de medição de rampa locais (ALINEA). Esse algoritmo se mostrou promissor para esse tipo de análise como relatado pelos autores.

Diversos estudos sobre poluição do ar em praças de pedágio também foram conduzidos (SHIH *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2007; DIAB *et al.*, 2005; TSAI *et al.*, 2002, 2004). He *et al.* (2011) citam que a saúde dos trabalhadores de pedágio está seriamente ameaçada pela exposição a longo prazo ao ar poluído devido aos gases que saem do escapamento dos veículos. Usando dados de tráfego coletados em uma praça de pedágio, esses mesmos autores simularam os movimentos de veículos através de um

modelo de dinâmica de sistema com diferentes volumes de tráfegos e procedimentos de cobrança de pedágio. Isso permitiu calcular o tempo médio de viagem dos veículos.

A capacidade de uma praça de pedágio está diretamente relacionada aos tempos de atendimento dos veículos nas cabines, que por sua vez dependem de fatores como a intensidade do fluxo (OLIVEIRA *et al.*, 2003; WOO; HOEL, 1991), a composição do fluxo (ARAÚJO; SETTI, 2006; OLIVEIRA, 2004), valor da tarifa (ARAÚJO; SETTI, 2006), forma de pagamento (ARAÚJO; SETTI, 2006; OLIVEIRA, 2004), que são considerados fatores operacionais. Fatores considerados humanos, como o perfil do motorista e dos arrecadadores (ARAÚJO; SETTI, 2006), também podem influenciar na capacidade de uma praça de pedágio.

#### 2.3.1.1 Fatores humanos e capacidade de atendimento

De acordo com Oliveira (2004), quanto maior for o envolvimento humano no processo de pagamento de pedágios, maior será o tempo de atendimento dos veículos. Em todas as etapas existem fatores intervenientes nos tempos de atendimento nas cabines de pedágio. Dentre estes fatores deve-se ressaltar àqueles que envolvem a presença humana, chamado de fatores humanos. Esses fatores podem ser em relação aos arrecadadores ou aos motoristas dos veículos.

Os motoristas dos veículos podem influenciar os tempos de atendimento na medida em que apresentam diferentes características. Eles podem ser classificados como usuários frequentes e não-frequentes e por características comportamentais, que abordam como ele conduz o veículo (aceleração, desaceleração, troca de faixas e demais reações que um condutor pode apresentar).

Já os arrecadadores podem se sentir pressionados a realizarem os atendimentos de forma mais rápida devido às elevadas taxas de chegadas e aumento no fluxo de veículos na praça de pedágio (OLIVEIRA *et al.*; 2003; ARAÚJO, 2001; WOO; HOEL, 1991; EDIE, 1954).

#### 2.3.1.2 Fatores operacionais e capacidade de atendimento

Oliveira (2004) cita que alguns fatores relacionados ao processo de cobrança e que interferem nos tempos de atendimento nas cabines podem ser: (i) diferentes formas de pagamentos de tarifas, (ii) categorias de veículos, (iii) valores de tarifas, (iv) características geométricas de construção das praças de pedágio, (v) período do dia e condições meteorológicas, (vi) intensidade de fluxo de tráfego, entre outros aspectos.

Ou seja, vários fatores podem influenciar o tempo de atendimento de uma praça de pedágio.

Tais fatores podem ser verificados em alguns estudos realizados, tais como o de McDonald e Stammer (2001) que descrevem a influência da geometria da praça no tempo de atendimento. Já Zarrillo (2000) relaciona o tempo de atendimento com os métodos de cobrança (manual, eletrônica, automática ou mista) e as variações causadas por diversos fatores em cada modalidade. No trabalho desenvolvido por Woo e Hoel (1991) e por Klodzinski e Al-Deek (2002a), a forma de pagamento realizada pelo usuário, seja com cheque, cartão, dinheiro ou outro meio, bem como o valor da tarifa e a necessidade de retornar troco são confirmadas como influenciadores do tempo de atendimento.

Outro fator que influencia é a categoria do veículo a ser atendido, já que veículos pesados geralmente são mais lentos e com taxas de aceleração menores. Alguns estudos consideram a existência de cabines exclusivas para veículos pesados (ZARRILLO, 2000; WOO; HOEL, 1991; ZARRILLO *et al.*, 1997).

#### 2.3.1.3 Classificação dos veículos

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) os veículos podem ser categorizados conforme a quantidade de eixos que possuem e a presença de eixo duplo, conforme exposto na Figura 8. É com base na categoria de cada veículo que é utilizado o fator multiplicador para calcular a tarifa a ser paga por cada veículo.

Categoria	Descrição	Nº de Eixos	Fator Multiplicador	Rodagem	Esquema Ilustrativo
1	Automóvel, caminhonete e furgão	2	1,00		
2	Caminhão leve, ônibus, caminhão-tractor e furgão	2	2,00		
3	Automóvel e caminhonete com semi-reboque	3	1,50		
4	Caminhão, caminhão-tractor, caminhão-tractor com semi-reboque e ônibus	3	3,00		
5	Automóvel e caminhonete com reboque	4	2,00		
6	Caminhão com reboque e caminhão-tractor com semi-reboque	4	4,00		
7	Caminhão com reboque e caminhão-tractor com semi-reboque	5	5,00		
8	Caminhão com reboque e caminhão-tractor com semi-reboque	6	6,00		
9	Motocicletas, motonetas e bicicletas moto	2	0,50	simples	

Figura 8 - Categoria dos veículos segundo a ANTT  
 FONTE: Relatório Anual ANTT (2012)

Através da Figura 8 verifica-se que existem nove categorias para os veículos, variando de dois até seis eixos, e que a rodagem pode ser simples ou dupla.

## 2.4 Níveis de serviço

A avaliação da qualidade de bens de consumo, que são tangíveis, pode ser realizada por meio de indicadores objetivos como desempenho, características, manutenibilidade, durabilidade etc. Porém, a qualidade em serviço é algo intangível e a definição de qualidade em serviço define-se em termos de subjetividade, atitude e percepção (LEAL, 2003; CUKIER; COSTA, 2013). De acordo com Zeithaml e Bitner (2003, p. 28) “serviços são atos, processos e performances, como também todas as atividades econômicas, cujo produto não é físico ou construído”. Os serviços são

consumidos na hora em que são produzidos, seu consumo ocorre no mesmo instante em que são produzidos e são variáveis. Os serviços são dedicados a quem os compra (FITZSIMMONS; FITZSIMMONS, 2014; NOGUEIRA; LAS CASAS, 2009; KOTLER; KELLER, 2006).

Las Casas (2007, p.121) explica que “a prestação de serviços é alicerçada no desempenho humano, e prestar bons serviços depende da qualidade deste desempenho”. Para Grönroos (2003), o sucesso do marketing de relacionamento depende imensamente das atitudes, do compromisso e do desempenho dos funcionários (NOGUEIRA; LAS CASAS, 2009). As avaliações da qualidade não dependem apenas do resultado final do serviço, mas também do processo da prestação do serviço (CUKIER; COSTA, 2013).

Na indústria do serviço, a qualidade proporciona o alcance de vantagem competitiva (ALI *et al.*, 2016; DOS SANTOS, 2014; EBERLE, 2009; FITZSIMMONS E FITZSIMMONS, 2005; RAMOS, 2015). Entretanto, essa “qualidade” só será percebida se estiver condizente com o conceito de qualidade destes clientes, ou seja, que esta lhes pareça atrativa e adequada às suas expectativas e necessidades (MATOS, 2000; MENEZES, 2012).

Através de entrevistas de grupo e investigação empírica, Parasuraman *et al.* (1993) investigaram e determinaram dez determinantes na avaliação dos clientes a respeito da qualidade do serviço, formando o chamado ServQual. A lista inclui confiabilidade, responsabilidade, competência, acesso, cortesia, comunicação, credibilidade, segurança, compreensão e tangibilidade. Para Martins e Laugeni (2005, p.533), pode-se medir a qualidade dos serviços por meio de três facetas: a) medidas objetivas, tais como: tempo de resposta do serviço, tempo de execução, quantidade de reclamações dos clientes, solicitações por cliente, quantidade de erros; b) indicadores de qualidade; c) itens em áreas administrativas, como: disponibilidade; atenciosidade (tempo de reação frente à solicitação do cliente); tempo de atendimento; completibilidade (nível de conclusão do serviço total ou parcial) e tecnicidade (grau de profissionalismo na relação com o cliente).

Garvin (1992), em uma abordagem estratégica da qualidade, propõe oito dimensões para avaliar a qualidade dos serviços prestados: desempenho, características, confiabilidade, conformidade, durabilidade, atendimento, estética e qualidade percebida. Para Matos (2000), a velocidade de atendimento demonstra a prontidão da organização e de seus atendentes na prestação do serviço. Já o pacote de serviços proposto por Fitzsimmons e Fitzsimmons (2014) contém um conjunto de cinco características pelos

quais um serviço pode ser avaliado: instalações de apoio; bens facilitadores; informações; serviços explícitos e serviços implícitos.

#### 2.4.1 Nível de serviços em praças de pedágio

A capacidade e o nível de serviço (*Level of Service* - LOS) das instalações de pedágio ainda não foram formalmente abordados no *Highway Capacity Manual* – HCM (2000) (KITTELSON; ROESS, 2001; KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002a). O HCM (2000) reconhece este fato e afirma que deve ser dada especial atenção às características únicas, restrições e atrasos causados por estas instalações de cobrança de portagem. Devido à considerável interrupção do fluxo de tráfego, o segmento com praça de pedágio não pode ser avaliado como um segmento normal de rodovia.

Alguns autores sugerem uma analogia entre praças de pedágios e intersecções semaforizadas. Porém, estas estruturas não podem ser avaliadas da mesma forma (KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002b). O atraso em intersecções semaforizadas é resultante da ação de um semáforo automatizado. O atraso em uma cabine de pedágio é resultante da transação de pagamento e influenciado por vários fatores (KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002c) como valor da tarifa, forma de pagamento, fluxo e classes de veículos e também da atuação de arrecadadores e motoristas (OLIVEIRA, 2004; ARAÚJO, 2001).

Segundo Obelheiro *et al.* (2011) não existe um método consagrado para a avaliação de níveis de serviço em praças de pedágio, sendo que alguns estudos vêm sendo realizados sobre o tema. Alguns indicadores utilizados na literatura são tempos de espera em filas (KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002b), tamanhos de filas (OLIVEIRA, 2009; VAN DIJK *et al.*, 1999) e relação volume-capacidade (AL-DEEK; RADWAN, 1995; WOO; HOEL, 1991). Além disso, escalas de níveis de serviço em praças de pedágio também foram propostas tendo por base diferentes indicadores de desempenho (OLIVEIRA, 2009; KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002b; LIN; SU, 1994; WOO; HOEL, 1991).

Woo e Hoel (1991) correlacionaram estatisticamente a relação volume-capacidade com a densidade nas áreas de chegada e saída das praças. Já a escala proposta por Lin e Su (1994) utiliza o comprimento médio de fila nas cabines e o tempo médio no sistema como indicadores de desempenho. Klodzinski e Al-Deek (2002a) utilizaram como indicador o atraso individual sofrido por motoristas para a travessia do trecho com praça de pedágio e o método proposto por Oliveira (2009) é baseado na

percepção de usuários acerca da qualidade do tráfego em praças de pedágio. Cada praça de pedágio possui características próprias, desde a sua geometria, passando pelo seu dimensionamento até o perfil do usuário. Portanto, para compreender e aperfeiçoar os serviços prestados é importante conhecer os fatores que podem influenciar na capacidade de atendimento manual da praça de pedágio (ARDEKANI; TORRES, 1991).

Vários estudos apontam a importância de analisar praças de pedágio e suas características a fim de garantir um serviço de qualidade (KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002b, 2002c; AL-DEEK, 2001; LIN, 2001; ZARRILLO, 1998; ZARRILLO *et al.*, 1997; AL-DEEK *et al.*, 1997; POLUS, 1996; GULEWICZ; DANKO, 1995; AL-DEEK; RADWAN, 1995; LIN; SU, 1994; MORTON; LAM, 1994; WOO; HOEL, 1991; WANISUBUT, 1989).

Para Lin e Su (1994) a capacidade de uma cabine de pedágio pode ser definida como o fluxo máximo de veículos que pode atravessar uma cabine por hora, de acordo com as condições predominantes de tráfego e da via. A capacidade está diretamente relacionada aos tempos de atendimento dos veículos nas cabines, que por sua vez dependem de fatores como a intensidade do fluxo (WOO; HOEL, 1991; OLIVEIRA *et al.*, 2003), a composição do fluxo (ARAÚJO; SETTI, 2006; OLIVEIRA, 2004), valor da tarifa (ARAÚJO; SETTI, 2006), perfil do motorista (ARAÚJO; SETTI, 2006) e forma de pagamento (ARAÚJO; SETTI, 2006; OLIVEIRA, 2004).

A capacidade, a eficiência e o nível de serviço têm sido os critérios mais importantes na concepção de praças de pedágio (KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002b, c; TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1997). A exigência de estabilidade é uma consideração importante para a eficiência (VAN DIJK *et al.*, 1999; DANKO; GULEWICZ, 1991) e o comprimento médio da fila, bem como o tempo de espera no ponto de pedágio são considerados os parâmetros mais importantes que definem o nível de serviço das praças de pedágio (LIN, 2001; LIN; SU, 1994; WANISUBUT, 1989). Obelheiro *et al.* (2011) elaboraram uma escala com os níveis de serviço em praças de pedágio segundo diversos autores estudados conforme mostra a Figura 9.

Nível de Serviço	Woo e Hoel (1991)		Lin e Su (1994)		Klodzinski e Al-Deek (2002)	Oliveira (2009)
	Densidade (veic/milha/faixa)	Relação V/C	Comprimento de fila (L veic)	Tempo no sistema (T segundos/veic)	Atraso individual (T segundos/veic)	Nota do Cenário
A	$\leq 12$	0,24	$\leq 1$	$\leq 15$	$\leq 14$	$7 > N \geq 6$
B	$12 < D \leq 20$	0,40	$1 < L \leq 2$	$15 < T \leq 30$	$14 < T \leq 28$	$6 > N \geq 5$
C	$20 < D \leq 30$	0,57	$2 < L \leq 3$	$30 < T \leq 45$	$28 < T \leq 49$	$5 > N \geq 4$
D	$30 < D \leq 42$	0,74	$3 < L \leq 6$	$45 < T \leq 60$	$49 < T \leq 77$	$4 > N \geq 3$
E	$42 < D \leq 67$	1,00	$6 < L \leq 10$	$60 < T \leq 80$	$77 < T \leq 112$	$3 > N \geq 2$
F	$> 67$		$> 10$	$> 80$	$> 112$	$2 > N \geq 1$

Figura 9 - Escala de níveis de serviços em praças de pedágio

FONTE: Obelheiro *et al.* (2011)

De acordo com Oliveira (2009) os níveis de serviço, distribuídos hierarquicamente de “A” até “F” correspondiam, em estudos mais antigos, às descrições encontradas no HCM. Entretanto, estudos específicos sobre praças de pedágio tentaram traduzir o desconforto percebido pelos usuários quando sob ação de atrasos decorrentes das filas e paradas enfrentadas nestas instalações. Segundo o autor, as descrições das escalas de níveis de serviço em praças de pedágio para Woo e Hoel (1991), com acréscimo de informações de Zarrillo (1998) e Klodzinski e Al-Deek (2002a) são as seguintes:

- a) Nível de Serviço A: existe uma baixa densidade de tráfego e pouco atraso, sendo que o comportamento dos veículos não é afetado pela presença dos demais. Não há formação de filas e o nível geral de conforto é excelente, no qual a velocidade dos veículos somente é afetada pela geometria da praça. A maioria dos veículos que chegam não encontram veículos parados nas cabines, sendo atendidos de imediato e os tempos de atendimento dos veículos somente são afetados por suas preferências (tipo de pagamento, cabine). Não existem restrições à troca de faixas;
- b) Nível de Serviço B: os veículos começam a desacelerar mais cedo quando estão se aproximando da praça, o nível de conforto ainda é alto, porém menor do que no nível de serviço “A”. A presença de outros veículos no fluxo de tráfego começa a ser notada, entretanto, há boa oportunidade de mudança de faixa. Para este nível de serviço os motoristas podem vir a encontrar veículos formando filas nas cabines, há a possibilidade de trocas de faixas em busca de uma cabine desocupada sem maiores riscos. Há um aumento no número de veículos percebendo, pouco, mas algum atraso;
- c) Nível de Serviço C: o número de veículos parados é significativo, e filas começam a se formar. Há uma queda considerável de conforto neste nível de

serviço. Manobras ainda são possíveis, mas com grande grau de restrição, representando riscos. Há veículos sendo atendidos, e filas pequenas, em todas as cabines. Veículos, no final das filas, podem vir a interromper o fluxo em faixas adjacente;

- d) Nível de Serviço D: os veículos possuem pouca liberdade de manobra para escolha da cabine. O comprimento da fila se torna significativo e as condições de fluxo interrompido (*stop-and-go*) se tornam inevitáveis. As manobras são praticamente impossíveis, a densidade de tráfego começa a aumentar e o conforto de motoristas se apresenta pobre. Longos atrasos são uma influência combinada do aumento das taxas de chegadas, tempos de processamentos altos e ocupação das cabines de cobrança. Qualquer pequena interrupção no atendimento nas cabines pode causar extensas filas;
- e) Nível de Serviço E: todos os veículos enfrentam filas antes de chegar às cabines. O tráfego de fluxo interrompido (*stop-and-go*) é um fenômeno típico. Para este nível de serviço, não existem espaços para manobras nas aproximações das cabines, sendo necessário auxílio de outro veículo para a realização de trocas de faixa. A praça opera quase em sua capacidade máxima. As praças irão apresentar serviço pobre, altas taxas de chegadas e filas consideráveis nas cabines. Filas demoram a se dissipar;
- f) Nível de Serviço F: neste nível a taxa de chegada excede a taxa de atendimento. As filas continuam a crescer, avançando até alcançarem a rodovia. As filas continuam longas mesmo após o volume de tráfego na hora de pico ter diminuído. Este nível de serviço é inaceitável para a maioria dos motoristas, já que enfrentam grandes atrasos.

Assim, como podem ser verificados, diversos indicadores de desempenho podem ser utilizados para verificar a qualidade dos serviços de uma praça de pedágio. Alguns desses indicadores, bem como os autores que os propuseram, estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Indicadores de desempenho utilizados em praças de pedágio

<b>Estudos</b>	<b>Indicadores de desempenho</b>	<b>Forma de medição</b>
Woo e Hoel (1991)	Densidade; relação V/C	Agregado pra toda a praça
Lin e Su (1994)	Comprimento médio de fila; tempo médio no sistema	Comprimento por cabine (número de veículos); tempo individual por veículo (segundos)
Klodzinski e Al-Deek (2002)	Atraso	Individual por veículo (segundos)
Oliveira (2009)	Comprimento médio de fila	Comprimento por cabine (número de veículos)

FONTE: Obelheiro (2010)

De acordo com Juran e DeFeo (2015) o século XX foi o “século da produtividade” e o século XXI deve ficar conhecido como o “século da qualidade”. Dessa maneira, a qualidade deve ser vista como um esforço para diminuir os defeitos sustentando a visão de melhorias localizadas (PALADINI, 2005), mas para que isso aconteça é preciso monitorar o desempenho da organização e das atividades que ela executa.

### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

O trabalho, que tem como objetivo geral avaliar os níveis de serviço oferecidos em uma praça de pedágio rodoviário, possui abordagem quantitativa e foi realizado em duas fases principais, nas quais tiveram métodos distintos de análise: o planejamento de experimentos, do inglês *Design of Experiment* (DOE), e a modelagem e simulação. O método experimental visa determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que podem influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (GIL, 2007). A modelagem e simulação possibilita criar e experimentar um sistema físico através de um modelo matemático computadorizado.

Para a realização da simulação, foi utilizado o programa PTV VISSIM, que é uma parte de *software* para planejamento de transporte e engenharia de tráfego chamado PTV Vision. O VISSIM foi originalmente desenvolvido na Alemanha na Universidade de Karlsruhe no início de 1970 com base no trabalho contínuo de Wiedemann (MEHAR *et. al.*, 2014a; WIEDEMANN, 1999; WIEDEMANN, 1974). PTV VISSIM é desenvolvido pela PTV AG (*Planung Transport Verkehr Aktiengesellschaft*) e pode ser empregado no *design* de tráfego e avaliação (STANIC *et. al.*, 2011; GEISLER *et. al.*, 2012), na análise do fluxo de tráfego (CHO; KIM, 2012) e no controle de tráfego (STEVANOVIC *et. al.*, 2009; TETTAMANTI; VARGA, 2012). É competente para representar os diferentes cenários considerando o tráfego real e os parâmetros de simulação (CHEN *et. al.*, 2013; STEVANOVIC *et. al.*, 2013). O *software* é baseado em algoritmos de condução psicofísicas e pode refletir a realidade do problema com mais precisão (LU; LIU, 2013; STEVANOVIC *et. al.*, 2013; HUANG *et. al.*, 2013; PTV, 2011; TIANZI *et. al.*, 2004).

#### 3.1 Etapas de trabalho

O trabalho contou com várias etapas, dentre elas: a revisão da literatura; definição do objeto de estudo; a coleta de dados; o projeto de experimento e o projeto de simulação, conforme apresentado na Figura 10.

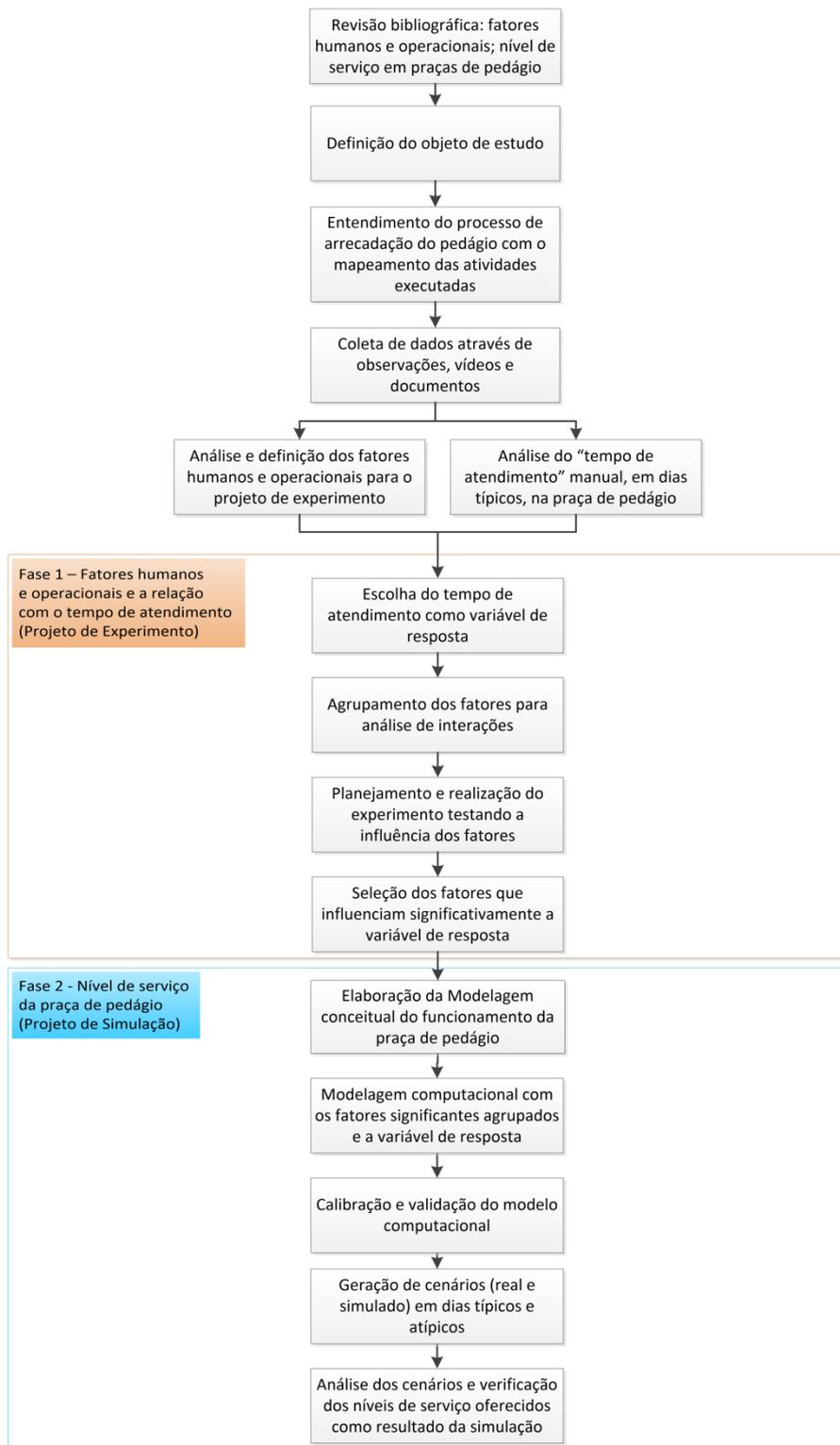


Figura 10 - Etapas da pesquisa

Como pode ser verificado na Figura 10, para dar início ao desenvolvimento da pesquisa foi necessário realizar uma revisão bibliográfica a cerca dos principais assuntos que nortearam o desenvolvimento da pesquisa como: quais os fatores,

humanos e operacionais, estão presentes em uma praça de pedágio e como a literatura aborda ou verifica o nível de serviço que as concessionárias estão oferecendo aos seus usuários. Após a análise dos conceitos, foi selecionado qual seria o objeto de estudo, tanto a concessionária quanto a praça de pedágio, e realizado o mapeado das atividades executadas pelo arrecadador e pelo motorista para esclarecer quais são as etapas do processo de cobrança manual da praça de pedágio estudada. A próxima etapa do desenvolvimento da pesquisa envolveu a coleta de dados realizada através de vídeos e documentos disponibilizados pela organização, bem como observações *in loco*. A coleta de dados permitiu definir quais os fatores humanos e operacionais seriam utilizados no projeto de experimentos e analisar o comportamento do “tempo de atendimento” manual, em dias típicos.

Todos os passos descritos anteriormente foram fundamentais para a realização das duas fases principais que contemplam o trabalho. Na primeira fase, que teve como objetivo verificar os fatores que influenciam na variável de resposta, utilizou-se o Projeto de experimentos (DOE), iniciando com a escolha do tempo de atendimento como variável de saída do experimento. Em seguida foram agrupados os fatores selecionados para o experimento a fim de garantir que todos possuíssem a mesma quantidade de níveis para analisar todas as relações entre os fatores. Os fatores que influenciam de maneira significativa a variável de resposta foram utilizados para avaliar o nível de serviço da praça de pedágio, a segunda fase principal da pesquisa.

A segunda fase da pesquisa teve início com a elaboração do modelo conceitual com as principais funções da praça de pedágio. Com base nesse modelo foi criado o modelo computacional com o auxílio de um *software* de microsimulação chamado PTV VISSIM, que foi calibrado e validado a fim de verificar se os resultados obtidos com a simulação estavam condizentes com a realidade. Validado o modelo computacional, foram gerados cenários, tanto para dias típicos quanto para dias atípicos, e analisados os níveis de serviço oferecidos pela concessionária em situações reais de funcionamento da praça de pedágio e em situações hipotéticas criadas pelo autor com base nos fatores que influenciam significativamente o tempo de atendimento.

## **4 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS PRIMÁRIOS**

Neste capítulo será abordada a coleta dos dados e uma análise preliminar destes dados. Será verificado como os fatores: a) forma de pagamento; b) categoria do veículo; c) necessidade de troco; d) sexo do arrecadador; e) turno de trabalho; e f) dia da semana tem influência no tempo de atendimento. Além disso, serão verificadas as principais características dos veículos que utilizam o pedágio e as características da praça.

### **4.1 Empresa concessionada (objeto de estudo)**

Uma das maiores companhias do setor de concessões de rodovias em quilômetros administrados, a empresa estudada está presente em cinco estados brasileiros, dentre eles São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, por meio de mais de seis concessionárias, sendo elas estaduais ou federais. A praça de pedágio estudada está situada em uma rodovia federal que possui mais de 500 km de extensão. A rodovia está localizada em um ponto estratégico, interligando duas importantes rodovias e as capitais de dois estados brasileiros. Estes estados são responsáveis por 41,3% do Produto Interno Bruto do Brasil (IBGE, 2013). Devido ao termo de sigilo solicitado pela concessionária, não será divulgado o nome da organização nem a sua localização exata.

O presente trabalho aborda apenas a cobrança manual da praça de pedágio. Nesse tipo de operação há uma interação entre o motorista e o arrecadador, no qual o motorista efetua o pagamento e o arrecadador executa algumas ações dependendo da forma de pagamento escolhida e do tipo de veículo.

Para elucidar as ações que o motorista e que o arrecadador executam, foi elaborado um mapeamento que mostra a sequência das atividades executadas, conforme observado na Figura 11. A elaboração do fluxograma ocorreu por meio de observações, por parte do pesquisador, de como o arrecadador realiza a cobrança do pedágio, juntamente com o procedimento padrão disponibilizado pela empresa. Não foi considerado apenas o procedimento padrão, visto que os arrecadadores tomam algumas ações que não estão padronizadas, mas que são executadas frequentemente, como por exemplo, separar troco para os veículos da categoria 1.

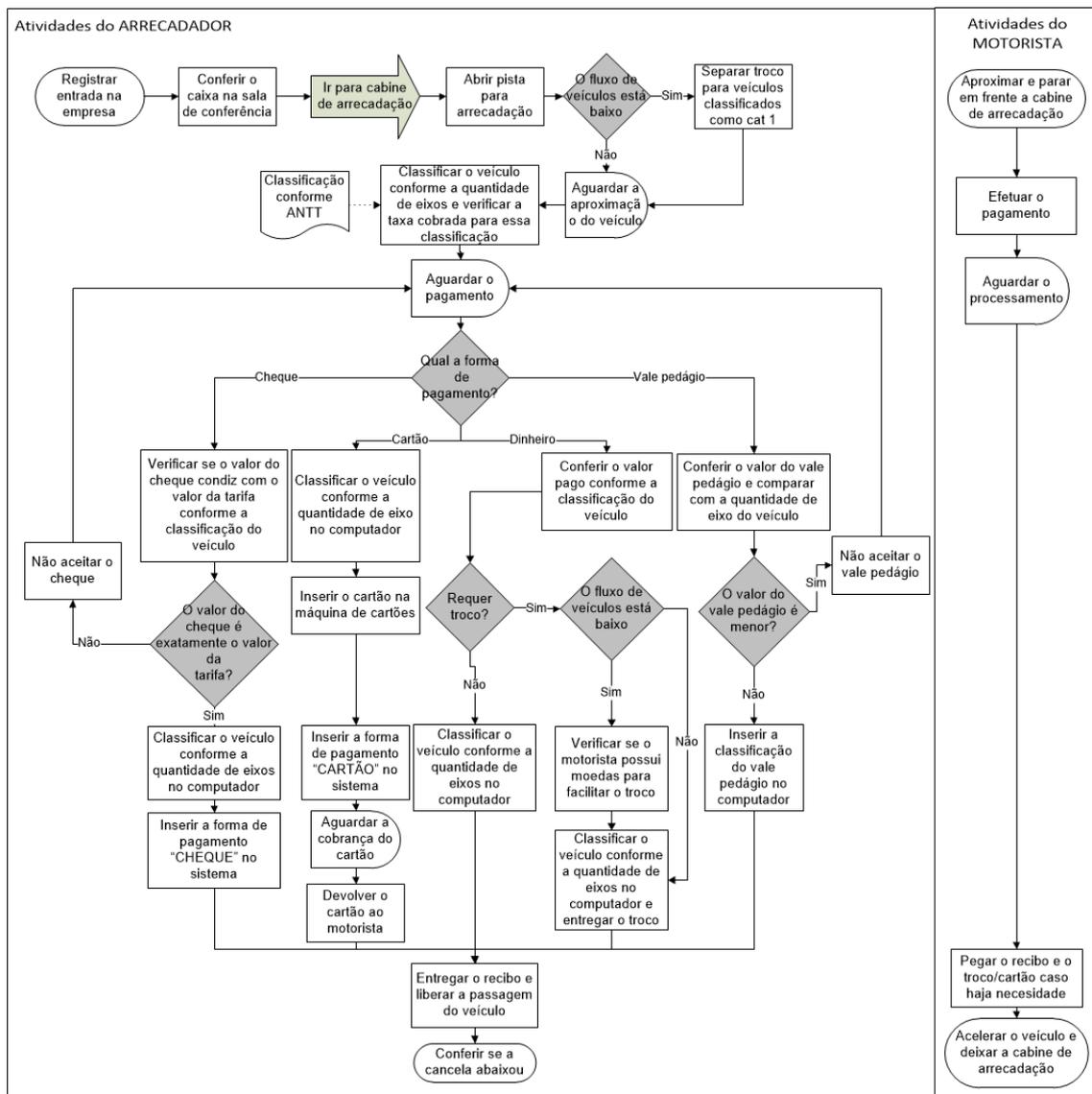


Figura 11 - Mapeamento das atividades executadas pelo arrecadador e pelo motorista

Como observado na Figura 11, às atividades do arrecadador, lado esquerdo da figura, envolvem o lançamento da categoria do veículo no sistema, cobrança da tarifa para este veículo, computar a forma de pagamento adotada pelo motorista, gerar o comprovante de pagamento e liberar a passagem do veículo. Já as atividades do motorista, lado direito da figura, se restringem em se aproximar da cabine de cobrança, realizar o pagamento e aguardar a liberação. Por meio da Figura 11 é possível verificar as categorizações que são feitas pelo arrecadador, tais como os tipos de veículos definidos na maioria das vezes pela quantidade de eixos, a forma de pagamento, etc.

## 4.2 Dimensão e discriminação da coleta de dados

A coleta dos dados foi iniciada no dia 7 de março de 2016 (segunda-feira) e finalizada no dia 13 de março de 2016 (domingo). Em cada dia da semana foram coletados dados durante 3h, sendo 1h em cada turno de trabalho. A coleta de dados ocorreu através da análise de vídeos disponibilizados pela empresa estudada.

Os dados de campo coletados são classificados em duas categorias: características do veículo e características da praça de pedágio. Os dados sobre as características do veículo envolviam a categoria do veículo, a forma de pagamento, necessidade de troco e o tempo de atendimento. Os dados da praça de pedágio coletados consistiram no sexo do arrecadador, no dia da semana e o turno que a praça foi observada.

Para a coleta de dados foram utilizados vídeos disponibilizados pela organização no qual é possível verificar a forma de pagamento, a categoria do veículo, se houve a necessidade de troco, o tempo decorrido no atendimento, o dia e o horário em que o vídeo foi gravado. Os vídeos são filmados pela própria organização e foram assistidos pelo pesquisador através do *software* VLC Media Player. As descrições a seguir explicam cada variável e como ela foi coletada ou calculada:

- Tempo de atendimento: é dado pela diferença entre os tempos de chegada e saída. O tempo de chegada é o instante em que o veículo faz uma parada completa dentro do alcance dos arrecadadores da tarifa. Observou-se que certo número de motoristas oferece o pagamento ao arrecadador enquanto seu veículo ainda está lentamente se movimento. Neste caso, o tempo de chegada é classificado como o instante em que o indivíduo começa a transação com o arrecadador. O tempo de saída é o instante em que o veículo ultrapassa por completo a cancela.
- Categoria: a categorização do veículo ocorreu segundo a definida da ANTT conforme a Figura 8. Porém, como esta definição se limita a veículos de no máximo 6 eixos e foram observados veículos maiores na coleta dos dados, como 7 e 9 eixos, foi adotada a categoria “Especial” no qual foram enquadrados veículos acima de 6 eixos.
- Forma de pagamento: a empresa aceita como forma de pagamento dinheiro em espécie, vale pedágio, cartão pedágio e cheque. Durante a coleta não foi observado o pagamento com cheque, por isso essa forma de pagamento não aparecerá nos dados.

- Necessidade de troco: quando o pagamento é realizado em espécie pode ocorrer à necessidade de o arrecadador retornar um valor ao motorista.
- Sexo do arrecadador: foi levantado se o arrecadador era do sexo feminino ou masculino. Salientando que todos os arrecadadores estudados passaram pelos mesmos treinamentos e estão exercendo a função de arrecadador entre 20 e 24 meses.
- Dia da semana: foram coletados dados durante os sete dias da semana.
- Turno: atualmente a empresa trabalha durante três turnos de 8h. O primeiro turno se inicia às 22h e termina às 5:59, o segundo turno ocorre das 6h às 13:59 e o terceiro turno começa às 14h e vai até 21:59.

Cada veículo que passa pela praça de pedágio durante o período de análise é considerado um ponto de dados. O conjunto completo de dados representaram 3636 pontos de dados.

### 4.3 Análise preliminar dos dados coletados

A análise dos 3636 pontos de dados mostrou que 65% da amostra eram veículos da categoria cat 1 enquanto 0,2% da categoria cat 5. A representação de todas as categorias está inserida na Figura 12.

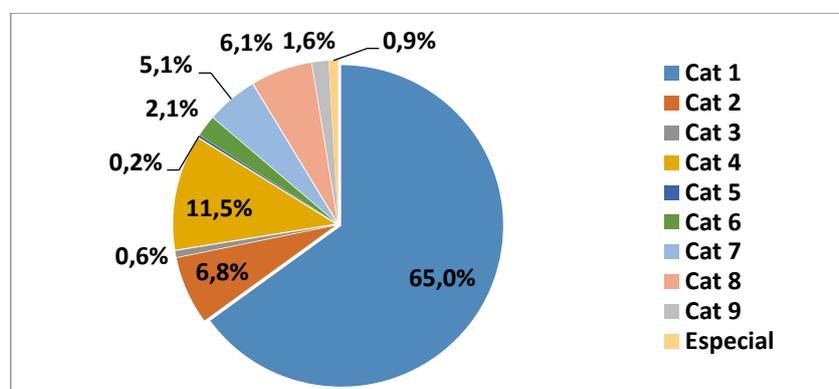


Figura 12 - Representação de cada categoria na amostra

Assim, verifica-se que carros de passeio (cat 1) são os mais representativos na amostra. Já no que diz respeito à forma de pagamento, o pagamento em espécie aparece como o mais utilizado com uma representação de 93,1%, já o cartão pedágio ficou em segundo lugar (4,5%) e o vale pedágio ficou em terceiro lugar representando apenas 2,4% do total analisado conforme a Figura 13. A organização também aceita cheque

como forma de pagamento, porém não foi observada essa forma de pagamento na coleta de dados.

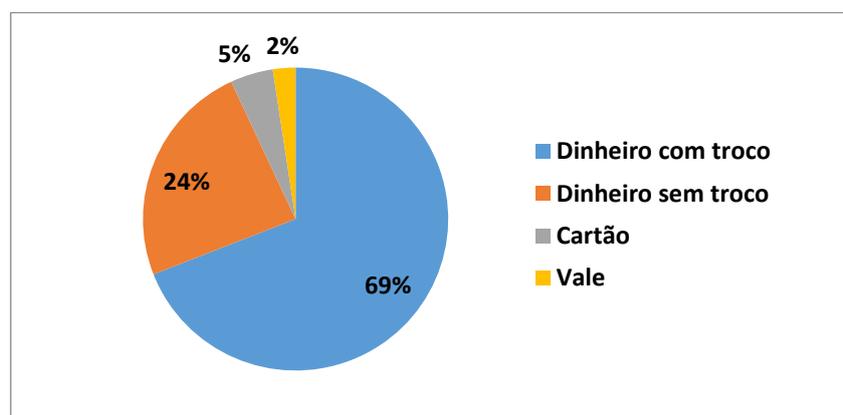


Figura 13 - Formas de pagamento utilizadas

Foi verificado que do total de veículos que pagaram em dinheiro, 3384, em 74% das vezes houve a necessidade de retornar troco, mostrando que a forma de pagamento em dinheiro e com troco foi a mais utilizada pelos motoristas no período de coleta dos dados. O tipo de pagamento efetuado por cada categoria de veículo também foi analisado e verificou-se que apenas as categorias 1, 3, 5 e 9 não pagaram a tarifa com o vale pedágio. Já o pagamento com cartão só não foi observado nas categorias 3, 5 e 9. Já o pagamento com dinheiro apareceu em todas as categorias de veículos.

Quando analisado o volume de veículos por dia da semana, domingo apresentou o maior volume com 658 veículos, seguido pelo sábado com 587 e pela sexta-feira com 530 veículos. Juntos, estes três dias da semana representam 49% do total de dados coletados. Os valores dos outros dias da semana podem ser observados na Figura 14.

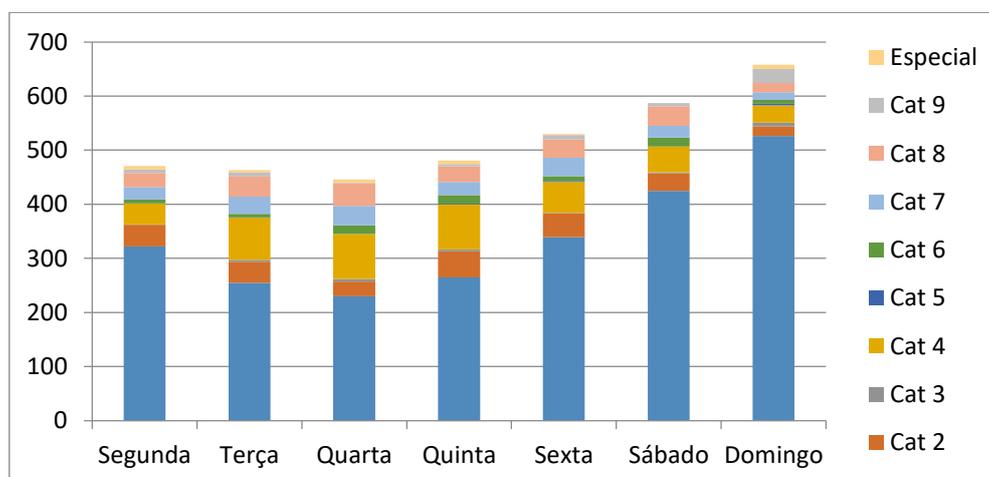


Figura 14 - Representação do volume de veículos por dia da semana

Como pode ser observado na Figura 14, quanto mais se aproxima do final de semana, o número de veículos cat 1 aumenta. Essa categoria representa 74% do fluxo de veículos na sexta-feira, sábado e domingo. Também é possível observar que veículos da categoria Especial não foram observados no sábado. Ocorre uma maior concentração dos veículos cat 2, cat 4 e cat 8 no meio da semana (terça, quarta e quinta-feira).

No que diz respeito ao turno em que os dados foram coletados, o primeiro turno foi o que apresentou o menor fluxo de veículos com um total de 648 veículos, sendo o segundo turno com 1418 veículos e o terceiro com 1570 veículos observados, como verificado na Figura 15.

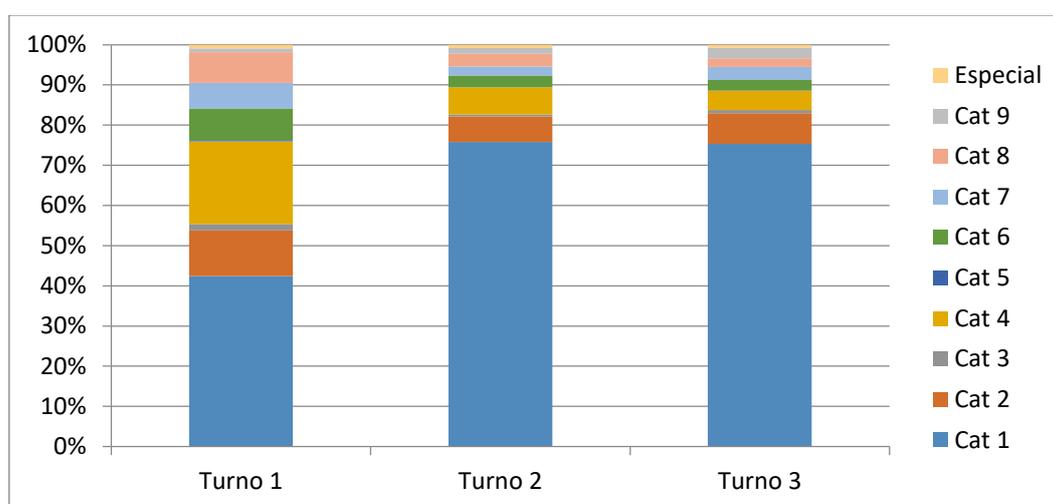


Figura 15 - Categoria de veículos por turno

Pode ser analisado na Figura 15 que o primeiro turno foi o único onde a porcentagem de veículos cat 1 foi inferior a 50%, representando 44% do total de tráfego de veículos nesse turno. Nos outros dois turnos a representatividade da categoria 1 foi superior a 70% do total de veículos.

#### 4.4 Tempo de atendimento

Como mencionado anteriormente o tempo de atendimento é dado pela diferença entre o tempo de chegada e o tempo de saída. A Figura 16 mostra linhas vermelhas que representam, aproximadamente, os momentos de chegada e saída dos veículos.



Figura 16 – Representação dos momentos de chegada e saída dos veículos

Com isso o tempo de atendimento é dado pelo período em que o veículo para em frente ao arrecadador para o pagamento da tarifa até o momento em que o veículo cruza, por completo, a cancela. Através da coleta de dados realizada, foi verificado que a média para o tempo de atendimento é de 21,08 segundos e possui um desvio padrão de 10,65 segundos, sendo que o menor tempo de atendimento registrado foi de 3,58 segundos e o maior foi 51,35 segundos. Com os dados coletados foi gerado um histograma, conforme mostrado na Figura 17, para verificar como os tempos de atendimento se comportam.

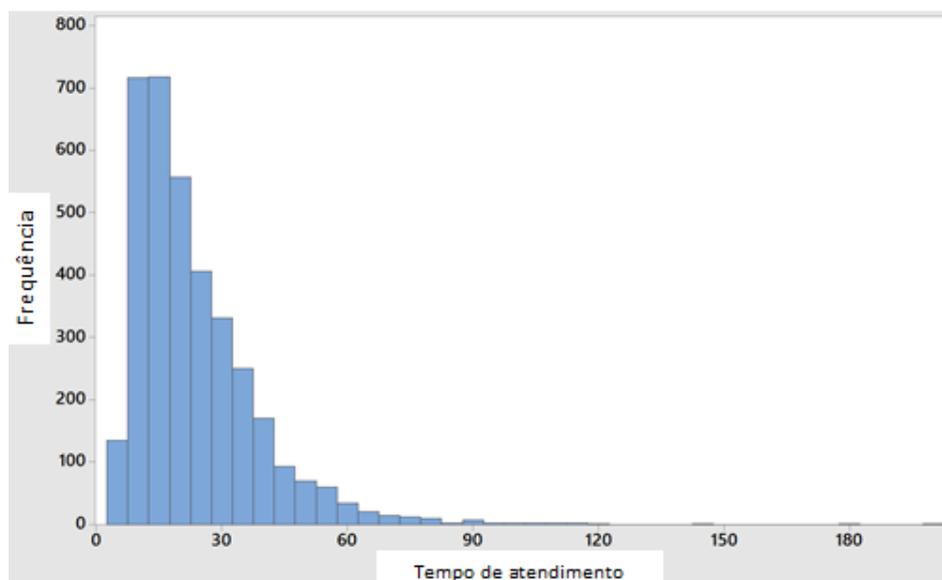


Figura 17 - Histograma para o tempo de atendimento

A Figura 17 mostra que os tempos de atendimento se enquadram em uma distribuição exponencial, a um nível de significância de 95%, com um *p-value* de 0,013. Segundo a literatura da teoria das filas, as distribuições que mais se aderem ao tempo de serviço são a exponencial, Erlang e hiperexponencial.

Para cada ponto de dados coletados foram geradas informações como o tempo de atendimento, a categoria do veículo, a forma de pagamento, a necessidade de troco, o sexo do arrecadador, o turno de trabalho e o dia da semana. Devido a essa vasta informação, foi possível verificar como o tempo de atendimento varia quando alguns desses fatores são isolados. Por exemplo, em relação à forma de pagamento o tempo médio quando a forma de pagamento é dinheiro, independente se há a necessidade de troco ou não, é de 23,21 segundos. Quando o pagamento é realizado com cartão pedágio essa média aumenta para 31,16 segundos e o pagamento com vale pedágio tem uma média 24,93 segundos. A forma de pagamento com cartão é a que possui o menor desvio padrão (8,46 segundos) em relação às outras formas de pagamento. Acredita-se que isso ocorra por ser a forma de pagamento mais padronizada e mais simples. Já o elevado desvio padrão da forma de pagamento em dinheiro (15,49 segundos) é dado justamente pela necessidade de voltar troco e conferir o dinheiro entregue.

A análise da necessidade de troco sobre os tempos de atendimento revelou que quando a forma de pagamento adotada é em espécie, a não necessidade de troco tem um tempo de atendimento menor (17,78 segundos) do que quando ocorre à necessidade de voltar do troco (25,10 segundo). Apesar de alguns arrecadadores separarem montinhos de troco para agilizar o processo ainda existe uma diferença de aproximadamente 8 segundos de uma média de tempo de atendimento para outra. Acredita-se que isso ocorra devido aos motoristas que possuem o valor contado não pararem por completo seus veículos e não esperarem o arrecadador entregar o recibo, fazendo com que seu tempo de permanência na praça seja menor.

Quando analisada a variação do tempo de atendimento em relação às categorias dos veículos, foi verificado que a categoria que apresenta a menor média do tempo de atendimento é a categoria 1 (18,94 segundos) e o maior tempo de atendimento pertence à categoria 5 e Especial (44,24 e 44,72 segundos respectivamente). Esses valores podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Média do tempo de atendimento para as categorias de veículos

<b>Categoria</b>	<b>Média (seg)</b>	<b>Desvio padrão (seg)</b>
1	18,94	11,89
2	29,59	14,85
3	24,57	13,49
4	30,97	17,15
5	44,24	29,21
6	39,95	18,17
7	32,64	14,86
8	35,18	17,24
9	24,85	23,56
Especial	44,71	27,49

Segundo Oliveira (2004) essa diferença pode ocorrer devido ao comprimento dos veículos, que quanto maior mais tempo poderá gastar para sair da cabine de atendimento. Além disso, a taxa de aceleração deste tipo de veículo é menor que a de veículos menores e mais leves.

Quando verificado a média do tempo de atendimento em relação ao sexo do arrecadador, verifica-se que para o sexo masculino a média é de 21,34 segundos, enquanto que do sexo feminino é de 24,45 segundos. Porém o desvio padrão para ambos os sexos é de 15,31 segundos.

Em relação aos turnos de trabalho, o primeiro turno, que tem início às 22h e término às 5:59 é o que possui a maior média de atendimento sendo de 33,17 segundos. Já o segundo e terceiro turno possuem média de atendimento de 22,15 e 23,25 segundos, respectivamente. Além de possuir a maior média de atendimento, o turno 1 apresenta um maior desvio padrão (33,17 segundos) sendo seu ponto mínimo 6,22 segundos e o maior de 144,01 segundos.

Os tempos de atendimento para os dias da semana estão dispostos na Tabela 2, na qual é evidenciado que a quinta-feira é o único dia da semana onde ocorre um pico no tempo de atendimento, os outros dias se mantêm em uma média de 24,22 segundos.

Tabela 2 – Média do tempo de atendimento por dia da semana

<b>Dia da semana</b>	<b>Média (seg)</b>	<b>Desvio padrão (seg)</b>
Segunda feira	25,78	17,52
Terça feira	24,29	13,66
Quarta feira	26,32	15,00
Quinta feira	30,81	16,89
Sexta feira	22,99	13,16
Sábado	24,54	18,19
Domingo	21,42	14,49

O domingo possui a menor média do tempo de atendimento, apenas 21,42 segundos. Porém a sexta-feira é o dia que apresentou um menor desvio padrão, sendo o valor mínimo observado de 4,97 segundos e o máximo 71,73 segundos. O sábado foi o que apresentou o maior desvio padrão (18,19 segundos) com um mínimo de 5,59 segundos e um máximo de 106,67 segundos.

#### 4.5 Conclusões do capítulo

A fim de facilitar a visualização de todos os dados analisados anteriormente, foi gerado o gráfico de efeitos principais para o tempo de atendimento, exposto na Figura 18.

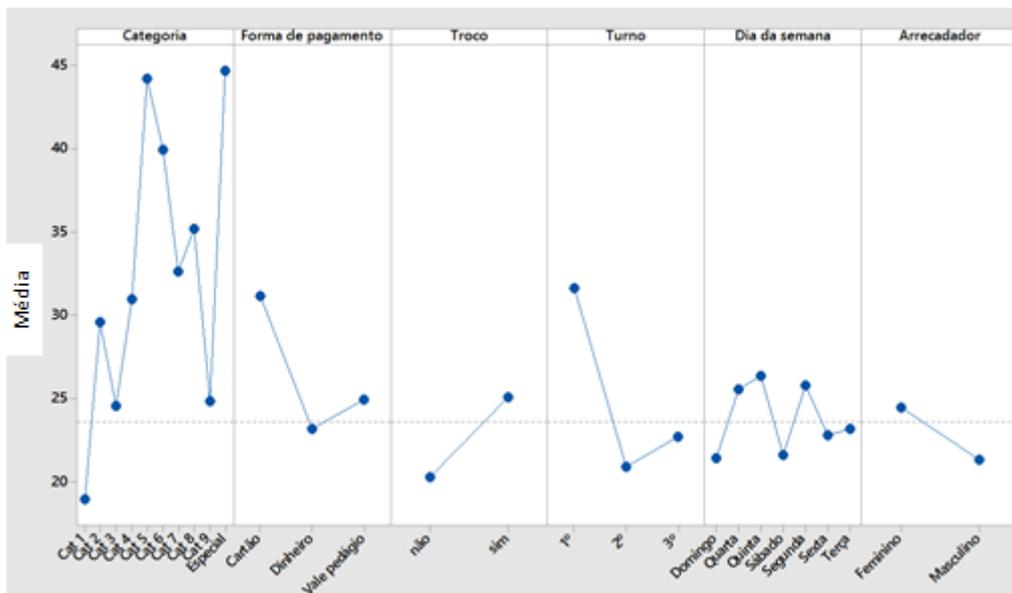


Figura 18 – Efeitos principais para o tempo de atendimento

Para elaborar o gráfico de efeitos principais, exposto na Figura 18, foram considerados apenas os fatores explícitos na parte inferior do gráfico. Por exemplo, para verificar a média do tempo de atendimento para a categoria 1 de veículos, foram

considerados todos os veículos desta categoria independente da forma de pagamento utilizada, da necessidade de troco, do sexo do arrecadador, do dia da semana e do turno de trabalho. O mesmo procedimento foi realizado para as outras categorias de veículos. Da mesma forma, a média do tempo de atendimento para o pagamento com cartão considera todas as categorias que utilizaram essa forma de pagamento, todos os turnos de trabalho, dia da semana e o sexo do arrecadador. Esse procedimento foi realizado para todos os fatores e seus níveis expostos na Figura 18.

O gráfico de efeitos principais mostra que os veículos cat 1 e a forma de pagamento em dinheiro sem troco possuem a menor média do tempo de atendimento. Quando o motorista já possui o dinheiro trocado muitas vezes ele nem para por completo na cabine de pedágio e também não espera o arrecadador entregar o recibo de pagamento (KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002a; ZARRILLO, 2000; WOO; HOEL, 1991). Tudo isso associado ao fato de veículos cat 1 serem pequenos e possuírem uma taxa de aceleração alta faz com que o tempo de atendimento seja menor se comparado às outras formas de pagamento ou categoria de veículos (ARAÚJO; SETTI, 2006; OLIVEIRA, 2004).

O primeiro turno é o que ocorre a maior média. Uma possível explicação para o fato de o primeiro turno apresentar a maior média de atendimento é que, como já explicado no tópico anterior, este turno é o que apresenta o menor fluxo de veículos cat 1. Nesta situação o tráfego é composto por caminhões e ônibus que possuem uma média de tempo de atendimento maior. Além disso, o primeiro turno é o que possui o menor volume de tráfego. Estudos sugerem que quanto maior o fluxo de veículos, mais rápido os arrecadadores tendem a trabalhar (OLIVEIRA *et al.*, 2003; WOO; HOEL, 1991, DANKO; GULEWICZ, 1991).

## **5 FATORES HUMANOS E OPERACIONAIS E A RELAÇÃO COM O TEMPO DE ATENDIMENTO**

Um dos objetivos específicos desta dissertação é analisar a influência de fatores operacionais e humanos no nível de serviço de uma praça de pedágio. Foi utilizado o método do *Design of Experiments* (DOE), com o intuito de verificar como esses fatores interagem entre si e quais são mais representativos. Para tanto, a metodologia segue as etapas do projeto de experimentos, ou seja, reconhecimento e relato do problema, escolha dos fatores e dos níveis a serem estudados, seleção da variável de resposta, escolha do planejamento experimental, realização do experimento, análise dos dados e conclusões e recomendações.

### **5.1 Reconhecimento e relato do problema**

A forma de cobrança praticada, o fluxo de tráfego e sua composição, dentre outros fatores podem influenciar no desempenho da praça de pedágio, isso porque podem influenciar nos tempos de atendimento. Com isso, o objetivo desta pesquisa é saber como esses fatores interagem entre si e quais são mais representativos no que tange à variável tempo de atendimento. Vale salientar que os tempos de atendimento dizem respeito aos pagamentos manuais, ou seja, aqueles pagamentos em que ocorre a interação arrecadador-motorista, sendo desconsideradas as outras formas de pagamento.

O objeto de estudo e a maneira como foi realizada a coleta dos dados estão descritos nos tópicos 3.2 e 3.3 do capítulo anterior.

### **5.2 Escolha dos fatores e dos níveis**

Inicialmente foram determinados seis fatores a serem avaliados, a fim de descobrir quais desses fatores tem maior influência na variável de resposta (saída). O primeiro fator definido foi a “categoria dos veículos” que trafegam na praça de pedágio. Para isso foi utilizado a categorização adotada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), conforme mostrado na Figura 8, no tópico 2.4.1.3. Na Figura 8 verifica-se que os veículos podem ser divididos em 9 categorias conforme a quantidade de eixos e a presença de eixos duplos. Além disso, uma décima categoria, denominada “especial”, foi adotada para abordar veículos maiores que seis eixos visto que a categorização da ANTT se limitar a veículo de 6 eixos.

O segundo fator foi a “forma de pagamento da tarifa”, que pode acontecer de quatro maneiras: dinheiro, cartão pedágio, vale pedágio e cheque. Também foi

considerado o fator “necessidade de troco”, sendo esse ligado ao pagamento em espécie. O quarto fator foi o “sexo do arrecadador” que possui dois níveis: feminino e masculino. Os “dias da semana” também foram considerados um fator, assim como os “turnos de trabalho” adotados pela companhia, sendo que o primeiro turno tem início às 22h e termina às 5:59, o segundo turno tem início às 6h e término às 13:59, enquanto que o terceiro inicia-se às 14h e termina às 21:59. Uma condensação dos fatores descritos anteriormente e seus níveis podem ser observados na Figura 19.

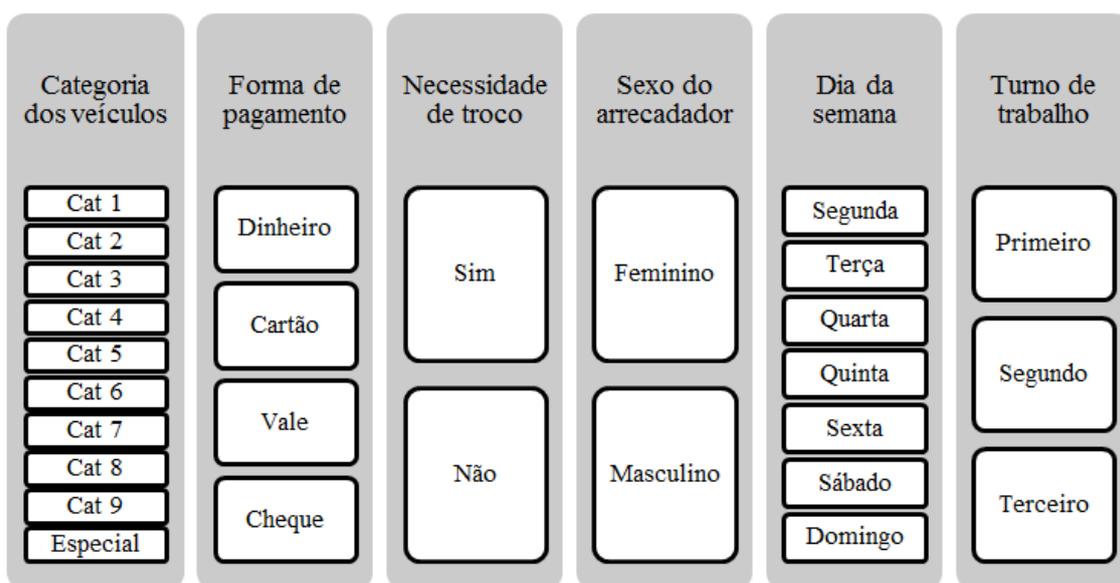
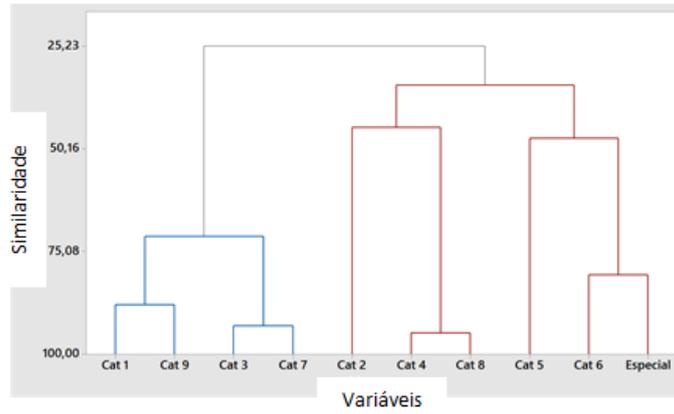
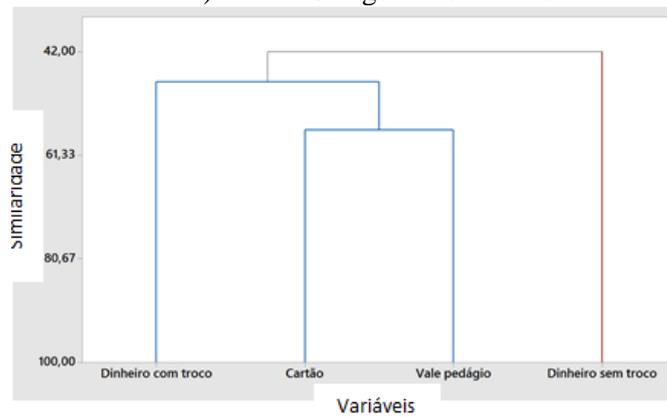


Figura 19 - Fatores e níveis adotados inicialmente

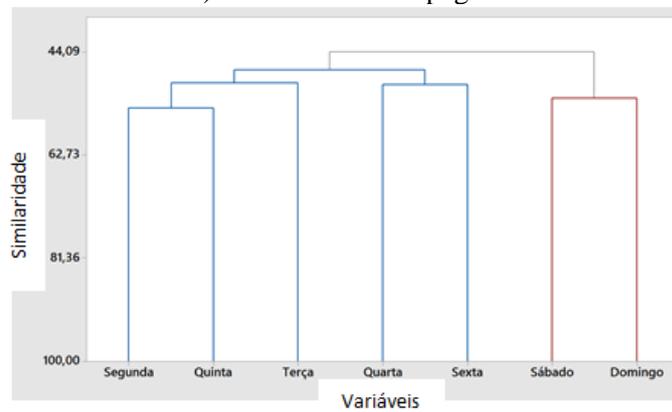
Como verificado na Figura 19, existem seis fatores e cada fator possui dois ou mais fatores. Porém, Kumar *et al.* (2014) salientam a importância da eliminação dos fatores insignificantes nos primeiros passos, pois essa eliminação auxilia na redução de esforços experimentais necessários nos próximos passos do experimento. Dessa maneira foi realizada uma análise de agrupamento (*cluster analysis*) utilizando-se o agrupamento k-médias com a distância euclidiana ao quadrado como medida de similaridade. Como o objetivo é analisar a interação entre os fatores optou-se por criar dois grupos similares para cada fator analisado conforme pode ser observado na Figura 20.



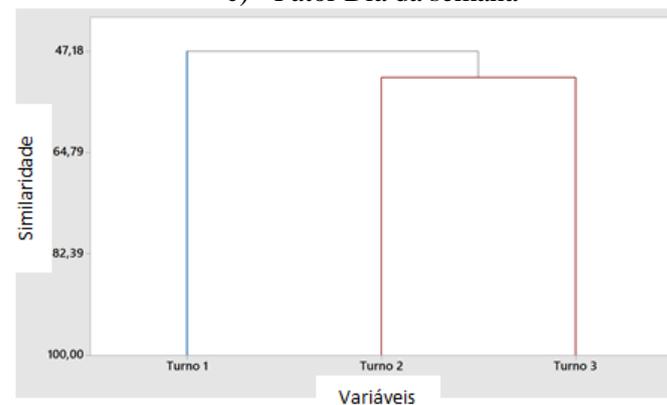
a) Fator Categoria do veículo



b) Fator Forma de pagamento



c) Fator Dia da semana



d) Fator Turno

Figura 20 - Dendrograma dos fatores analisados

Conforme pode ser observado na Figura 20, os grupos estão representados pelas linhas em vermelho e em azul e cada conexão mostra o nível de similaridade entre as categorias. Por exemplo, as categorias 1 e 9 (Figura 20a) possuem um nível de similaridade de 88%, enquanto que a categoria 4 e 8 possui um nível de similaridade de aproximadamente 95%. O dendograma mostra que para a “categoria dos veículos” (Figura 20a) a similaridade ocorreu entre as categorias cat 2, cat 4, cat 5, cat 6, cat 8 e Especial formando dessa maneira o primeiro grupo. O outro grupo ficou formado pelas categorias cat 1, cat 3, cat 7 e cat 9.

O fator “forma de pagamento” (Figura 20b) também foi reduzido a dois níveis, destacando que a forma de pagamento cheque foi retirada da pesquisa, pois não foi observada o uso dessa forma de pagamento durante o período de coleta dos dados. As formas de pagamento foram agrupadas da seguinte maneira: o grupo A ficou com a forma de pagamento em dinheiro com troco, cartão e vale pedágio (linha azul) enquanto que o grupo B ficou apenas com a forma de pagamento dinheiro sem troco (linha vermelha).

O fator “sexo do arrecadador” não foi agrupado já que possui apenas dois níveis. O fator “dia da semana” (Figura 20c) ficou agrupado da seguinte maneira: segunda, terça, quarta, quinta e sexta formam um grupo e sábado e domingo outro grupo. Por fim, o fator “turno” (Figura 20d) também foi agrupado, sendo que o grupo A ficou com o turno 1 e o grupo B com os turnos 2 e 3.

Realizado os agrupamentos, o experimento será realizado com cinco fatores e cada fator com dois níveis conforme mostrado na Figura 21.

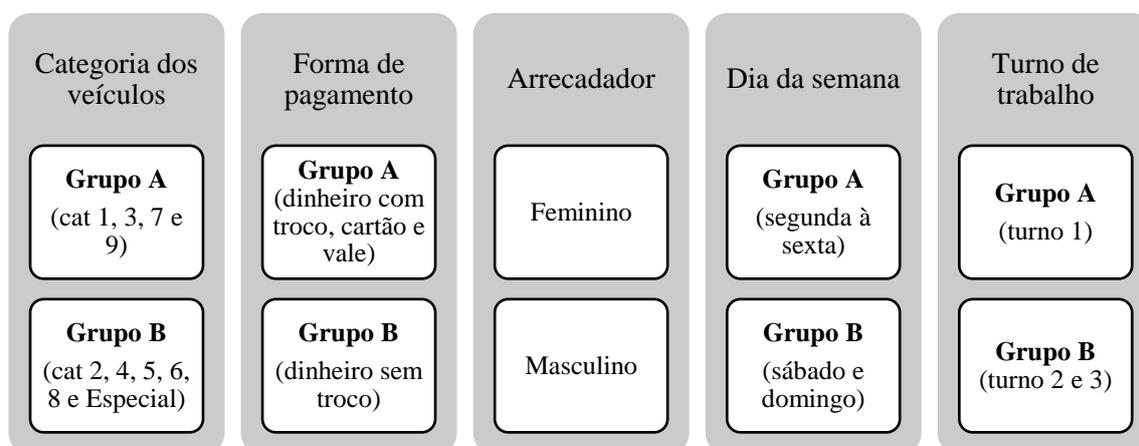


Figura 21 - Experimento a ser realizado com 5 fatores e 2 níveis para cada fator

### 5.3 Seleção da variável de resposta

A variável de resposta será o “tempo de atendimento”. Essa variável é representada pela diferença entre os tempos de chegada e saída. O tempo de chegada é o instante em que o veículo para, por completo, ao alcance dos arrecadadores de impostos e o tempo de saída é o momento em que o veículo ultrapassa, por completo, a cancela. Essa variável pode ser observada no tópico 4.4 (Figura 16).

### 5.4 Planejamento do experimento

Foi adotado um experimento fatorial, pois é um tipo de experimento planejado que permite estudar os efeitos de diversos fatores sobre uma resposta. Ao realizar um experimento, variar os níveis de todos os fatores ao mesmo tempo em vez de um de cada vez permite estudar as interações entre os fatores (MONTGOMERY, 2013). Além disso, foi realizado o fatorial completo, no qual as respostas podem ser medidas em todas as combinações dos níveis de fatores determinados.

Como exposto na Figura 21, todos os fatores possuem apenas dois níveis. Com isso foi realizado um fatorial completo com 2 níveis. O número de corridas necessárias para um experimento fatorial completo com 2 níveis é  $2^k$ , no qual  $k$  é o número de fatores. Dessa maneira, o número de corridas necessárias para o experimento realizado é de  $2^5$  (serão utilizados cinco fatores), ou seja, 32 corridas.

Porém foram utilizadas três replicações, que são várias corridas experimentais com as mesmas configurações de fatores (níveis). Como as replicações estão sujeitas às mesmas fontes de variabilidade, independentemente umas das outras, a vantagem de utilizar réplicas está em detectar efeitos menores ou obter maior potência para detectar um efeito de tamanho fixo quando se possui uma grande amostra de dados. Com isso, o número de corridas realizadas foram 96.

### 5.5 Realização do experimento

O experimento foi desenvolvido no Minitab® 17 que é um pacote de *software* com foco na computação estatística e visualização. Dessa maneira, a tabela da primeira réplica gerada para o experimento pode ser observada na Figura 22.

	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Categoria	Dia da semana	Turno	Forma de pagamento	Arrecadador	Resposta
1	1	1	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo A	37,91
2	2	2	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo A	28,40
3	3	3	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo A	26,62
4	4	4	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo A	106,97
5	5	5	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo A	28,15
6	6	6	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo A	33,55
7	7	7	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo A	24,00
8	8	8	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo A	16,14
9	9	9	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo A	19,04
10	10	10	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo A	27,13
11	11	11	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo A	10,20
12	12	12	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo A	49,90
13	13	13	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo A	24,66
14	14	14	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo A	41,31
15	15	15	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo A	11,18
16	16	16	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo A	20,75
17	17	17	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo B	32,86
18	18	18	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo B	27,70
19	19	19	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo B	15,10
20	20	20	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo B	22,81
21	21	21	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo B	8,96
22	22	22	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo B	45,74
23	23	23	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo B	24,49
24	24	24	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo B	29,69
25	25	25	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo B	18,33
26	26	26	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo B	39,10
27	27	27	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo B	14,56
28	28	28	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo B	11,88
29	29	29	1	1	Grupo A	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo B	9,54
30	30	30	1	1	Grupo B	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo B	15,17
31	31	31	1	1	Grupo A	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo B	8,82
32	32	32	1	1	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo B	Grupo B	29,69

Figura 22 – Primeira réplica de dados do experimento

A última coluna da Figura 22 representa as repostas para o experimento, ou seja, o tempo de atendimento para cada combinação. Por exemplo, para combinação da linha 1, no qual está sendo analisado o grupo A de todos os fatores, um dos tempos de atendimento cronometrados foi de 37,91 segundos. A escolha do tempo de atendimento foi feito de forma aleatória para as todas as combinações e réplicas realizadas, uma vez que para algumas combinações havia mais de três tempos de atendimentos cronometrados.

## 5.6 Análise dos dados

Após a elaboração do experimento, é possível verificar qual fator tem maior influência na resposta “tempo de atendimento”. A equação de regressão que representa a resposta pode ser representada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Tempo de atendimento} = & 26,56 + 6,84A + 1,35B - 3,26C - 3,46D - 4,96E + 2,83AB - \\ & 2,23AC - 0,60AD - 4,12AE - 5,41BC - 0,54BD - 2,84BE - 0,88CD + 2,42CE - 0,02 \\ & DE - 5,10ABC - 1,16ABD - 4,32ABE - 1,26ACD + 4,35ACE + 0,33ADE + 0,19BCD \\ & + 5,77BCE + 0,18BDE - 1,40CDE + 1,42ABCD + 4,89ABCE + 0,00ABDE - \\ & 0,39ACDE - 1,22BCDE - 0,07ABCDE \end{aligned}$$

No qual:

A = Categoria

B = Dia da semana

C = Turno

D = Forma de pagamento

E = Arrecadador

Com 95% de confiabilidade foi gerado o gráfico de Pareto, que pode ser visualizado na Figura 23, que mostra os vários fatores que tem influência na variável de resposta.

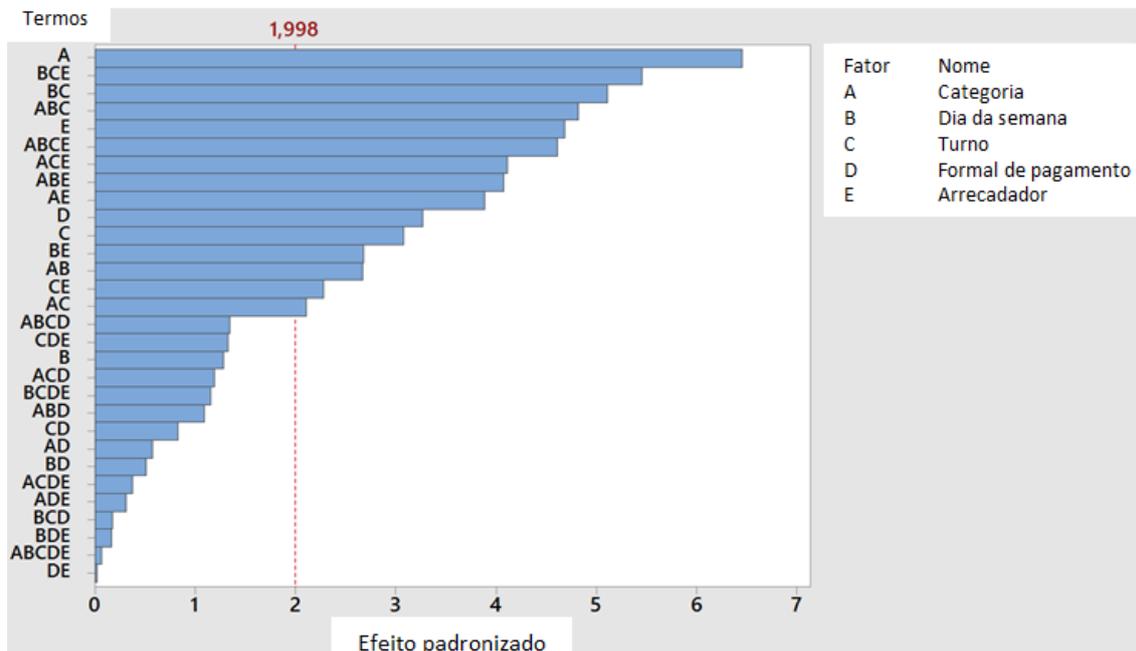


Figura 23 - Gráfico de Pareto com os fatores analisados

Através da Figura 23 é constatado que os fatores Categoria, Turno, Forma de Pagamento e Arrecadador, representados pelas letras A, C, D e E respectivamente, influenciam de maneira significativa a variável de resposta “Tempo de atendimento”. Essa influência é verificada já que todos os fatores ultrapassaram a linha de referência,

representar uma linha tracejada na cor vermelha. O fator “dia da semana” foi o único que não ultrapassou a linha de referência, ou seja, foi o único fator que não exerceu influência de forma significativa no tempo de atendimento. A interação BCE, ou seja, Dia da semana-Turno-Arrecadador foi a mais significativa das interações, aparecendo em segundo lugar na Figura 23, sendo esta a interação que mais influencia o tempo de atendimento na praça de pedágio estudada.

A influência desses fatores também pode ser verificada na Figura 2 que mostra o Gráfico Normal de Efeitos padronizados e foi considerado um  $\alpha$  de 0,05.

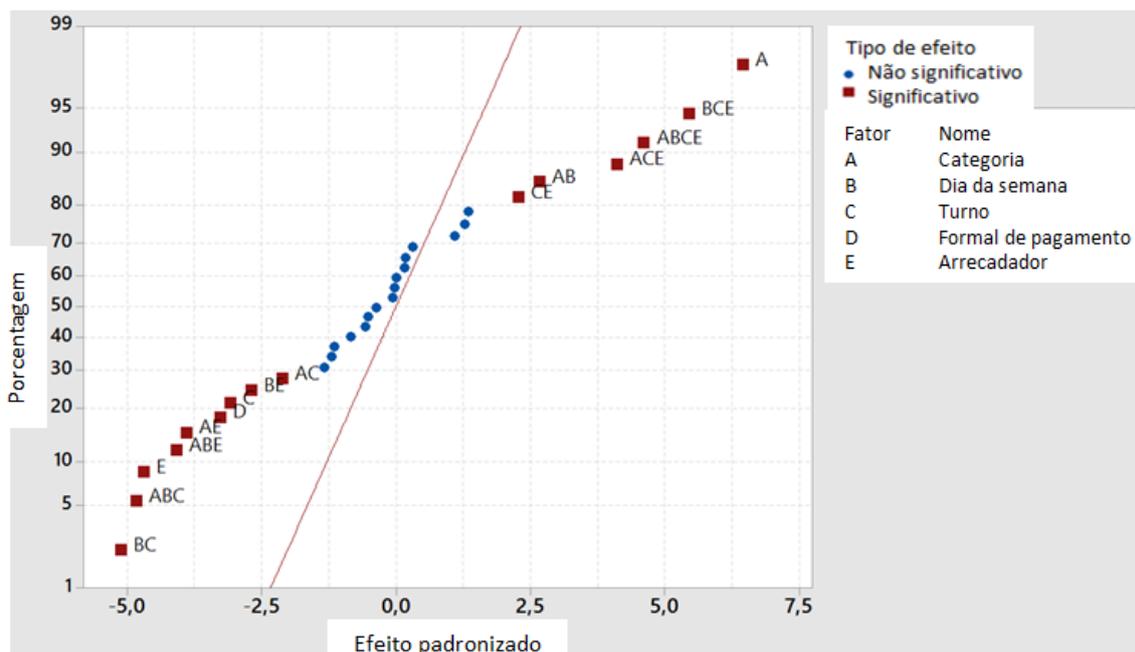


Figura 24 - Gráfico normal dos efeitos padronizados (a resposta é tempo de atendimento)

A Figura 24 mostra as interações que tem um efeito significativo sobre o tempo de atendimento, estes estão representados pelos pontos vermelhos. Já os pontos em azul são aqueles que não influenciam de maneira significativa a variável de resposta.

Foi gerado também um gráfico dos efeitos principais para cada fator, a fim de verificar quais são os fatores e os níveis que influenciam de forma negativa o tempo de atendimento, conforme demonstrado na Figura 25.

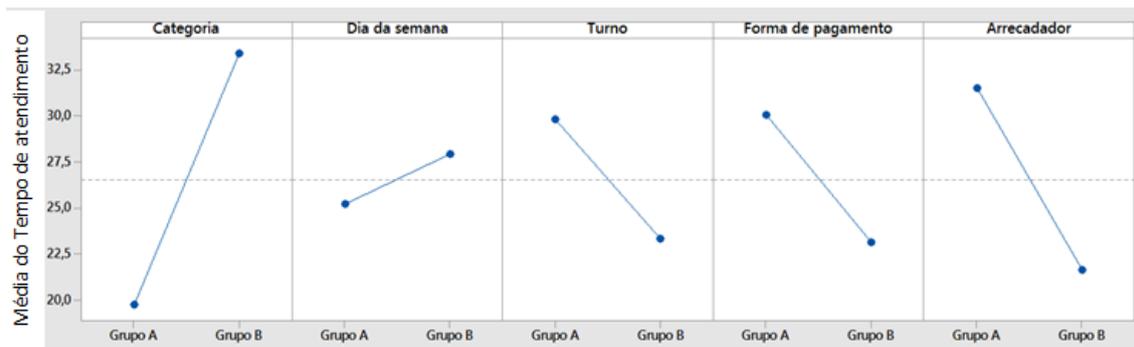


Figura 25 - Gráfico de efeitos principais para a resposta tempo de atendimento

Na Figura 25, cada ponto do gráfico representa o tempo de atendimento médio para um nível de um fator, sendo que a linha central horizontal mostra o tempo de atendimento médio para todos os ensaios realizados. Para a “categoria dos veículos” o grupo B possui a maior média do tempo de atendimento, se comparado ao grupo A. O mesmo acontece para o fator “dia da semana”. Já os outros fatores, “turno”, “forma de pagamento” e “arrecadador”, o grupo A apresenta maior média do tempo de atendimento.

Também foi verificada a interação dos fatores dois a dois, conforme mostrado na Figura 26, no qual se desejou analisar como os fatores se relacionam.

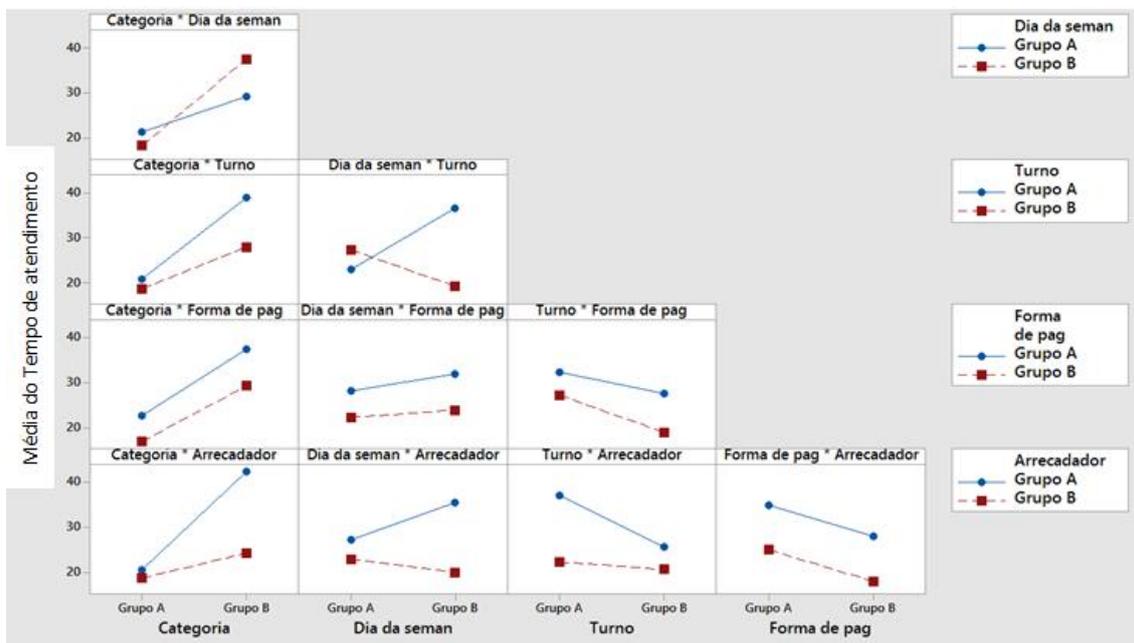


Figura 26 - Gráfico de interação dois a dois para a resposta tempo de atendimento

Na Figura 26 cada ponto no gráfico de interações mostra o tempo de atendimento médio em diferentes combinações de níveis de fator. Se as linhas não forem paralelas, o gráfico indicará que há uma interação entre os dois fatores. Observa-

se que várias linhas estão em paralelos na figura, mostrando que não há interações entre os fatores ou há uma interação muito pequena. Entretanto nas interações dos fatores “categoria” e “dia da semana”, “dia da semana” e “turno”, “categoria” e “turno” e “categoria” e “arrecadador”, verifica-se que as linhas se inclinam, levando a acreditar que existe uma interação entre esses fatores.

A análise dois a dois que mais se destacou foi entre os fatores “turno” e “dia da semana” como sendo os fatores que mais possuíram interação. Na análise desses dois fatores é verificado que durante a semana o turno 1 apresentou o menor tempo de atendimento. Porém, como a inclinação da linha do final de semana é maior, conclui-se que esse nível é mais sensível na variação dos turnos.

## **5.7 Conclusões do experimento**

Através do *Design of Experiments* foi possível verificar que alguns fatores e suas interações tem uma forte influência sobre o tempo de atendimento. Os fatores que mais se destacaram foram a “categoria do veículo” que está solicitando o serviço à praça de pedágio, a “forma de pagamento” adotada pelo motorista e o “sexo do arrecadador”. A categoria do veículo tem forte influência no tempo de atendimento, o que pode ser verificado em diversos trabalhos (ARAÚJO; SETTI, 2006; OLIVEIRA, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2003; WOO; HOEL, 1991) e esse fator foi o que mais se destacou. Esse resultado foi alcançado, pois os grupos citados para a categoria do veículo se diferenciavam por tamanho e peso, sendo que veículos menores e mais leves, como carros de passeio e motos, possuem maior taxa de aceleração e permanecem por menos tempo nas cabines de arrecadação. Já os veículos maiores e pesados possuem um tempo de permanência nas cabines de arrecadação maior tarifa (ZARRILLO, 2000; ZARRILLO *et al.*, 1997; WOO; HOEL, 1991).

Já a interação que tem maior influência na variável de resposta analisada é a que envolve o “dia da semana”, o “turno” e o “sexo do arrecadador”. Outra interação que se destacou foi o “dia da semana” e o “turno”. Acredita-se que o fato do turno de trabalho estar representado nas interações que interferem no tempo de atendimento é devido a grande diferença entre os dois grupos desse fator. O grupo A representa o primeiro turno que tem início às 22h e termina às 5:59; nesse período o fluxo de veículos é pequeno e é composto principalmente por veículos pesados. De acordo com Araújo (2001), fluxos reduzidos e presença de veículos pesados tendem a aumentar o tempo de

atendimento, já que os arrecadadores trabalham sem grandes pressões devido à criação de filas e os veículos pesados tem uma baixa aceleração como já mencionado.

Vale ressaltar que diversas atividades executadas pelos arrecadadores, as quais não estão presentes nas atividades padrão, foram observadas através das filmagens durante a coleta de dados e acredita-se que essas atividades refletem no tempo de atendimento. Uma das atividades verificadas foi que os arrecadadores separam na bancada montinhos de troco para os pagamentos mais frequentes na praça, fazendo com que o tempo de atendimento para esse tipo de pagamento reduza. Foi observado também que o arrecadador costuma pedir para motorista de veículos leves facilitarem o troco, o que não é frequentemente observado em veículos pesados.

## 6 NÍVEL DE SERVIÇO DA PRAÇA DE PEDÁGIO - PROJETO DE SIMULAÇÃO

Nesse capítulo será relatado como foi à criação e os resultados obtidos com o projeto de simulação. Para elaboração deste projeto foi seguida as etapas propostas por Montevechi *et al.* (2007). Dentre estas etapas estão à concepção do modelo, a sua implementação por meio da criação do modelo computacional e a análise dos resultados obtidos.

### 6.1 Concepção

#### 6.1.1 Objetivos e definição do sistema

Para atingir os objetivos propostos, foi escolhida uma única praça de pedágio dentre as oito que a concessionária possui no trecho de sua responsabilidade, a mesma praça na qual foi realizado o DOE apresentado no capítulo anterior. Essa praça foi escolhida por estar localizada próxima a uma região metropolitana e possuir um elevado fluxo de veículos. A praça em questão é composta por 10 cabines de cobrança manual e 4 cabines de cobrança eletrônica, sendo a metade dessas cabines, 5 manuais e 2 eletrônicas, distribuídas no sentido norte da via e a outra metade no sentido sul da via, conforme pode ser observado na Figura 27.

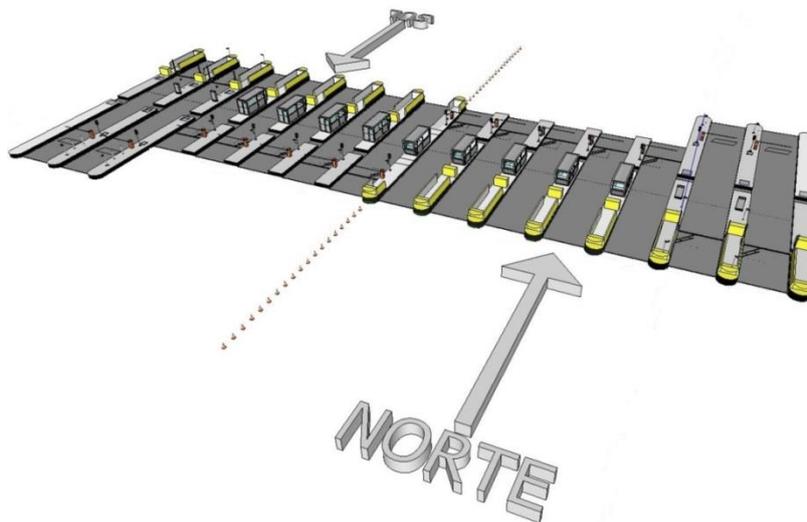


Figura 27 - Esquema da praça de pedágio estudada

Nesta pesquisa foi estudado apenas um sentido da via, Norte, uma vez que o fluxo de veículos nos dois sentidos é parecido, bem como as características dos veículos e da praça de pedágio em si. Também foram analisadas apenas as cabines de cobrança

manual, ou seja, aquelas em que ocorre a interação entre o motorista e arrecadador, não sendo analisadas as cabines de cobrança eletrônica.

A variável de saída analisada foi o tempo de cada veículo no sistema em um período de oito horas de funcionamento, condizente com o tempo de duração de cada turno da empresa estudada, que trabalha atualmente com turnos. É importante comentar que o tempo no sistema é resultante da soma do tempo na fila mais o tempo de atendimento. A fim de verificar a qualidade do serviço oferecido nessa praça de pedágio, será utilizada a escala proposta por Lin e Su (1994), que utiliza o comprimento médio de fila nas cabines e o tempo médio no sistema como indicadores de desempenho conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Níveis de serviços para praças de pedágio segundo Lin e Su (1994)

Nível de serviço	Comprimento da fila (sendo L o número de veículos)	Tempo no sistema (T o tempo em segundos/veic)
A	$\leq 1$	$\leq 15$
B	$1 < L \leq 2$	$15 < T \leq 30$
C	$2 < L \leq 3$	$30 < T \leq 45$
D	$3 < L \leq 6$	$45 < T \leq 60$
E	$6 < L \leq 10$	$60 < T \leq 80$
F	$> 10$	$> 80$

FONTE: Lin e Su (1994)

### 6.1.2 Construção e validação do modelo conceitual

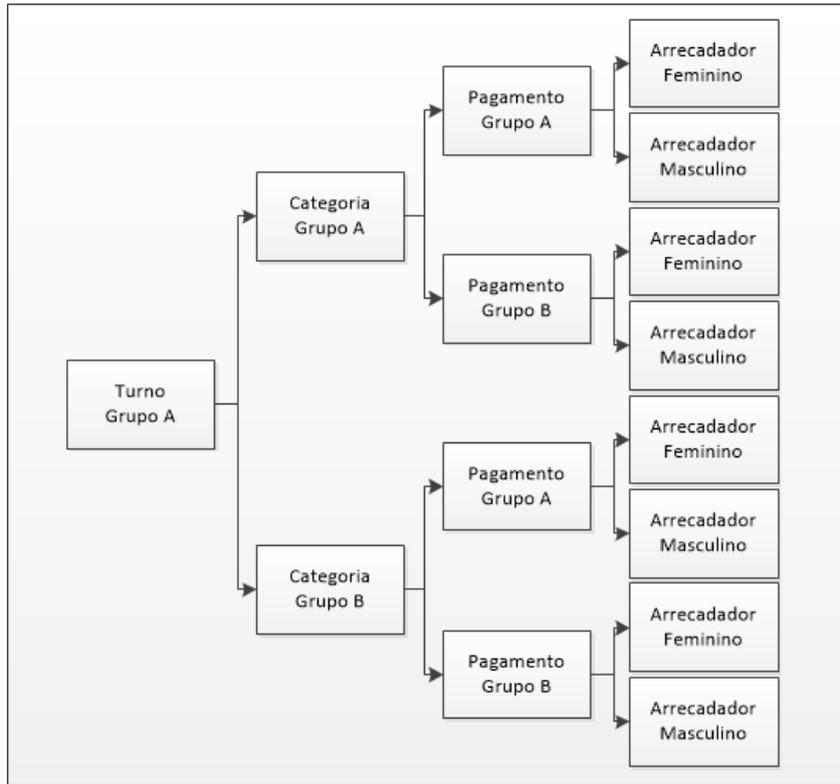
Para a criação do modelo conceitual, foi utilizada a técnica de modelagem proposta por Leal *et al.* (2008) chamada de IDEF-SIM, que, ao oferecer elementos lógicos de uso específico em projetos de simulação, favorecem a representação do sistema de forma satisfatória e com leitura simplificada, bem como potencializam o processo de documentação.

A validação do modelo conceitual ocorre por meio da comparação entre o modelo conceitual com o sistema do mundo real. A análise dessa comparação é beneficiada quando se dispõe da participação de especialistas do sistema real, que podem avaliar os modelos conceituais (CHWIF; MEDINA, 2006; LEAL *et al.*, 2007). O modelo conceitual foi apresentado para o gestor da área, para o analista responsável pela administração das praças de pedágio e para dois controladores. Após analisarem o modelo conceitual, todos os entrevistados concordaram que ele se encontra condizente com o que é observado na praça de pedágio, validando assim o modelo criado.

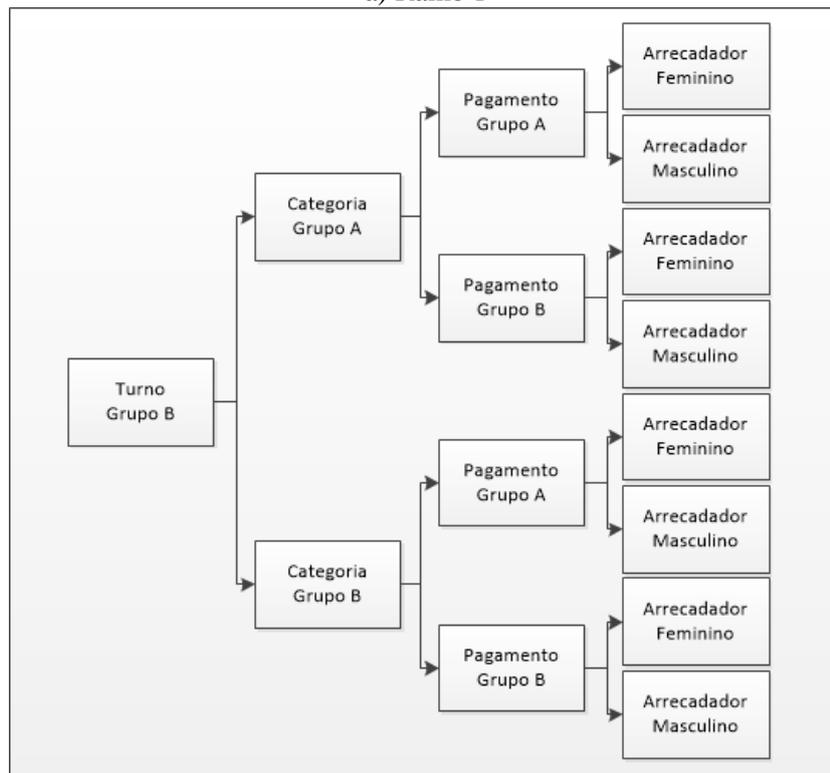
### 6.1.3 Modelagem dos dados de entrada

Os dados utilizados na modelagem foram os mesmos utilizados para análise dos dados primários e no *Design of Experiment*, descritos nos capítulos anteriores. Como já mencionado, cada ponto de coleta forneceu informações como o tempo de atendimento, a categoria do veículo, o turno de trabalho e o sexo do arrecadador. Essas informações possibilitaram elaborar diferentes distribuições de probabilidade para o tempo de atendimento de acordo com os fatores analisados no DOE. Essa diferenciação foi realizada, pois cada tipo de veículo, turno, forma de pagamento e sexo do arrecadador influenciam no tempo em que o veículo permanece na cabine de arrecadação de uma maneira diferente.

Para verificar quantas distribuições de probabilidade para o tempo de atendimento são necessárias, foi criada uma árvore de decisão com os quatro fatores analisados no DOE: “categoria”, “forma de pagamento”, “turno” e “sexo do arrecadador”. O fator “dia da semana” não foi incluído na árvore de decisão, pois não apresentou uma influencia significativa no tempo de atendimento. A Figura 28 mostra a árvore de decisão elaborada, que possui dois grandes ramos, sendo que o primeiro (Figura 28a) tem início no Grupo A do fator “turno” e o segundo ramo (Figura 28b) no Grupo B do fator “turno”. Para maiores esclarecimentos de cada grupo e o que representam visualize a Figura 21 exposta no Capítulo 5 dessa pesquisa.



a) Ramo 1



b) Ramo 2

Figura 28 - Árvore de decisão para os tempos de atendimento

Foi utilizado o *software* StatFit para determinar qual a distribuição de probabilidade que melhor representa o tempo de atendimento de cada ramo da árvore de

decisão. Chamando a primeira configuração da árvore de decisão (Figura 28) de 1, o segundo galho de 2 e assim sucessivamente, as distribuições de probabilidades adotadas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuições estatísticas utilizadas no projeto de simulação

<b>Galho da árvore de decisão</b>	<b>Distribuição utilizada</b>	<b>Fórmula</b>
1	Erlang	Erlang(6., 2., 10.)
2	Erlang	Erlang(5., 2.47, 15.)
3	Erlang	Erlang(3., 2., 11.5)
4	Exponential	Exponential(6., 18.1)
5	Erlang	Erlang(8., 3., 9.95)
6	Erlang	Erlang(12., 2., 11.6)
7	Erlang	Erlang(9., 1., 18.5)
8	Exponential	Exponential(11., 13.9)
9	Lognormal	Lognormal(5., 2.54, 0.732)
10	Erlang	Erlang(4., 2., 7.)
11	Lognormal	Lognormal(3., 2.4, 0.69)
12	Erlang	Erlang(3., 2., 4.92)
13	Erlang	Erlang(7., 3., 8.38)
14	Erlang	Erlang(7., 3., 7.15)
15	Erlang	Erlang(8., 2., 7.93)
16	Erlang	Erlang(7., 1., 12.4)

As mesmas distribuições de probabilidade para o tempo de atendimento mostrado na Tabela 4 foram utilizadas nos modelos de dias típicos e atípicos. Os modelos criados para os dias típicos e atípicos se diferenciam no que diz respeito à taxa de chegada de veículos na praça de pedágio e na composição dos veículos. Para elaborar a composição dos veículos foram utilizados os dois ramos da árvore de decisão (Figura 28), sendo que a soma da probabilidade de ocorrência de cada ramo resulta em 100%, ou no total de veículos que atravessaram a praça de pedágio.

Além do tempo de atendimento, outras variáveis foram necessárias para a criação do modelo, como a composição do tráfego que foi obtido por meio de documentos disponibilizados pela organização. Também foram necessárias informações como a taxa de chegada dos veículos na praça de pedágio. A taxa de chegada dos veículos foi medida através de vídeos disponibilizados pela organização, no qual é possível visualizar todos os veículos que chegam à praça de pedágio estudada. Foram consideradas diferentes taxas de chegadas para os dias típicos e atípicos e para os três turnos de trabalho. A Tabela 5 mostra os valores da taxa de chegada (veículo/hora).

Tabela 5 - Taxa de chegada (veículos/hora)

Turno	Dias típico	Dias atípicos			
		Corpus Christi	Nossa Senhora Aparecida	Natal	Ano novo
1°	73,41	106,41	114,28	135,22	139,27
2°	2561	619,62	446,23	597,27	631,31
3°	2563	944,71	785,89	461,84	472,62

Os valores para a velocidade inicial e desaceleração, necessários para configurar o modelo conceitual, foram extraídos de um trabalho desenvolvido por Araújo (2001) que utiliza valores determinísticos para três classes de veículos: automóveis, caminhões e ônibus. Já a distância entre os veículos parados em uma fila foi definida conforme sugerido por Obelheiro (2010), não havendo diferenciação entre as categorias de veículos. Para a modelagem foram considerados os três turnos de trabalhos, já que eles possuem composição e volumes diferentes, além de dias típicos e atípicos.

## 6.2 Implementação do modelo computacional

### 6.2.1 Construção do modelo computacional

A presente pesquisa envolveu a criação de um modelo computacional de tráfego em uma praça de pedágio através do *software* de microsimulação PTV Vissim conforme mostrado na Figura 29. Esse modelo foi criado com o objetivo de determinar qual o nível de serviço oferecido pela concessionária aos seus usuários.



Figura 29 – Tela do *software* representando a parte gráfica do modelo computacional

Para isso, foram criados dois modelos que se diferenciam na quantidade de veículos que passam pela praça de pedágio em 24 horas:

a) O primeiro modelo envolveu um volume típico, ou seja, em um dia normal o total de veículos que passaram pela praça é o considerado.

b) O segundo modelo considerou um volume atípico, ou seja, dias em que ocorreram picos ou aumentos no total de veículos que passaram pela praça no período determinado.

Para a criação do segundo modelo (b) foram considerados quatro feriados nacionais. Para a escolha desses feriados foram considerados os que tiveram o maior pico de veículos em um único dia. Esses foram: Corpus Christi, Nossa Senhora Aparecida, Natal e Ano Novo.

### 6.2.2 Calibração do modelo computacional

No modelo proposto por Montevechi *et al.* (2007) esta etapa é chamada de verificação, porém em simulação de tráfego essa etapa é comumente denominada de calibração.

Para que o modelo computacional condissesse com a realidade foi necessário realizar algumas calibrações no *software*. Os dois modelos criados, fluxo típico e atípico, tiveram dados e parâmetros calibrados de maneira idêntica. A calibração executada foi agregada, de maneira que os modelos gerados pudessem reproduzir de forma visualmente aceitável as situações de tráfego desejadas. Nas cabines de cobrança foram calibrados parâmetros de tempos de atendimento nas cabines, espaçamentos entre veículos em filas, desacelerações e velocidades esperadas.

Como já mencionado no tópico acima, a calibração dos tempos de atendimentos foi feita por meio dos dados coletados e apresentados no Capítulo 3 e elaboradas conforme a árvore de decisão apresentadas. Já os valores para velocidade, acelerações e desacelerações em praças de pedágio foram extraídos de um trabalho desenvolvido por Araújo (2001), que analisou características operacionais de praças de pedágio no estado de São Paulo. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros médios observados na desaceleração e aceleração

	Parâmetros	Classe veicular		
		Automóveis	Caminhões	Ônibus
Entrada na praça	Velocidade (km/h)	95,72	78,30	79,58
	Taxa de desaceleração (m/s <sup>2</sup> )	1,17	0,78	0,81
Saída da praça	Velocidade (km/h)	94,17	59,74	72,46
	Taxa de aceleração (m/s <sup>2</sup> )	1,13	0,45	0,65

FONTE: Adaptado de Araújo (2001)

O algoritmo de *car-following* utilizado nas modelagens apresenta diversos parâmetros de calibração, entre eles o parâmetro que regula a distância de parada entre veículos (chamado CC0), cujo valor padrão é de 1,5 metros. Obelheiro (2010) ajustou esse parâmetro para 1,2 metros, como uma forma de diminuir os espaçamentos de veículos em filas. O mesmo valor foi adotado nos modelos criados, pois representa melhor a configuração da praça de pedágio estudada.

Respeitando as distribuições de probabilidade da Tabela 4, os tempos de atendimento foram inseridos nos modelos e as calibrações necessárias realizadas. Rodadas testes foram executadas a fim de verificar visualmente o comportamento dos modelos. Os mesmos passaram a apresentar comportamentos visualmente esperados para situações de tráfego e filas, sendo considerados aptos a representar o comportamento dos veículos em praças de pedágio.

### 6.2.3 Validação do modelo computacional

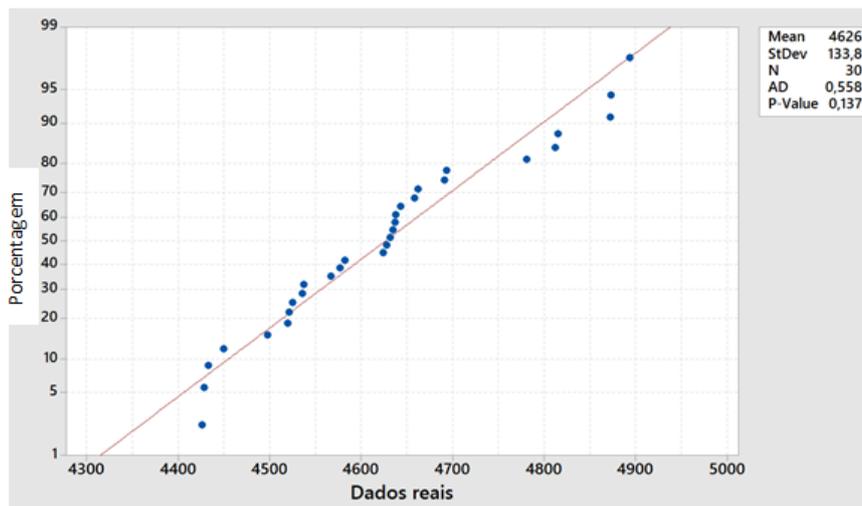
O modelo computacional foi validado por meio de dois métodos: modelo comportamental e comparação estatística entre os resultados da simulação e dados históricos. No primeiro método, a validação do modelo computacional ocorre por meio da verificação do comportamento do modelo (SARGENT, 2012). Assim, o modelo foi exposto ao gerente de arrecadação, ao analista e ao controlador da praça de pedágio estudada para verificar se o comportamento do modelo está correto ou para que sugerissem melhorias. Após a aprovação do comportamento do modelo, o outro método de validação foi aplicado.

A comparação estatística entre os resultados da simulação e os dados históricos foi realizada comparando o número de veículos que passaram na praça de pedágio durante um dia de 24 horas e a saída de veículos do projeto de simulação durante o mesmo período. Apesar de o número de veículos que deixam a praça de pedágio não ser

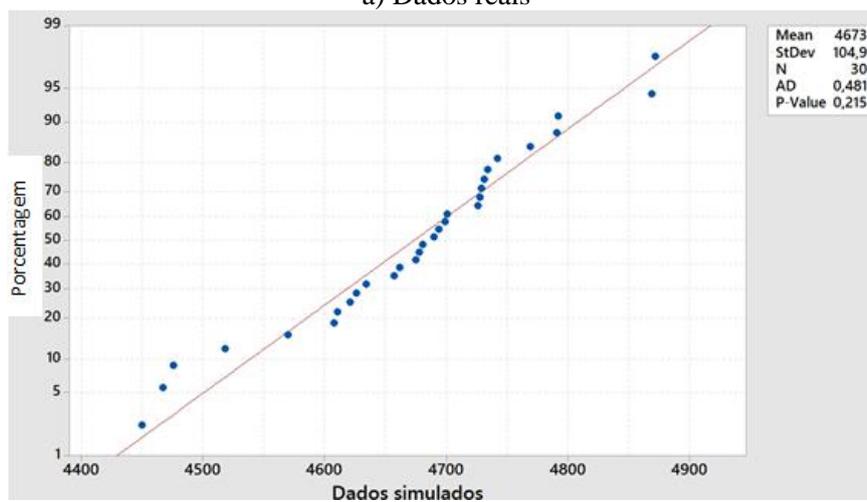
a variável que foi analisada durante a criação dos cenários, optou-se por essa variável por se tratar da única informação que a empresa tem controle e possui dados históricos.

Assim, o modelo computacional foi ajustado para simular 30 réplicas com duração de 24 horas. Os resultados obtidos com a simulação mostram que a média de veículos por dia na praça de pedágio foi de 4673 veículos e um desvio padrão de 105 carros. Os dados reais para o mesmo período foram 4626 veículos e desvio padrão de 134 veículos.

A validação estatística foi feita com dados reais e simulados, utilizando as etapas propostas por de Leal *et. al.* (2011) para a validação estatística de simulação de eventos discretos. Na primeira etapa, foi realizado o teste de normalidade (MONTGOMERY, RUNGER, 2010), usando a proposta de Anderson-Darling (ANDERSON, DARLING, 1954), com dados reais e de simulação, conforme mostrado na Figura 30.



a) Dados reais



b) Dados simulados

Figura 30 - Teste de normalidade dos dados

O resultado encontrado para o teste de normalidade de dados reais (Figura 30a) foi um *p-value* de 0,137 e o teste de normalidade de dados da simulação (Figura 30b) apresentou um *p-value* de 0,215. Ambos os resultados foram superiores ao nível de significância de 5%, o que comprova a normalidade dos dados.

Em seguida, foi realizada uma análise de variância (MONTGOMERY, RUNGER, 2010) entre dados reais e dados de simulação utilizando um teste F (SNEDECOR, COCHRAN, 1967). O teste F é um teste de hipóteses utilizado para verificar se as variâncias das duas populações são diferentes. De outra maneira, conhecida duas amostras com qualquer tamanho, o teste F dá condições para determinar se as duas amostras pertencem à mesma população.

O procedimento estatístico envolve duas populações com distribuição normal do qual são retiradas duas amostras aleatórias com variância  $\sigma^2_1$  e  $\sigma^2_2$ , no qual se elabora a seguinte hipótese:

- $H_0: \sigma^2_1 = \sigma^2_2$
- $H_1: \sigma^2_1 > \sigma^2_2$ .

Comparando o *p-value* e o nível de significância adotado  $\alpha$ , se  $p\text{-value} < \alpha$ , a Hipótese Nula ( $H_0$ ) deve ser rejeitada; caso contrário, se  $p\text{-value} > \alpha$  a Hipótese Nula deverá ser aceita (FREUND, 2006; LAPPONI, 2005; CAMPOS, 2003; NEUFELD, 2003). O teste F para os dados reais e simulados resultou em um *p-value* de 0,182, ou seja,  $p\text{-value} > \alpha$ , aceitando assim a Hipótese Nula.

Após verificar que tanto os dados reais quanto os dados simulados estão normalmente distribuídos e que existe uma similaridade entre as variâncias dos dois grupos é possível realizar o teste t. Este teste é usado para determinar se existe uma diferença estatística entre as médias dos conjuntos analisados, dado um nível de significância  $\alpha$ . O teste t tem como hipótese nula ( $H_0$ ) que as médias de ambos os conjuntos são iguais e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) aponta para a não igualdade entre as médias dos dois conjuntos.

O teste t foi realizado a um nível de significância de 5% e foi obtido um *p-value* de 0,135 (maior que 0,05) aceitando a hipótese nula de que as médias de ambos os conjuntos são iguais, validando assim o modelo de simulação.

### 6.3 Cenários simulados e análises

No projeto de simulação proposto por Montevechi *et al.* (2007), o projeto experimental ocorre após a elaboração do modelo computacional, já que nos

experimentos são utilizados dados obtidos por intermédio da simulação para verificar se existe correlação entre as variáveis estudadas. Porém, nessa pesquisa essa etapa foi antecipada para que os resultados do experimento fossem agregados ao modelo computacional, uma vez que um dos objetivos específicos da pesquisa foi verificar os fatores que influenciam no tempo de atendimento, para que esses fatores fossem incorporados à simulação, como foi exposto no Capítulo 5.

Essa antecipação só foi possível, pois diferente do projeto de simulação de Montevechi *et al.* (2007), foram utilizados dados reais no experimento e não simulados. Essa antecipação foi a principal alteração realizada para adaptar o modelo de simulação a eventos discretos proposto pelos autores a um projeto de simulação voltada para tráfego rodoviário.

O resultado da aplicação do DOE mostrou que os fatores que influenciam de forma negativa o tempo de atendimento foram à “categoria dos veículos”, a “forma de pagamento”, o “sexo do arrecadador” e o “turno” de trabalho. Assim, para a simulação foram considerados apenas esses fatores, desconsiderando o fator dia da semana, já que não mostrou ser um fator significativo.

Atualmente as cabines de cobrança manual são responsáveis por realizar a cobrança de 66% do total de veículos que trafegam pela praça de pedágio, sendo essa forma de cobrança a principal da empresa. Através da Figura 31 é possível visualizar um retrato do funcionamento do modelo computacional com as cinco vias de cabines de cobrança manual. Os pontos coloridos na imagem representam os veículos se aproximando da cabine de arrecadação e deixando a praça de pedágio.

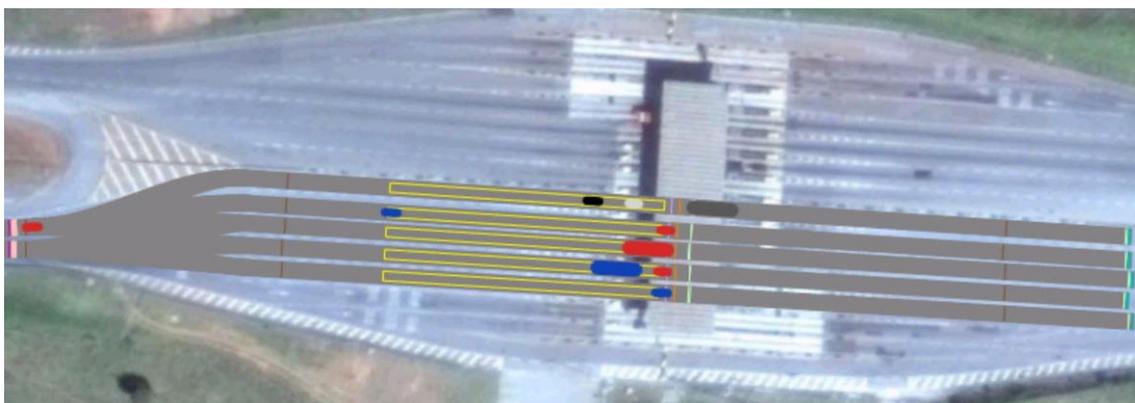


Figura 31 – Representação da praça de pedágio no *software* de simulação PTV VISSIM

A fim de verificar como a praça se comporta sobre a influência dos fatores analisados no Capítulo 5, através do *Design of Experiments*, e como tais fatores afetam o

nível de serviço, seis cenários foram criados no projeto de simulação (ou sete se for considerada a situação real). Ou seja, foram criados 6 cenários que se diferenciam nos fatores “categoria do veículo”, “turno”, “forma de pagamento” e “sexo do arrecadador” para analisar o comportamento do sistema. Para maiores informações desses fatores, verifique a Figura 21. Os cenários criados foram:

- a) **Situação real:** este cenário retrata a configuração normal da via, com todas as formas de pagamento (Grupo A: dinheiro com troco, cartão e vale; Grupo B: dinheiro sem troco); categoria de veículos (Grupo A: categoria 1, 3, 7 e 9; Grupo B: categoria 2, 4, 5, 6, 8 e Especial) e sexo dos arrecadadores (Feminino e Masculino );
- b) **Cenário 1:** considera que a única forma de pagamento é com dinheiro e sem troco (Forma de pagamento Grupo B);
- c) **Cenário 2:** envolve apenas arrecadadores do sexo masculino atendendo na praça;
- d) **Cenário 3:** considera que todos os arrecadadores na praça de pedágio são do sexo feminino;
- e) **Cenário 4:** verificou o comportamento do sistema se só trafegassem na praça de pedágio os veículos do tipo cat 1, cat 3, cat 7 e cat 9 (Categoria de veículos Grupo A);
- f) **Cenário 5:** foi adotado que a única forma de pagamento seria com dinheiro e sem troco (Forma de pagamento Grupo B) e que só haveria arrecadadores do sexo masculino;
- g) **Cenário 6:** considerou que o pagamento é feito apenas com dinheiro e sem troco (Forma de pagamento Grupo B), todos os arrecadadores são do sexo masculino e só trafegam veículos cat 1, 3, 7 e 9 (Categoria de veículos Grupo A).

Para facilitar a visualização dos cenários descritos anteriormente, foi elaborado o Quadro 2 que mostra, por meio de imagens, um resumo de todas as informações de cada cenário.

Quadro 2 - Resumo dos cenários analisados

Cenários	Categoria do veículo	Forma de pagamento	Sexo do arrecadador
Situação real			
Cenário 1			
Cenário 2			
Cenário 3			
Cenário 4			
Cenário 5			
Cenário 6			

Imagem	Fator	Grupo	Conteúdo
	Categoria dos veículos	A	Veículos cat 1, 3, 7 e 9
	Categoria dos veículos	B	Veículos cat 2, 4, 5, 6, 8 e Especial
	Forma de pagamento	A	Dinheiro com troco, cartão e vale
	Forma de pagamento	B	Dinheiro sem troco
	Sexo do arrecadador	-	Feminino
	Sexo do arrecadador	-	Masculino

Os cenários foram criados com base nos tempos de atendimento de cada fator. Por exemplo, o cenário 6 aborda as melhores condições já que foram considerados apenas os fatores que tem um baixo tempo de atendimento. Os cenários 2 e 3 buscaram elucidar o comportamento da praça de pedágio em relação ao sexo dos arrecadadores, se o uso de apenas um dos sexos apresenta resultados significativos. O cenário 1 buscou evidências de que a forma de pagamento também pode influenciar positivamente na qualidade dos serviços ofertados.

Os sete cenários foram aplicados para os dois tipos de fluxo que ocorrem na praça de pedágio, o típico e atípico. Como já mencionado para a simulação de um dia atípico foram selecionados quatro feriados: Corpus Christi, Nossa Senhora Aparecida (padroeira do Brasil), Natal e Ano novo. Para todos os feriados foram levados em

consideração à taxa de chegada (Tabela 5) e a composição de cada ramo da árvore de decisão (Figura 28). Devido à diferença do volume de veículos em cada turno, todos os cenários foram simulados nos três turnos a fim de garantir uma maior proximidade com a realidade.

Para verificar a probabilidade de ocorrência de um dos seis níveis de serviço propostos por Lin e Su (1994), foi necessário configurar o *software* de simulação PV VISSIM para fornecer o tempo que cada veículo permaneceu no sistema no período simulado (8 horas). Possuindo essa informação foi calculada a quantidade de veículos que ficaram nos intervalos de tempo estipulados pelos autores (Tabela 3). O *software* também foi configurado para fornecer o total de veículos que passaram pela praça de pedágio durante o mesmo período de 8 horas. Em posse dessas informações foi possível verificar a representatividade de cada nível de serviço na simulação tanto de dias típicos quanto de dias atípicos, como poderá ser observado nos tópicos a seguir.

### 6.3.1 Fluxo Típico

Nesta simulação foi considerado um volume normal de veículos, ou seja, um dia típico na praça de pedágio. Também foram consideradas 20 réplicas no projeto de simulação. Para analisar o nível de serviço da praça nestas condições foi utilizada a escala proposta por Lin e Su (1994), que considera o tempo, em segundos, que cada veículo permanece no sistema (salientando que o tempo no sistema inclui o tempo na fila e o tempo de atendimento).

#### 6.3.1.1 Situação real

Para a situação real os resultados mostram que o nível de serviço para o turno 1 é o nível D, ou seja, o veículo permanecer de 45 a 60 segundos no sistema. A probabilidade de um veículo ficar nesse intervalo de tempo no turno 1 em um dia de fluxo normal é de 29% sendo a probabilidade de um veículo ficar mais de 60 segundos na praça de pedágio de 33%. Ou seja, a probabilidade da praça de pedágio oferecer um serviço de nível E ou F é de 33%.

Para os outros dois turnos, o mesmo nível de serviço foi observado, o nível D, sendo a probabilidade de ocorrência desse nível de serviço 29% para o turno 2 e 30% para o terceiro turno. Já a probabilidade para esses turnos de um veículo ficar mais de 60 segundos aumenta para 60%. Esses resultados e os valores encontrados para os outros níveis de serviço encontram-se na Figura 32.

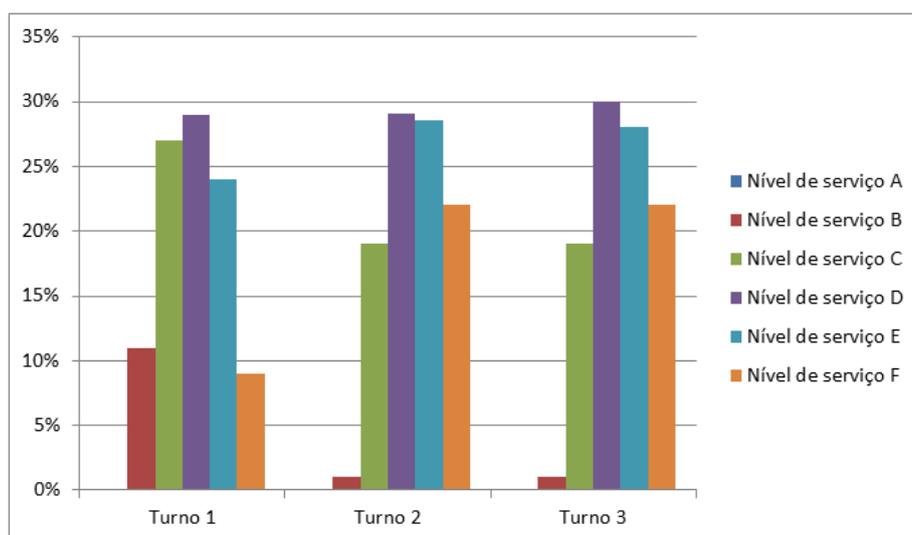
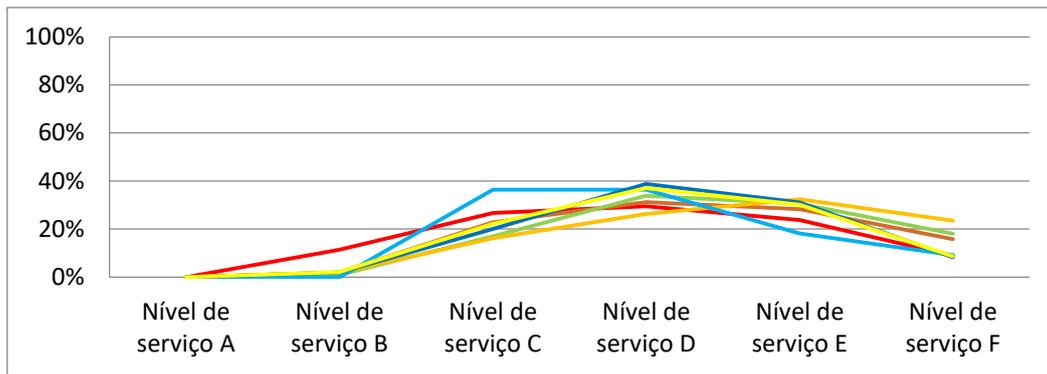


Figura 32 - Nível de serviço para um fluxo normal

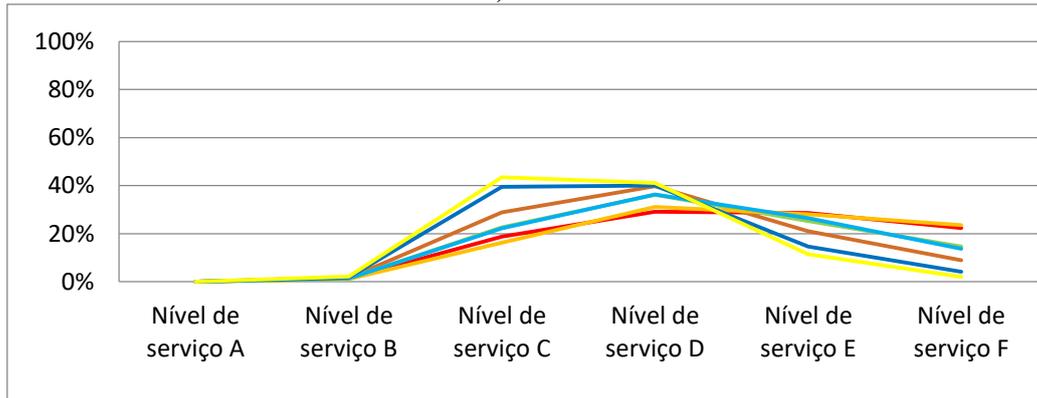
A Figura 32 representa a probabilidade de um veículo ficar no sistema conforme os níveis de serviço estipulados por Lin e Su (1994). Dessa maneira, verifica-se na figura que o nível de serviço A, no qual um veículo permanece no sistema por 15 segundos ou menos não foi observado e que a maioria dos veículos estão distribuídos entre os níveis B, C e D. Porém, os autores que criaram essa escala comentam que os níveis bons de serviço se limitam até o cenário C, sendo os próximos cenários considerados insatisfatórios para o usuário, pois a partir do cenário C os motoristas já começam a se sentir incomodados com as filas e atrasos no atendimento.

#### 6.3.1.2 Cenários simulados

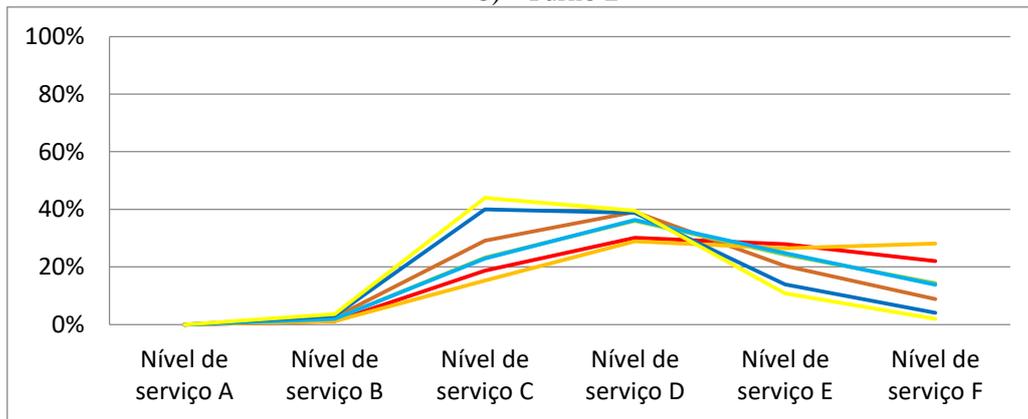
Os níveis de serviço foram avaliados para cada turno, considerando o volume de veículos em dias típicos, ou seja, fora de feriados. Os resultados encontrados para cada cenário simulado estão representados na Figura 33.



a) Turno 1



b) Turno 2



c) Turno 3

**Legenda:**

- Situação real
- Pagamento dinheiro sem troco
- Apenas homem
- Apenas mulher
- Apenas veículos Grupo A
- Pagamento dinheiro sem troco e apenas homens
- Pagamento dinheiro sem troco, apenas homens e veículos do grupo A

Figura 33 - Nível de serviço para fluxo típico nos turnos 1, 2 e 3

Considerando o turno 1, da Figura 33a, os cenários criados não trouxeram muitos benefícios, se considerado o nível de serviço oferecido pela companhia. Em

praticamente todos os cenários o nível de serviço D continua sendo o oferecido. Porém, quando considerado apenas arrecadadores do sexo feminino, cenário 3, houve uma queda na qualidade do serviço para um nível E, com uma probabilidade de 30%, enquanto que antes a probabilidade do nível E era de 24%. A primeira linha da Figura 33a, chamada “situação real” mostra os valores encontrados para a simulação com as configurações originais, ou seja, antes das modificações. O único cenário em que benefícios foram encontrados foi para a alteração na qual foi considerado que apenas veículos do grupo A trafegam pela praça de pedágio, ou seja, cenário 4. Para essa alteração os níveis de serviço C e D estão com a mesma probabilidade de ocorrência, 36%. Também houve uma redução da probabilidade do veículo permanecer na praça de pedágio por mais de 60 segundos, caindo de 33% para 27%.

Para o turno 1 não houve diferenças significativas, mas no turno 2 (Figura 33b) houve aumentos significativos no nível de serviço oferecido. O cenário 3 foi o único que não apresentou melhoras no nível de serviço oferecido. Na realidade, houve um aumento da probabilidade de ocorrência do nível de serviço F, que subiu de 22% para 24%. Para o Turno 2 o cenário que mais se destacou foi o 6, no qual ocorre pagamento apenas com dinheiro e sem troco, somente veículos do grupo A e arrecadadores do sexo masculino. Com essa configuração, o nível de serviço oferecido passou do nível D, com probabilidade de 29% de ocorrência, para o nível C, com 43% de chance de ocorrer. Todos os outros cenários, com exceção do 3, mantiveram o nível de serviço D, porém com aumento da probabilidade de ocorrência desse nível e queda da ocorrência dos níveis E e F.

O mesmo fenômeno observado no turno 2 ocorreu no turno 3 (Figura 33c). Do turno 2 para o turno 3 há um aumento de 4% da probabilidade de ocorrência do nível F quando apenas mulheres são responsáveis pela arrecadação. Os outros cenários permanecem iguais, com exceção do cenário 5, que também passou a apresentar o nível de serviço C como o de maior probabilidade de ocorrência, 40%.

### 6.3.2 Fluxos atípicos

Em um segundo momento, foram simulados fluxos atípicos na praça de pedágio, ou seja, considerando a ocorrência de um aumento significativo no número de veículos que passam pela praça de pedágio, em um pequeno período de tempo. Esse aumento no número de veículos foi devido à ocorrência de feriados. Dessa maneira, o objetivo foi verificar como o nível de serviço da praça de pedágio é afetado pelo aumento do

número de veículos. Para isso, foram considerados os maiores picos que ocorreram no ano de 2016. Tais aumentos foram nos feriados de: Corpus Christi (maio); Nossa Senhora Aparecida, padroeira do Brasil (outubro); natal (dezembro) e ano novo (dezembro). Os resultados obtidos para cada feriado encontram-se dispostos a seguir.

#### 6.3.2.1 Feriado de Corpus Christi

O feriado de Corpus Christi acontece no mês de maio e foi o feriado com o maior aumento do número de veículos na praça de pedágio estudada. Nesse feriado circularam cerca de doze mil veículos em um único dia.

##### 6.3.2.1.1 Situação real

No primeiro turno, a probabilidade de um veículo permanecer na praça de pedágio por mais de 60 segundos foi de 55%. Sendo a probabilidade de um veículo ficar no sistema entre 60 e 80 segundos de 32%, revelando que o nível de serviço oferecido pela concessionária nesse turno foi o nível E.

No segundo turno, a probabilidade de um veículo ficar mais de 80 segundos na praça de pedágio foi de 87%. As chances de um veículo permanecer menos de 45 segundos na praça é de apenas 2%. Dessa maneira, o nível de serviço oferecido pela concessionária no segundo turno foi o nível E, assim como no primeiro.

O mesmo nível de serviço, nível E, foi observado no terceiro turno, porém a probabilidade de um veículo ficar mais de 80 segundos na praça de pedágio aumentou para 95%, como pode ser visualizado na Figura 34. Já a probabilidade de um veículo permanecer menos que 45 segundos no sistema caiu para 1%.

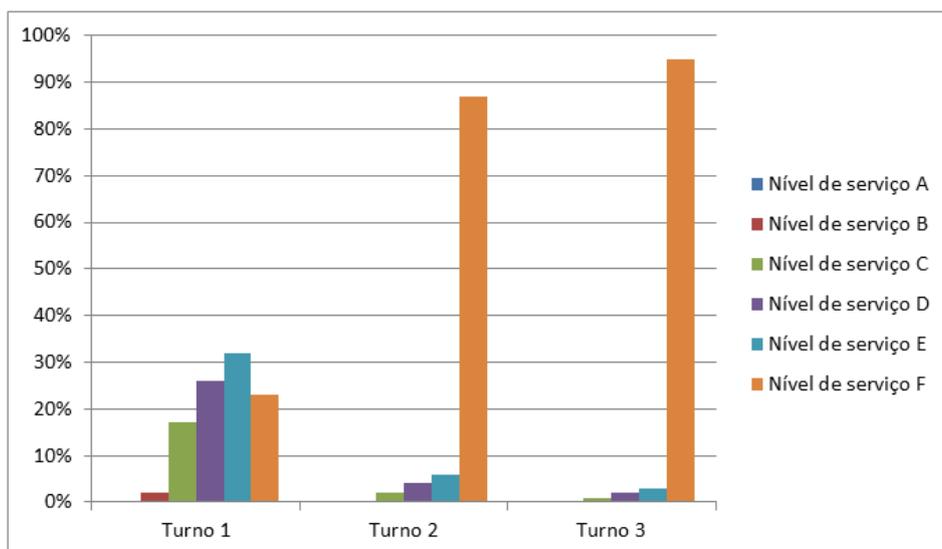
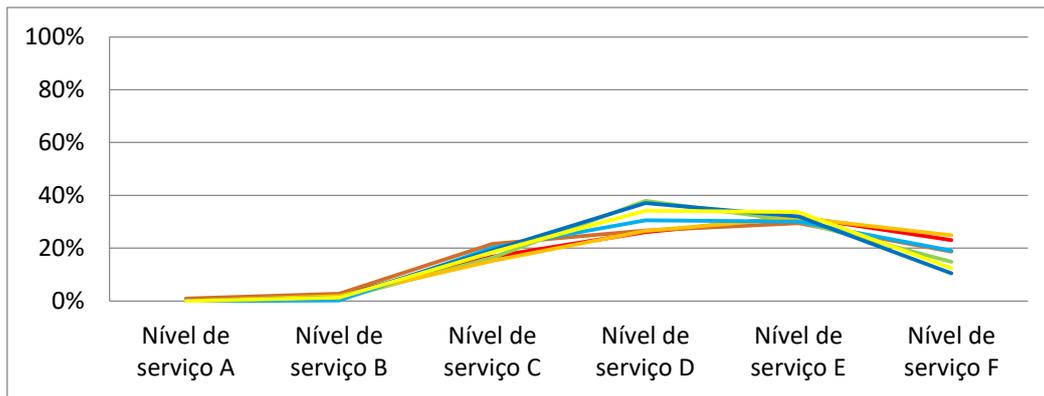


Figura 34 - Nível de serviço no feriado de Corpus Christi

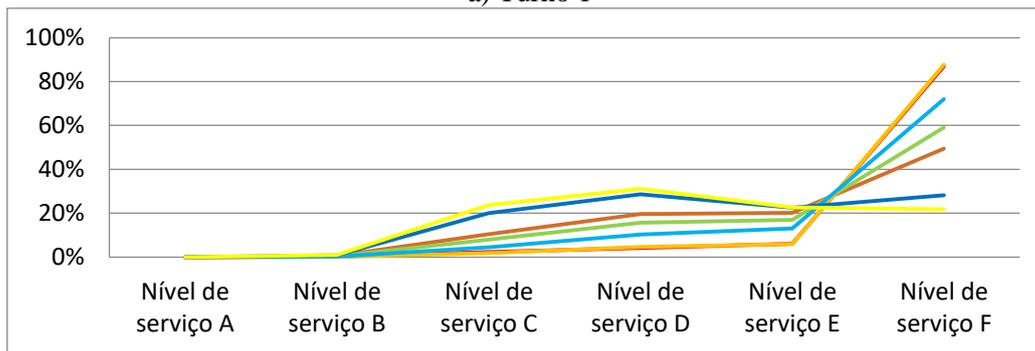
Como observado na Figura 34, os níveis de serviço oferecido no feriado de Corpus Christi encontram-se críticos, principalmente nos turnos 2 e 3, que compreendem o período das 06h até às 22h. Este nível de serviço é considerado inaceitável para a maioria dos motoristas, já que enfrentam grandes atrasos (OLIVEIRA, 2009; KLODZINSKI; AL-DEEK, 2002a; ZARRILLO, 1998; WOOL; HOEL, 1991).

#### 6.3.2.1.2 Cenários simulados

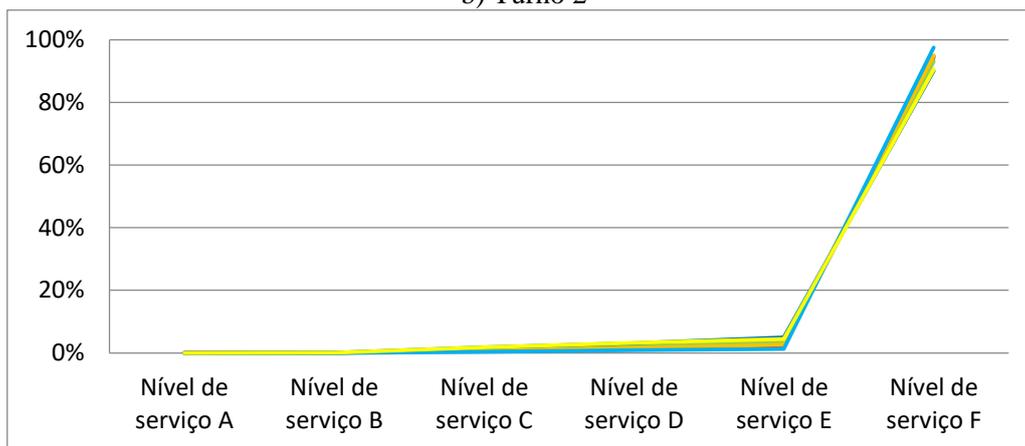
Os níveis de serviço foram avaliados para cada turno, conforme foi realizado para os dias típicos, gerando os resultados apresentados na Figura 35.



a) Turno 1



b) Turno 2



c) Turno 3

Legenda:

- Situação real
- Pagamento dinheiro sem troco
- Apenas homem
- Apenas mulher
- Apenas veículos Grupo A
- Pagamento dinheiro sem troco e apenas homens
- Pagamento dinheiro sem troco, apenas homens e veículos do grupo A

Figura 35 - Nível de serviço no feriado de Corpus Christi nos turnos 1, 2 e 3

No turno 1 (Figura 35a) houve uma melhora significativa dos níveis de serviço em todos os cenários simulados. Na situação real o nível de serviço era E com

probabilidade de ocorrência de 32%, nos demais cenários houve uma melhoria, sendo o nível D o de maior probabilidade de ocorrência. Salvo duas exceções, os cenários 1 e 3, em ambos os casos o nível de serviço permaneceu o mesmo, nível E. No gráfico da Figura 35a fica evidente que o cenário que mais se destacou neste turno foi o 5. Neste cenário a probabilidade de um veículo ficar mais de 60 segundos no cenário é de 42%, enquanto que nos outros cenários, inclusive o real, essa probabilidade está acima de 45%.

O segundo turno (Figura 35b) foi o que apresentou as mudanças mais significativas, se comparado com os turnos 1 e 3. Nesse turno, a situação real apresentava um nível de serviço F, porém foi possível observar que o nível de serviço D foi alcançado em dois cenários simulados: cenário 5 e 6. Neste turno também se destaca o cenário em que apenas arrecadadores do sexo feminino foram considerados, cenário 3. Este cenário ficou igual à situação real, tanto é que sua linha se sobrepôs a linha da situação real.

O terceiro turno, apresentado na Figura 35c, foi o que o menos apresentou diferenças entre os cenários simulados. É possível verificar que as linhas estão quase sobrepostas, sendo as principais diferenças nos níveis de serviço E e F. Os cenários 5 e 6 foram os que tiveram a maior redução da probabilidade de ocorrência do nível de serviço F. Na situação real essa probabilidade é de 95%, já para estes dois cenários a probabilidade caiu para 90%.

#### 6.3.2.2 Feriado de Nossa Senhora Aparecida

O feriado de Nossa Senhora Aparecida, padroeira do país, ocorre no meio do mês de outubro e antecede o dia dos professores. Esse feriado é conhecido popularmente como “semana do saco cheio”. Geralmente nesse feriado as escolas fornecem uma semana de folga para os alunos, o que faz com que aumente o número de viagens no país, pois além do descanso para os alunos, o feriado de Nossa Senhora Aparecida é um feriado nacional. Esse feriado, dos quatro analisados, foi o que teve o menor fluxo de veículos, mas ainda sim com um volume significativo se considerado um dia normal na praça de pedágio estudada.

### 6.3.2.2.1 Situação real

Nesse feriado o nível de serviço com maior probabilidade de ocorrer no turno 1 foi o nível E, com uma probabilidade do veículo ficar entre 60 e 80 segundos de 29% conforme observado na Figura 36.

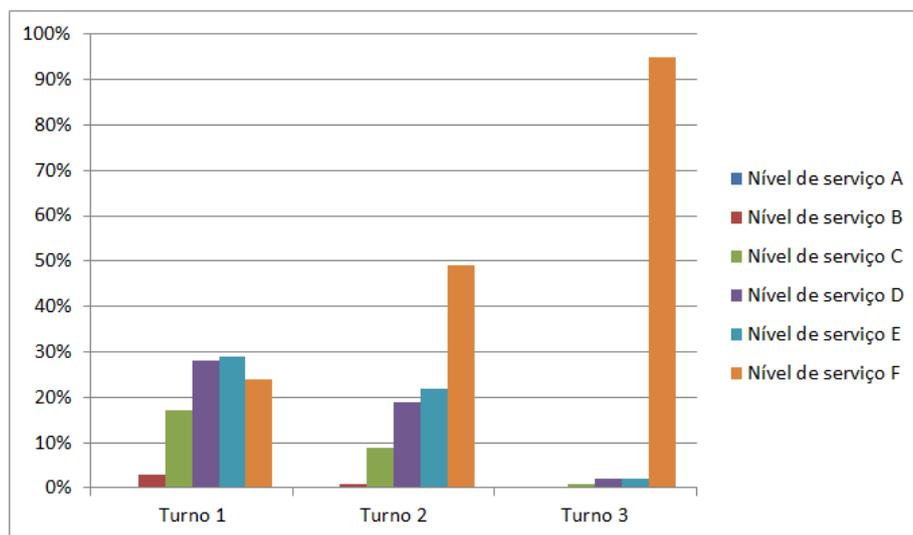
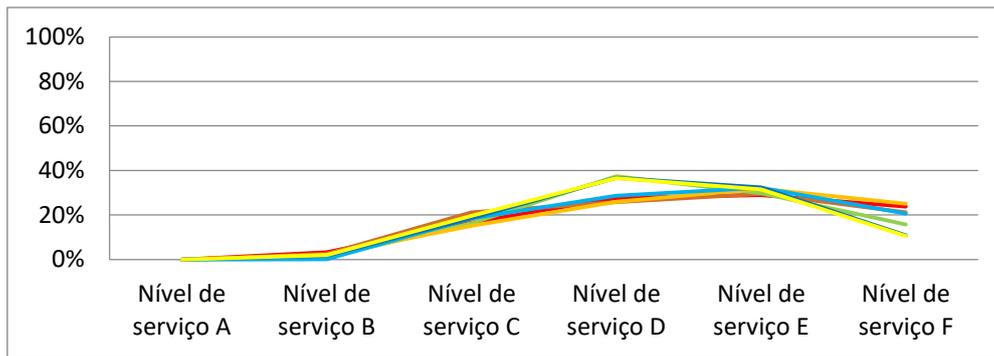


Figura 36 - Nível de serviço para no feriado de Nossa Senhora Aparecida

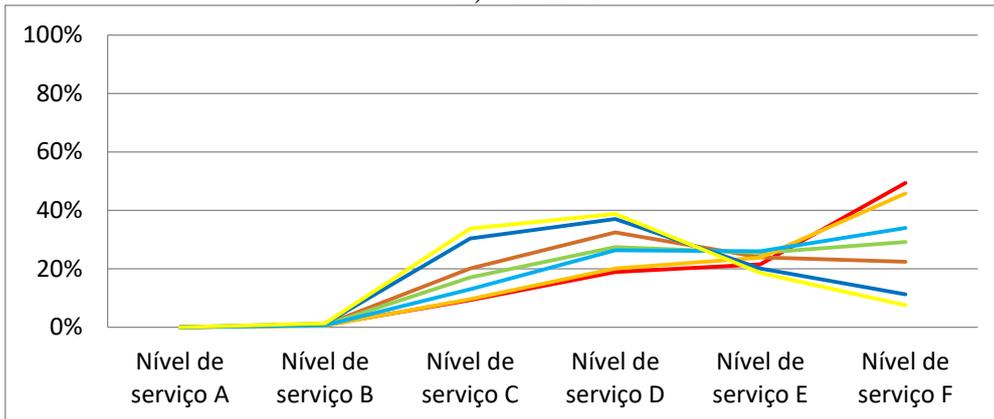
Já nos outros dois turnos, o nível de serviço F foi o que mais se destacou, ou seja, a probabilidade de um veículo ficar mais do que 80 segundos no sistema é de 49% e 95% respectivamente. Observa-se na figura que o turno 3 é o que mais se destaca no que diz respeito aos níveis de serviço.

### 6.3.2.2.2 Cenários simulados

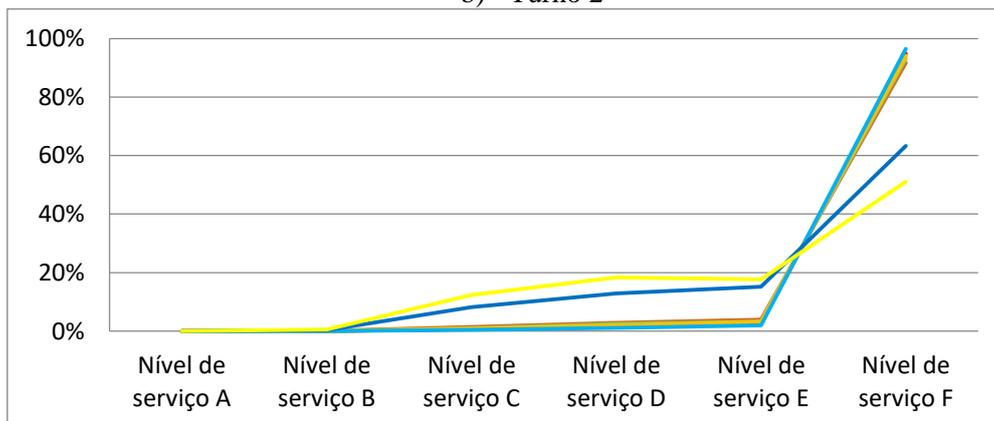
A Figura 37 apresenta os cenários simulados para este fluxo atípico do Feriado de Nossa Senhora Aparecida. Durante o feriado de Nossa Senhora Aparecida, o nível E foi o que mais se destacou na situação real, com probabilidade de ocorrência de 29%. Os cenários 2, 5 e 6, do turno 1 tiveram o nível de serviço D como o que mais se destacou, com uma probabilidade de ocorrência de 37%, conforme mostrado na Figura 37a.



a) Turno 1



b) Turno 2



c) Turno 3

Legenda:

- Situação real
- Pagamento dinheiro sem troco
- Apenas homem
- Apenas mulher
- Apenas veículos Grupo A
- Pagamento dinheiro sem troco e apenas homens
- Pagamento dinheiro sem troco, apenas homens e veículos do grupo A

Figura 37 - Nível de serviço no feriado de Nossa Senhora Aparecida nos turnos 1, 2 e 3

Ainda no turno 1 (Figura 37a), apesar dos outros cenários terem permanecido no nível de serviço E, a probabilidade de um veículo ficar no sistema mais de 80 segundos,

ou seja, apresentar um nível de serviço F caiu. Com exceção do cenário 3 que foi o único em que a probabilidade de um veículo ficar mais de 80 segundos no sistema aumentou em 1% se comparado a situação real.

O cenário que mais se destacou no turno 2 (Figura 37b) foi o cenário 6, com uma probabilidade de 39% de um veículo ficar no sistema entre 45 e 60 segundos, nível de serviço D. O mesmo pode ser observado para o cenário 5. Todos os cenários apresentaram uma redução na probabilidade de ocorrência do nível de serviço F, ou seja, permanecer por mais de 80 segundos no sistema. Na situação real a probabilidade de ocorrência desse cenário é de 49%, já nos outros cenários é menor que 46%, sendo a menor probabilidade de ocorrência do cenário 6 com probabilidade de 8% de ocorrência.

O turno 3 (Figura 37c) apresentou poucas melhoras nos cenários simulados. As linhas que mostram os cenários simulados quase se sobrepõem umas as outras, mostrando que não houve muitas diferenças entre os cenários simulados e o real. Destacam-se apenas os cenários 5 e 6 no qual é visível uma redução da probabilidade de ocorrência do nível de serviço F e um aumento da probabilidade do nível de serviço D e E.

### 6.3.2.3 Feriado de Natal

Apesar do feriado do Natal ter ocorrido no final de semana, a praça de pedágio teve um fluxo de aproximadamente onze mil veículos em um dia, indicando que apesar de não ter sido um feriado prolongado houve um aumento significativo no número de veículos que passaram pela praça de pedágio.

#### 6.3.2.3.1 Situação real

O nível de serviço que mais se destacou no feriado de Natal foi o E, com uma probabilidade do veículo ficar entre 60 a 80 segundos no sistema de 32%, sendo as chances de um veículo ficar menos de 30 segundos no sistema de 3%. Já nos turnos 2 e 3 a probabilidade de ficar mais de 80 segundos foi de 81% e 94% respectivamente, ocorrendo 0% de probabilidade de ficar menos que 30 segundos no sistema conforme é mostrado na Figura 38.

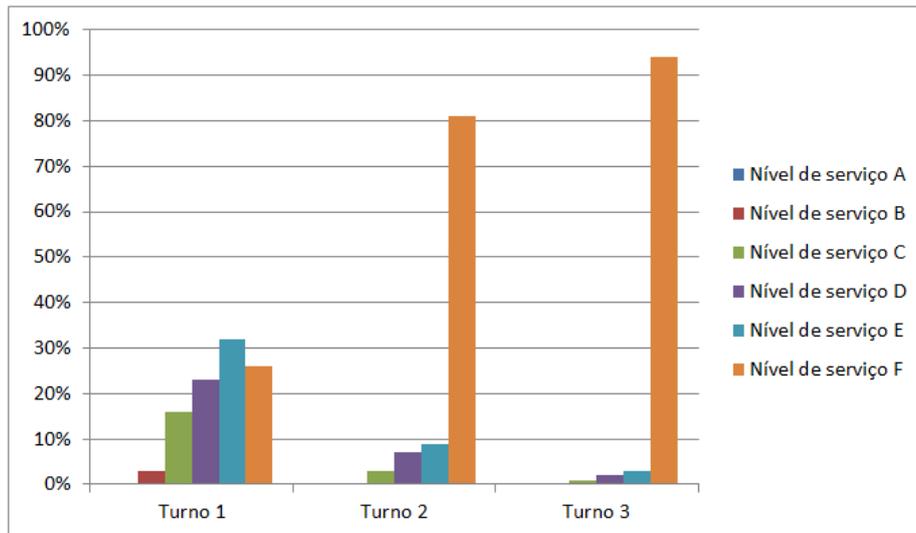
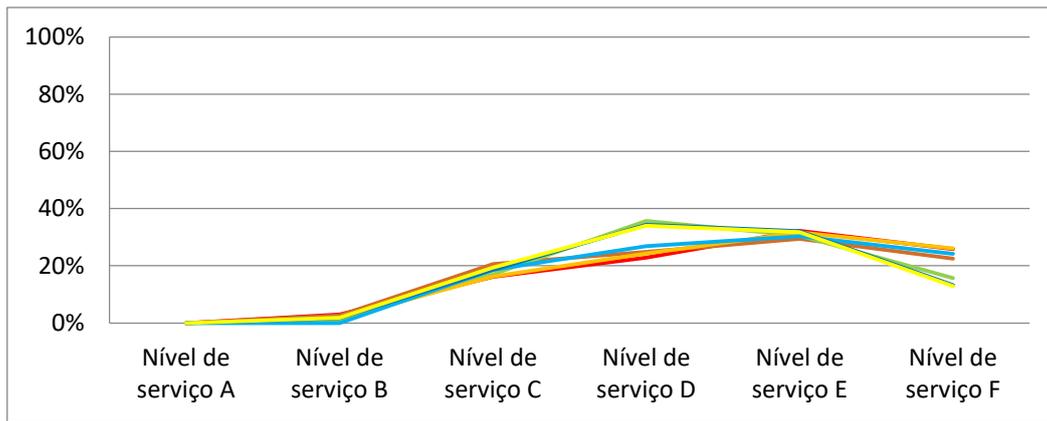


Figura 38 - Nível de serviço no feriado de Natal

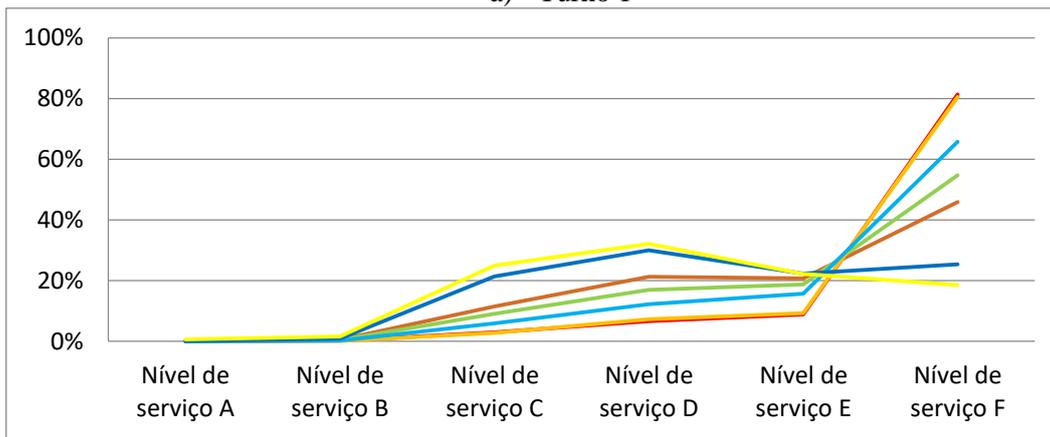
Por meio da Figura 38 fica claro que os níveis de serviço deixam a desejar no que diz respeito aos parâmetros estabelecidos por Lin e Su (1994), causando desconforto aos usuários nesse feriado, principalmente nos turnos 2 e 3.

#### 6.3.2.3.2 Cenários simulados

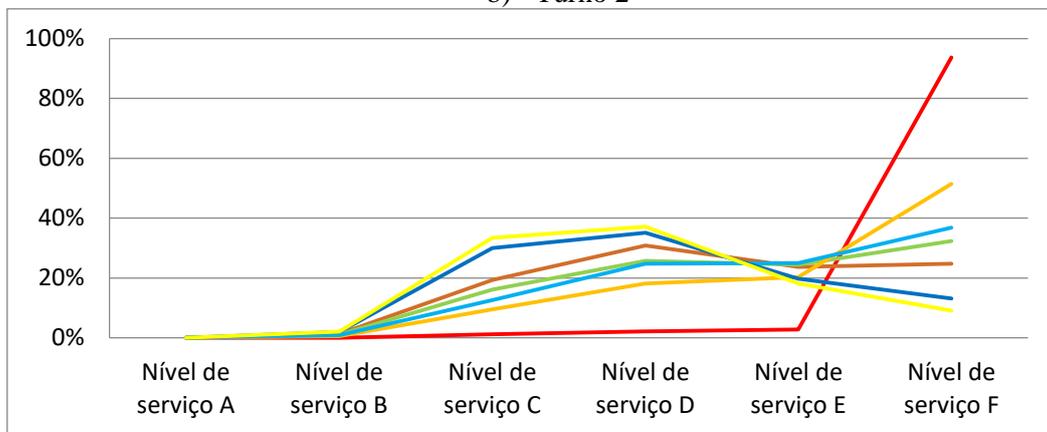
Neste feriado foi possível observar que em alguns casos os níveis de serviço tiveram um aumento significativo. A Figura 39 apresenta os cenários simulados para o fluxo atípico do Feriado de Natal.



a) Turno 1



b) Turno 2



c) Turno 3

Legenda:

- Situação real
- Pagamento dinheiro sem troco
- Apenas homem
- Apenas mulher
- Apenas veículos Grupo A
- Pagamento dinheiro sem troco e apenas homens
- Pagamento dinheiro sem troco, apenas homens e veículos do grupo A

Figura 39 - Nível de serviço no feriado de Natal nos turnos 1, 2 e 3

Analisando o Turno 1, Figura 39a, o nível de serviço E foi o que teve a maior probabilidade de ocorrer na situação real, o mesmo nível foi observado nos cenários 1, 3 e 5 como o mais provável de ocorrer, com 29%, 32% e 30% de chances de ocorrência respectivamente. Para os cenários 2, 5 e 6 a probabilidade de um veículo permanecer no sistema menos de 45 segundos é de aproximadamente 55%, enquanto que na situação real essa probabilidade é de 42%. O cenário 3 foi o que mais se aproximou da situação real conforme observado pela sobreposição das linhas vermelha e laranja.

Para o turno 2, Figura 39b, o cenário 6 foi o que mais se destacou, enquanto que no real a probabilidade de um veículo ficar mais de 80 segundos no sistema é de 81%, no cenário 6 esse valor cai para 19%, sendo o nível de serviço D o mais representativo, com probabilidade de ocorrência de 32%. Os cenários 3 e 4 foram os que mais se aproximaram do real, sendo a probabilidade de um veículo ficar menos de 45 segundos no sistema de 10% para os cenários real e 3, e de 16% para o cenário 4.

No turno 3, Figura 39c, todos os cenários, sem exceções, tiveram uma redução da probabilidade de ocorrência do nível de serviço F. É possível visualizar o pico que a linha vermelha apresenta no ponto desse nível de serviço. O mesmo pico não é visualizado pelas outras linhas que representam cada cenário, sendo a linha laranja (cenário 3) a que mais se aproxima, mas mesmo ela possui uma diferença de 43%. Os cenários que mais se destacaram foram os cenários 5 e 6, sendo que no cenário 6 a probabilidade de um veículo permanecer no sistema por menos de 45 segundos é de 35%. Essa probabilidade para a situação real é de 1%, ou seja, houve um aumento de 34% das chances de ocorrer os níveis de serviço A, B ou C.

#### 6.3.2.4 Feriado de Ano Novo

O feriado do Ano novo também ocorreu em um final de semana e o volume de veículos foi menor que no feriado de Natal e Corpus Christi, entretanto nesse feriado observou-se um volume de dez mil veículos em um único dia. Porém os níveis de serviço foram os mesmos dos outros feriados, conforme mostrados a seguir.

##### 6.3.2.4.1 Situação real

O nível de serviço E foi o que se destacou no turno 1, com uma probabilidade de ocorrer de 30%, conforme mostrado na Figura 40. Enquanto que nos turnos 2 e 3 a probabilidade de um veículo permanecer mais de 80 segundos no sistema foi de 83% e 54% respectivamente.

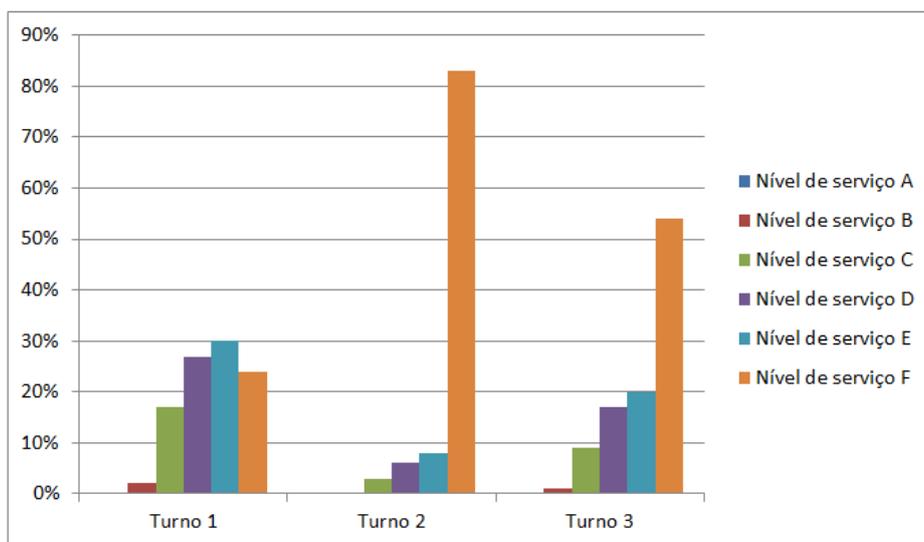
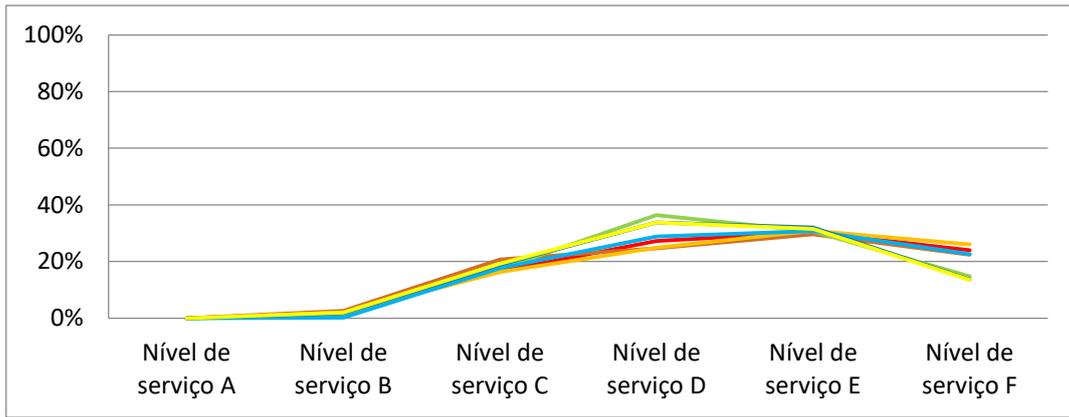


Figura 40 - Nível de serviço no feriado de Ano Novo

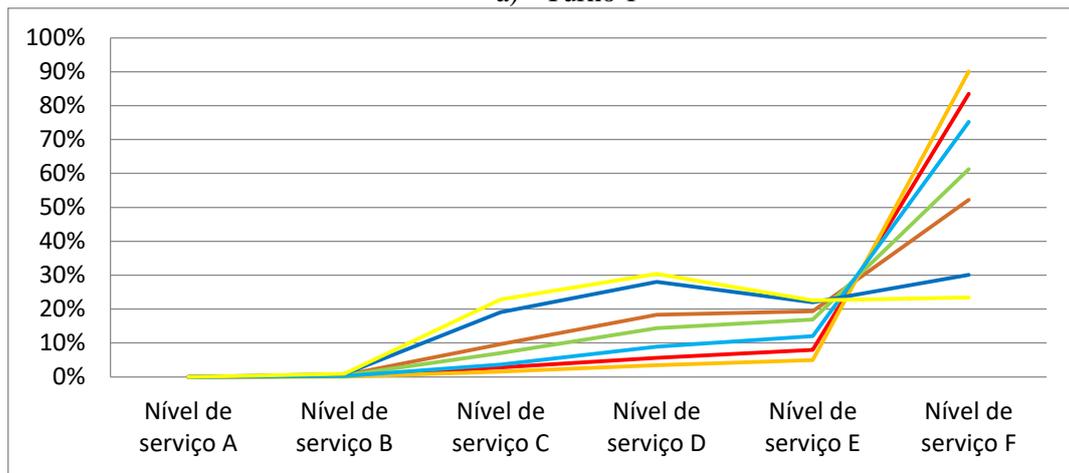
É possível verificar pela Figura 40 que o feriado do Ano novo foi o único em que o segundo turno teve uma maior probabilidade de um nível de serviço F do que o terceiro turno. Nos outros feriados o turno que mais se destacava com o pior nível de serviço era o terceiro, caso esse não observado no Natal.

#### 6.3.2.4.2 Cenários simulados

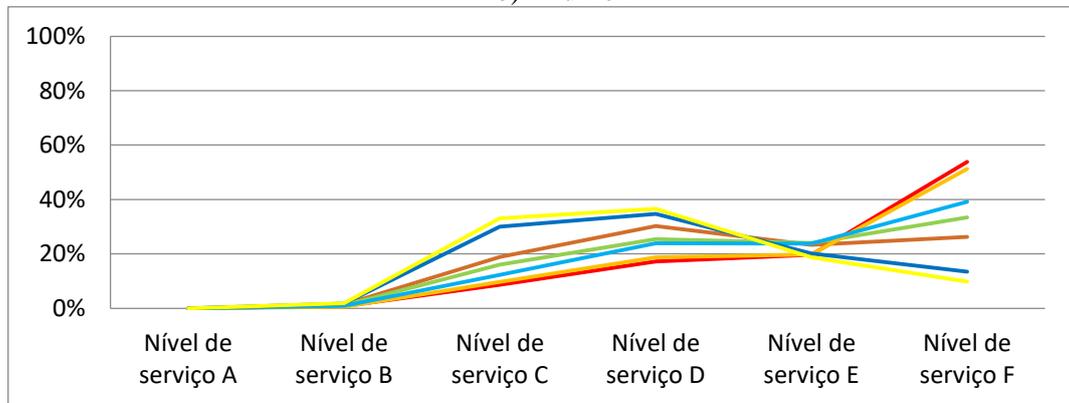
A Figura 41 apresenta os cenários simulados para o fluxo atípico do Feriado de Ano Novo.



a) Turno 1



b) Turno 2



c) Turno 3

Legenda:

- Situação real
- Pagamento dinheiro sem troco
- Apenas homem
- Apenas mulher
- Apenas veículos Grupo A
- Pagamento dinheiro sem troco e apenas homens
- Pagamento dinheiro sem troco, apenas homens e veículos do grupo A

Figura 41 - Nível de serviço para o feriado de Ano Novo nos turnos 1, 2 e 3

No primeiro turno do feriado de Ano Novo verificou-se que a situação real o nível de serviço oferecido era o E, ou seja, um veículo ficar no sistema entre 60 e 80 segundos. Esse nível se manteve nos cenários 1, 3 e 4 de acordo com a Figura 41a. Os cenários 2, 5 e 6, o nível de serviço oferecido foi o D. Para esses cenários a probabilidade de um veículo ficar mais de 60 segundos é de aproximadamente 46%, já na situação real essa probabilidade é de 54%. Além disso, também foi observado nesses cenários um aumento de cerca de 3% da probabilidade de um veículo ficar menos de 45 segundos.

O mesmo fenômeno que ocorreu no primeiro turno foi observado no segundo, o cenário 3, que é composto apenas por arrecadadores do sexo feminino, se mostrou pior do que a situação real no quesito nível de serviço. Como pode ser notada na Figura 41b a linha laranja, que representa o cenário 3, tem um pico maior no nível de serviço F e menor no nível de serviço C, D e E. Assim como o ocorrido no turno 1, os destaques são para os cenários 5 e 6. Porém vale destacar o cenário 1 que aborda apenas pagamento com dinheiro e sem troco. Apesar de continuar a oferecer um nível de serviço F, houve uma queda de 31% na probabilidade de ocorrência desse nível que antes era de 83% e passou para 52%.

No terceiro turno, todos os cenários simulados apresentaram melhoras em relação a situação real como pode ser visualizado na Figura 41c. Para esse turno, os cenários 2, 3 e 4 mantiveram o mesmo nível de serviço que o real, nível F. Já os cenários 1, 5 e 6 apresentaram um nível de serviço D. Todos os cenários não só apresentaram uma queda na probabilidade de um nível de serviço F como tiveram um aumento da ocorrência do cenário B, C e D. No cenário 6, a probabilidade de um veículo ficar no sistema por menos de 45 segundos é de 35%, de ficar entre 45 e 60 segundos de 37% e mais de 60 segundos a probabilidade é de 29%.

#### **6.4 Conclusões e recomendações do capítulo**

Um dos objetivos desse capítulo foi testar a utilização do projeto de simulação a eventos discretos proposto por Montevechi *et al.* (2007) em um problema de simulação de tráfego. Esse objetivo foi alcançado, sendo necessárias apenas algumas modificações no projeto original, como a antecipação da etapa de definição do projeto experimental, uma vez que os resultados desse tópico foram necessários para a elaboração da simulação computacional. A outra modificação realizada foi em relação à nomenclatura de uma etapa que no projeto de simulação proposto pelos autores é chamada de

verificação e na pesquisa aqui desenvolvida foi chamada de calibração do modelo computacional. O projeto de simulação a eventos discretos se mostrou uma ótima ferramenta para simulação de tráfego, facilitando a condução da simulação e deixando claras as etapas realizadas.

O outro objetivo foi verificar quais os níveis de serviço oferecido pela praça de pedágio estudada em diferentes intensidades de tráfego. Para isso foi utilizada a escala proposta por Lin e Su (1994) que busca medir a qualidade de serviços da concessionária conforme o tempo que um veículo permanece no sistema. Eles criaram uma escala que possui seis níveis sendo o nível A o melhor deles e o nível de serviço F o pior.

Por meio do uso do *software* de microsimulação PTV Vissim foi possível verificar que o nível de serviço oferecido pela praça em dias normais de funcionamento é o nível D, no qual um veículo permanece no sistema entre 45 e 60 segundos. Porém, quando ocorre um aumento do número de veículos trafegando pela praça de pedágio, que é o caso de feriados, esse nível de serviço cai para o nível E no primeiro turno e para o F nos turnos 2 e 3. Isso ocorre porque em todos os feriados analisados o volume de veículos chegou a dobrar em relação à média de veículos que passam em um dia comum. Segundo os autores que propuseram a escala utilizada, o nível de serviço F gera insatisfação ao usuário, pois nesse nível as filas já começam a incomodar e são percebidos atrasos no atendimento.

Além de analisar o comportamento da praça em diferentes volumes de fluxo de veículos, também buscou verificar como ela se comporta quando seus parâmetros são alterados. Para isso foram considerados 6 diferentes cenários, esses foram criados considerando os fatores analisados no Capítulo 5 dessa mesma pesquisa.

Em relação aos cenários simulados, o que mais se destacou foi o cenário 6 no qual considera a forma de pagamento em dinheiro e sem troco, com arrecadadores do sexo masculino e tráfego de veículos das categorias 1, 3, 7 e 9. Para esse cenário têm-se o nível de serviço D, sendo que na situação real o nível de serviço é o F. Esse resultado foi encontrado, pois no cenário 6 foram retirados os fatores que mais elevam à média do tempo de atendimento que é a forma de pagamento com cartão, a categoria B de veículos, que engloba a maior parte dos veículos pesados e com baixa taxa de aceleração, e foram retirados os arrecadadores do sexo feminino que possuem taxa de atendimento maior que os arrecadadores masculinos.

O cenário 3 foi o pior simulado, sendo muito semelhante a situação real. Neste cenário buscou verificar como a praça de pedágio se comportaria tendo apenas

arrecadadores do sexo feminino, porém os resultados não foram promissores. Como já mencionado, o tempo de atendimento das arrecadoras tem uma média maior do que o tempo de arrecadores do sexo masculino. Quando os dois sexos trabalham ao mesmo tempo, caso da situação real, essa diferença é absorvida pelo sistema já que um tempo maior é compensado pelo menor tempo, porém quando isolados essa diferença é evidenciada, prejudicando o funcionamento do sistema. Isso pode ser evidenciado comparando os resultados do cenário 3 com o cenário 2 que avaliou quando havia somente arrecadores do sexo masculino. Apesar do cenário 2 não ser a melhor configuração do sistema, ele sempre esteve melhor do que a situação real e que o cenário 3.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Essa pesquisa buscou responder os seguintes questionamentos: como fatores humanos e operacionais influenciam o tempo de atendimento manual em praças de pedágio? E qual a relação com os níveis de serviço proporcionados pela empresa? Para responder a esses questionamentos, quatro objetivos específicos foram formulados no Item 1.4 para nortear o processo de revisão bibliográfica, a coleta de dados e análise dos dados.

O primeiro objetivo proposto foi analisar a influência e a correlação de fatores humanos e operacionais no tempo de atendimento e como eles se relacionam. Esse objetivo foi alcançado através de duas etapas, a primeira envolveu uma revisão bibliográfica, que forneceu uma base para realizar uma análise preliminar dos dados coletados e verificar se os fatores relatados na literatura se aplicam a praça de pedágio estudada. Foi verificado que os veículos da categoria 1, ou seja, veículos de passeio, possuem a menor média do tempo de atendimento.

Juntamente com a revisão bibliográfica, os dados coletados por meio de filmagens e com a análise documental foi possível verificar que a forma de pagamento em dinheiro também apresenta a menor média no tempo de atendimento, ou seja, motoristas que já possuem o dinheiro trocado muitas vezes não param por completo na cabine de pedágio e não esperam o recibo reduzindo seu tempo na área de arrecadação. Veículos da categoria 1 são pequenos e possuem alta taxa de aceleração, o que faz com que o tempo de atendimento seja menor se comparado às outras categorias de veículos.

O primeiro turno, ou seja, no período entre 22h às 5:59, possui a maior média de tempo de atendimento, uma vez que o fluxo de veículos deste turno é composto principalmente por caminhões e ônibus que demoram mais tempo desde sua desaceleração, passando pelo pagamento e acelerando para realizar a saída da praça. Entretanto, apesar de ser o turno com maior tempo de atendimento, possui o menor volume de tráfego, o que confirma estudos anteriores com a afirmação de que quanto maior o fluxo de veículos, mais rápido os arrecadadores tendem a trabalhar (OLIVEIRA *et al.*; 2003; ARAÚJO, 2001; WOO; HOEL, 1991; EDIE, 1954), isso para que não ocorra grande formação de filas. É uma conclusão importante, pois se verifica claramente que o fator humano interage e interfere no processo de pagamento manual e no serviço prestado.

Ainda no primeiro objetivo, foi possível verificar estatisticamente a influência de cada fator no tempo de atendimento e como eles se relacionam através do uso do

método experimental. O uso do *Design of Experiment* (DOE) possibilitou a geração de um modelo empírico que correlacionou de forma simples e eficaz a resposta “tempo de atendimento” com alguns fatores. Os resultados da análise mostraram que os fatores “categoria do veículo”, “forma de pagamento” e “sexo do arrecadador” são os que têm maior influência no tempo de atendimento. O fator “categoria”, que classifica os vários tipos de veículos, mostrou ser o que tem maior impacto, aumentando o tempo de atendimento, concordando com outros estudos que mostram que veículos pesados tem menor taxa de aceleração e devido ao extenso comprimento permanecem por mais tempo na área de cobrança da tarifa (ZARRILLO, 2000; ZARRILLO *et al.*, 1997; WOO; HOEL, 1991).

O segundo objetivo foi testar a utilização do projeto de simulação a eventos discretos proposto por Montevechi *et al.* (2007) em um problema de simulação de tráfego. Para que a proposta de projeto fosse implementada na simulação do fluxo de veículos na praça de pedágio foram necessárias algumas adaptações no projeto original. A etapa de definição do projeto experimental, ou seja, na análise dos fatores e suas relações, teve que ser antecipada, uma vez que os resultados dessa etapa foram utilizados no desenvolvimento da modelagem computacional. A outra modificação realizada foi em relação à nomenclatura de uma etapa que no projeto de simulação a eventos discretos é chamada de verificação e na pesquisa aqui desenvolvida foi chamada de calibração do modelo computacional, por ser uma terminologia mais utilizada na área de simulação de tráfego e transportes. O projeto de simulação a eventos discretos se mostrou uma ótima ferramenta para simulação de tráfego, facilitando a condução da simulação e deixando claras as etapas realizadas.

Como último objetivo, o trabalho propôs avaliar o nível de serviço ofertado pela concessionária com a realização da simulação computacional e como esses níveis se comportam quando alguns fatores são variados. Foi utilizado um *software* de simulação de tráfego, que se mostrou mais adequado para esse estudo e forneceu as informações necessárias para avaliação dos níveis de serviço da praça de pedágio. Portanto, a simulação por meio da geração de vários cenários possibilitou verificar que o nível de serviço oferecido pela praça de pedágio em dias normais de funcionamento é o nível D, no qual um veículo permanece no sistema (fila de espera, mais atendimento) entre 45 e 60 segundos. Nesse nível de serviço qualquer pequena interrupção no atendimento pode causar extensas filas, causando desconforto ao usuário. Em feriados esse nível de serviço cai para o nível E no primeiro turno e para o F nos turnos 2 e 3. Sabe-se que o

fluxo de veículos em feriados aumenta significativamente e com isso o nível de serviço cai. Os níveis de serviço E e F geram insatisfação ao usuário, pois nesses níveis as filas já começam a ser um incômodo e reclamações em relação aos atrasos no atendimento são percebidas.

Além do volume de veículos que trafegam pela praça, outros fatores também foram analisados durante a simulação buscando verificar como o nível de serviço se comporta quando determinados parâmetros são alterados. Seis cenários foram criados sendo que o sexto foi o que mais se destacou, mostrando melhorias significativas do nível de serviço, tanto no fluxo normal quanto nos atípicos. Esse cenário considera que o pagamento é realizado com dinheiro e sem troco, com arrecadadores somente do sexo masculino e veículos das categorias 1, 3, 7 e 9 (veículos mais leves). Nessas configurações foi observado que havia melhorias no nível do serviço, saindo do nível F em situações reais, e indo para o D. Por outro lado, o cenário 3 foi o que apresentou a pior situação. Nesse cenário foi verificado como a praça de pedágio se comporta tendo apenas arrecadadores do sexo feminino. O tempo de atendimento das arrecadadoras tem uma média maior do que o tempo de arrecadadores do sexo masculino, o que resultou numa queda do nível do serviço.

Assim, quanto aos métodos utilizados, o uso do DOE seguido da modelagem e simulação computacional possibilitou avaliar os níveis de serviço oferecidos, testando a influência de fatores mais relevantes na capacidade de atendimento manual na praça de pedágio estudada.

A pesquisa mostrou que existem alternativas e melhorias que podem ser aplicadas no ato de arrecadação manual da praça de pedágio estudada. Apesar de não poder ser excluídas as outras formas de pagamentos, incentivar os usuários da rodovia a utilizarem dinheiro e moedas para facilitar o pagamento e até mesmo os gestores a adotarem valores de tarifas exatos, podem trazer grandes benefícios ao tempo de atendimento e até mesmo na formação das filas e, conseqüentemente, aumentando o nível de serviço. Incentivar caminhoneiros a não trafegarem em feriados e nos turnos de grandes picos também é uma forma de reduzir o tempo de permanência no sistema, beneficiando não somente os motoristas, mas também os arrecadadores, uma vez que veículos parados na praça aumentam o risco de acidentes, a emissão de poluentes e os ruídos.

## **7.1 Sugestão de trabalhos futuros**

Objetivando enriquecer a literatura com o assunto aqui abordado, sugere-se para trabalhos e pesquisas futuras analisar se o tempo de atendimento se mantém quando os dados são coletados durante os fluxos atípicos da praça e não nos fluxos normais como foi à coleta de dados dessa pesquisa, a fim de confirmar ou refutar os resultados encontrados tanto no *Design of Experiment*, quando os níveis de serviço obtidos na simulação. A ampliação de cenários também é uma sugestão, uma vez que não foram consideradas nesta pesquisa questões relacionadas à geometria da praça de pedágio, uma vez que o foco foi analisar fatores humanos e operacionais do processo de cobrança.

Além disso, analisar e buscar melhorias em outros sistemas de arrecadação, como a eletrônica, uma vez que o presente trabalho não abordou as formas de arrecadação eletrônica e automática. Apesar de não ser comum o uso do pagamento automático no Brasil, é importante desenvolver estudos para simular a implementação de um sistema mais automatizado, de forma aumentar a produtividade e a eficiência dos serviços prestados em praças de pedágio.

## REFERÊNCIAS

- ABCR. Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias. **Relatório Anual**, 2013. Disponível em: <<http://www.abcr.org.br/>>.
- ABDELKADER, T.; NAIK, K.; NAYAK, A.; GOEL, N.; SRIVASTAVA, V. A performance comparison of delay-tolerant network routing protocols. **IEEE Network**, v. 30, p. 46-53, 2016. DOI: 10.1109/MNET.2016.7437024
- ABUKHOUSA, E.; AL-JAROOD, J.; MOLNAR, S.; MOHAMED, N. Simulation and Modeling Efforts to Support Decision Making in Healthcare Supply Chain Management. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/354246>
- ADAMS, W. **Inst. Civil Engineers**, v. 4, n. 160, 1936.
- ADAN, I.; BOXMA, O.; RESING, J. **Queuing models with multiple waiting lines**. Department of Mathematics and Computer Science, Eindhoven University of Technology, 2000.
- AL-DEEK, H. M. Analyzing performance of ETC plazas using new computer *software*. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 15, p. 309–319, 2001.
- AL-DEEK, H. M., RADWAN, A. E., MOHAMMED, A. A., KLODZINSKI, J.G. Evaluating the improvements in traffic operations at a real-life toll plaza with electronic toll collection. **ITS Journal**, v. 3, p. 205–223, 1996.
- AL-DEEK, H. M.; MOHAMED, A. A.; MALONE, L. A new stochastic discrete-event micro simulation model for evaluating traffic operations at electronic toll collection plazas. **J. Intell. Transp. Syst.**, v. 9, n. 4, p. 205–219, 2005.
- AL-DEEK, H. M.; MOHAMMED, A. A.; RADWAN, A. E. Operational benefits of electronic toll collection: case study. **Journal of Transportation Engineering**, v. 123, p. 467–477, 1997.
- AL-DEEK, H. M.; RADWAN, A. E. **A framework for evaluation level of service at electronic toll collection plazas**. Proceedings of Transportation Congress: Civil Engineers – Key to World Infrastructure, ASCE, v. 2, 1995.
- ALFIERI, A.; MATTA, A. Mathematical programming time-based decomposition algorithm for discrete event simulation. **European Journal of operational Research**, v. 231, n. 3, p. 557-566, 2013.
- ALI, F.; ZHOU, Y.; HUSSAIN, K.; NAIR, P. K.; RAGAVAN, N. A. Does higher education service quality effect student satisfaction, image and loyalty? A study of international students in Malaysian public universities. **Quality Assurance in Education**, v. 24, n. 1, p. 70-94, 2016.
- ALI, A.; GARCIA, G.; MARTINET, P. The flatbed platoon towing model for safe and dense platooning on highways. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 58, 2015. DOI: 10.1109/MITS.2014.2328670
- ALVARENGA, G.; VIVEIROS, H.; CANALE, A. Estudo do impacto do pedágio no aumento do tempo de viagem no consumo de combustível e na geração de poluentes. **Pesquisa e Tecnologia Minerva**, v. 6, n. 3, p. 263-271, 2006.
- ALVES, L.; REZENDE, F.; ALVES, T.; BOIKO, T.; MORAIS, M. **Teoria das filas: conceitos e aplicações**. VII Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial, nov., 2013.
- AMANNA, A.; FITCH, D.; REED, J. Parametric optimization of *software* defined radio configurations using Design of Experiments. **Analog Intergr. Circ. Sig. Process**, v. 73, p. 637-648, 2012.
- AMOAKO-GYMPAH, K.; MEREDITH, J.. The operations management research agenda: An update, **Journal of Operations Management**, v. 8, p. 250–262, 1989.

- ANDERSON, M. Subways, Strikes, and Slowdowns: The Impacts of Public Transit on Traffic Congestion. **The American Economic Review**, v. 104, n. 9, p. 2763-2796, 2014. <https://doi.org/10.1257/aer.104.9.2763>
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness-of-fit. **Journal of The American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p. 765-769, 1954.
- ANDRADE, E. Introdução à pesquisa operacional. 2. ed. Rio de Janeiro: **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.**, 2002.
- ANDRADE, E. L. Introdução à Pesquisa Operacional. 2. ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2000.
- ANTONIOL, G.; CIMITILE, A.; DI LUCCA, G.; DI PENTA, M. Assessing staffing needs for a *software* maintenance project through queuing simulation. **IEEE Trans. Softw. Eng.** Piscataway, USA, v. 30, n. 1, p. 43-58, 2004.
- ANTT - **Relatório Anual 2010** – Associação Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/>>.
- ANTT - **Relatório Anual 2012** – Associação Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/>>.
- ARAGÃO, M.; FRIGIERI, E.; YNOGUTI, C.; PAIVA, A. Factorial design analysis applied to the performance of SMS anti-spam filtering systems. **Expert System With Applications**, v. 64, p. 589-604, 2016.
- ARAÚJO, J. **Características operacionais de praças de pedágio**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, 2001.
- ARAÚJO, J. J.; SETTI, J. R. Caracterização Operacional de Praças de Pedágio do Estado de São Paulo. **Transportes**, v. 14, n. 1, p. 33-44, 2006.
- ARDEKANI, S; TORRES, F. Economic evaluation of toll plaza operations. Transportation Research Record 1305, **Transportation Research Board**, National Research Council, p. 160-168, 1991.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. Pesquisa operacional: para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2007.
- ARIOTTI, P. Método para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas através de modelagem híbrida em redes. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- AURELIO, M. Teoria das filas e das simulações. Santo André: **UNIA**, 2004.
- BANAEI, M.; ALIZADEH, R. Simulation-based modeling and power management of all-electric ships based on renewable energy generation using model predictive control strategy. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 90, 2016. DOI: 10.1109/MITS.2016.2533960
- BANKS, J.; CARSON, J.; NELSON, B. Discrete-event system simulation. New Jersey: **Prentice Hall**, 1996.
- BATESON, J.; HOFFMAN, K. Marketing de serviços. 4. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2001.
- BAYINDIR, Z.; ERKIP, N.; GÜLLÜ, R. A model to evaluate inventory costs in a remanufacturing environment. **Int. J. Prod. Econ.**, v. 81, n. 82, p. 597-607, 2003.
- BLACKBURN, J. Optimal control of a single-server queue with balking and renegeing. **Management Science**, v. 19, n. 3, p. 297-313, 1972.

- BLOOMBERG L., DALE J. Comparison of Vissim and Corsim Traffic Simulation Models on a Congested Network[J]. **Transportation Research Record**, v. 1727, p.52-60, 2000.
- BOGO, R.; GRAMANI, L.; KAVISKI, E. Modelagem computacional do tráfego de veículos pela teoria microscópica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, n. 1, p. 1301, 2015.
- BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. **From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SYSTEM DYNAMICS SOCIETY, 22, 2004. Proceedings... Oxford, England: Keble College, 2004.
- BOTTANI, E.; MONTANARI, R. Supply chain design and cost analysis through simulation. **International Journal of Production Research**, v. 48 n. 10, p. 2859-2886, 2010.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters**, New York, John Wiley & Sons, 1978.
- BOX, G.; HUNTER, J.; HUNTER, W. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**, v. 13, Wiley: New York, 2005.
- BOXILL, S.; YU, L. **An evaluation of traffic simulation models for supporting ITS development**. Research Rep. for the SWUTC-00-167602-1, Center for Transportation Training and Research (CTTR), Texas Southern Univ, Houston, 2000.
- BRASIL. Governo Federal. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. **O que é o Modelo de Excelência em Gestão Pública MEGP?** Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.planejamento.gov.br/servicos/faq/gestao-publica/gestao-publica-referenciais-de-excelencia-modelos/o-que-e-o-modelo-de-excelencia-em-gestao-publica>>. Acesso em: 01 dezembro 2016.
- BRONSON, Richard. **Pesquisa operacional**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- BURGHOUT, W. **Mesoscopic simulation models for short-term prediction**. PREDIKT project report CTR2005, v. 3, 2005.
- BURRIS, M. W.; HILDEBRAND, E. D. Using Microsimulation to Quantify the Impact of Electronic Toll Collection. **ITE Journal**, n. 7, v. 66, p. 21–24, 1996.
- CALEGARE, A. **Introdução ao delineamento de experimentos**. 1º ed. **Edgard Blucher Ltda**, 2001.
- CAMPOS, M. S. **Desvendando o MINITAB**. Rio de Janeiro: **Qualitymark**, 2003.
- CAMPOS, P.; FERREIRA, J.; DE PAIVA, A.; BALESTRASSI, J.; DAVIM, J. Modelagem da rugosidade e da vida da ferramenta no torneamento do aço duro ABNT 52100 com cerâmica mista wiper utilizando metodologia de superfície de resposta. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecânica**, v. 19, n. 1, p. 71-86, 2015.
- CARLSON, R.; PAPAMICHAIL, P.; PAPANICOLAOU, M. Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 4, 2011. DOI: 10.1109/TITS.2011.2156792
- CASTRO, N. **Privatização do setor de transportes no Brasil**. In: CASTELAR, A., FUKASAKU, K. (eds.). **A privatização no Brasil: o caso dos serviços de utilidade pública**. BNDES/OECD, 1999.
- CEBALLOS, G.; CURTIS, O. Queue analysis at toll and parking exit plazas: A comparison between multi-server queuing models and traffic simulation, 2003.
- CHAKROBORTY, P. Models of vehicular traffic: An engineering perspective. **Physica A. Netherlands**, v. 372, p.151–16, 2006.

- CHAMBERS, C.; KOUVELIS, P. Modeling and managing the percentage of satisfied customers in hidden and revealed waiting line systems. **Production and Operations Management**, v. 15, n. 1, p. 103–116, 2006.
- CHASE, R.; JACOBS, F.; AQUILANO, N. Administração da Produção para a Vantagem Competitiva. 10. ed. Porto Alegre, RS.: **Bookman**, 2004.
- CHEN, K. J.; CHEN, K. L.; ZHANG, L. J.; LENG, G. Y. Characteristics and influencing factors of air pollution in and out of the highway toll gates. **Environmental Science**, v. 28, p. 1847–1853, 2007.
- CHEN, S.; MAO, B.; LIU, S.; SUN, Q.; WEI, W.; ZHAN, L. Computer-aided analysis and evaluation on ramp spacing along urban expressways. **Transportation Research Part C**, v. 36, p. 381-393, 2013.
- CHO, H.; KIM, Y. C. Analysis of traffic flow with variable speed Limit on highways. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n 6, 1048–1056, 2012.
- CHOWDHURY, D.; SANTEN, L.; SCHADSCHNEIDER, A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. **Physics Reports**, v. 329, p. 199–329, 2000.
- CHOWDHURY, M. Queuing theory model used to solve the waiting line of a bank – a study on Islami Bank Bangladesh Limited, Chawkbazar Branch, Chittagong. **Asian Journal of Social Sciences & Humanities**, v. 2, n. 3, 2013.
- CHUNG, C. A. Simulation modeling handbook: a practical approach. Florida: **CRC Press**, 2004.
- CHWIF, L.; MEDINA, A.C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações. São Paulo: **Ed. dos Autores**, 2006.
- CLAPPER, T. C. The way forward for Simulation & Gaming (S&G). **Simulation & Gaming**, v. 47, n. 1, p. 3-6, 2016. DOI:10.1177/1046878116633349
- CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias 2010**. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>.
- COELHO, M. C.; FARIAS, T. L.; ROUPHAIL, N. M. Measuring and Modeling Emission Effects for Toll Facilities. In Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, n. 1941, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, p. 136–144, 2005.
- CORREIA, G. **Aulas de Planejamento de Transportes**, Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 2011.
- COSTA, F. Concessionária repassa mais de R\$5 milhões a municípios cortados pela Fernão Dias. Vista aérea da praça de pedágio de Vargem. Bragança-Jornal Diário. Disponível em: <[http://bjdnet.com.br/site/imprime.not.php?id\\_editoria=8&id\\_noticia=5218](http://bjdnet.com.br/site/imprime.not.php?id_editoria=8&id_noticia=5218)>. Acesso em 25 abril 2015.
- CUKIER, R.; COSTA, M. Competitive dysfunction: analysis the level of the gaps, the servqual model in compounding pharmacies the municipalities of São Paulo state. Revista Científica Hermes, n. 8, p. 70-91, 2013.
- CUNNARD, R.; LIEU, H.; MAHMASSANI, H. Traffic flow theory. **Transportation Research Board Special Report** 165, 1975.
- DANKO, J.; GULEWICZ, V. **Operational Planning for Electronic Toll Collection: A Unique Approach to Computer Modeling/Analysis**. In: Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference. p. 776-785, 1991.
- DEMIREL, N.; GOKÇEN, H. A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 39, p. 1197–1206, 2008.

DIAB, R. D.; FOSTER, S. J.; FRANÇOIS, K.; MARTINCIGH, B. S.; SALTER, L.F. Carbon monoxide levels at a toll plaza near Durban, South Africa. **Environmental Chemistry Letters**, v. 3, p. 91–94, 2005.

DOMENECH, C. Estratégia 6  $\sigma$ : **Etapas Melhorar**. Versão 3. [s.l.]: M.I. Domenech Consultores, 2002.

DOS SANTOS, G. S. **Avaliação da qualidade do serviço educacional numa instituição de ensino superior privada: a perspectiva de alunos de graduação em um estudo longitudinal**. 2014. 138f. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração) – Universidade Potiguar, Natal/RN, 2014.

DREYER, J.; RIEFLER, N.; PESCH, G.; KARAMEHMEDOVIC, M.; FRITSCHING, U.; TEOH, W.; MADLER, L. Simulation of gas diffusion in highly porous nanostructures by direct simulation Monte Carlo. **Chemical Engineering Science**, v. 105, p. 69-76, 2014.

DUBEDI, A.; CHAKROBORTY, P.; KUNDU, D.; REDDY, H. Modeling Automobile Drivers' toll-lane choice behavior at a toll plaza. **Journal of Transportation Engineering**, v. 138, v. 11, p. 1350-1357, 2012.

EBERLE, L. **Identificação das dimensões da qualidade em serviços: um estudo aplicado em uma instituição de ensino superior localizada em Caxias do Sul – RS**. 2009. 146f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul/RS, 2009.

EDIE, L. Traffic Delays at Toll Booths. **Journal Operations Research Society of America**, v. 2, n. 2, p. 107-138, 1954.

ERNST, A.; JIANG, H.; KRISHNAMOORTHY, M.; SIRE, D. Staff scheduling and rostering: a review of applications, methods and models. **European Journal of Operational Research**, v. 153, p. e3–27, 2004.

FARIA, B.; CAMPOS, V. Procedimento e protótipo computacional para dimensionamento de uma praça de pedágio. **Journal of Transport Literature**, v. 6, n. 4, p. 38-58, 2012.

FEDORENKO, V.; FEDORENKO, I.; SUKMANOV, A.; SAMOYLENKO, V.; SHLAEV, D.; ATANOV, I. Modeling of data acquisition systems using the queueing theory. **International Journal of Electronics and Communications (AEU)**, v. 74, p. 83-87, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2017.01.024>

FELLENDORF, M.; VORTISCH, P. **Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM**. Fundamentals of Traffic Simulation, Springer Verlag, New York, USA, p. 63–93, 2010.

FIGUEIREDO, D.; ROCHA, S. Aplicação da teoria das filas na otimização do número de caixas: um estudo de caso. **Iniciação Científica CESUMAR**, v. 12, n. 2, p. 175-182, 2010.

FILIPOWICZ, B.; KWIECIEN, J. Queueing systems and networks, models and applications, technical sciences, bulletin of the polish academy of sciences. **Technical Science**, v. 56, n. 4, 2008.

FITZSIMMONS, J. A.; FITZSIMMONS, M. J. Administração de serviços: Operações, estratégia e tecnologia da informação. 7. ed. Porto Alegre: **Amgh**, p. 535, 2014.

FITZSIMMONS, J. A.; FITZSIMMONS, M. J. Administração de serviços: operações, estratégia e tecnologia da informação. 4. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2005.

FOGLIATTI, M.; MATTOS, N. Teoria de Filas. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2007.

FRALEY, S.; OOM, M.; TERRIEN, B.; DATE, J. **Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays**. The michigan chemical process dynamic and controls open text book, USA, 2006.

FREITAS, R.; CHIMENDES, V. Aplicação de DOE na determinação dos fatores de influência no prazo da entrega de trabalhos de graduação nos cursos de tecnologia. **Revista Científica On-Line**, v. 5, n. 1, 2015.

- FREUND, J. E. Estatística Aplicada: economia, administração e contabilidade. Porto Alegre: **Bookman**, 2006.
- GARVIN, D. Gerenciando a Qualidade: a visão estratégica e competitiva. Rio de Janeiro: **Qualitymark**, 1992.
- GASTARDELO, T.; MELZ, L.; RIBEIRO, M.; FRANCO C. Avaliação da implantação de sistema de pedágio MT-449: Rodovia da mudança. **Revista Contabilidade & Amazônia**, v. 5, n. 1, p. 1-17, 2012.
- GAVULOVA, A.; DRLICIAK, M. Capacity evaluation of roundabouts in Slovakia. **Transport and Telecommunication**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2012.
- GEISLER, S.; QUIX, C.; SCHIFFER, S.; JARKE, M. An evaluation framework for traffic information systems based on data streams. **Transportation Research Part C**, v. 23 (SI), p. 29–55, 2012
- GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S.; HODZIC, A. Evaluation of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication effects on machining GLARE laminates using design of experiments. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 533-548, 2016.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: **Atlas**, 2007.
- GIUNTA, A.; WOJTKIEWICZ, S.; ELDRED, M. S. Overview of modern design of experiments methods for computational simulations, American Institute of Aeronautics and Astronautics, paper AIAA 2003-649, In: **AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**, Reno, 2003.
- GOH, T. Management of parametric response in design of experiments. **Qual. Reliab. Engng. Int.**, v. 30, p. 1191-1195, 2014.
- GORDON, E. A. **Evaluation of the potential benefits to traffic operations at a toll plazas with express ETC lanes**. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Central Florida, Orlando, Fla., 2004.
- GRAMAGLIA, M.; FIORE, M.; CALDERON, M. Measurement-based modeling of Interarrivals for the simulation of highway vehicular networks. **IEEE Communications Letters**, v. 18, n. 12, 2014. DOI: 10.1109/LCOMM.2014.2363114
- GREASLEY, A. Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organization. **Technovation**, v. 26, p. 95-103, 2006.
- GREENBERG, H. **Opns**, v. 7, n. 79, 1959.
- GRIFFITHS, C.; HOWARTH, J.; ALMEIDA-ROWBOTHAM, G.; REES, A.; KERTON, R. A design of experiments approach for the optimization of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 74-85, 2016.
- GRÖNROOS, C.. Marketing: gerenciamento e serviços. 2. ed. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2003.
- GROSS, D.; HARRIS, C. Fundamentals of Queueing Theory. **J. Wiley**, New York, 1974.
- GROSS, D.; SHORTLE, J.; THOMPSON, J.; HARRIS, C. Fundamentals of queueing theory. 4. ed. **Wiley Series in Probability and Statistics**, 2008.
- GUERROUAHANE, N.; AISSANI, D.; BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, L.; FARHI, N. M/g/c/c state dependent queueing model for road traffic simulation. 2016 *arXiv preprint arXiv:1612.09532*.
- GULEWICZ, V.; DANKO, J. Simulation-Based Approach to Evaluation Optimal Lane Staffing Requirements for Toll Plazas. **Transportation Research Record** 1484, Transportation Research Board, Washington, D.C, 1995.

- HARB, R.; SU, X.; RADWAN, E. Empirical Analysis of toll-lane processing times using proportional odds augmented MARS. *Journal of Transportation Engineering*, v. 136, n. 11, p. 1039-1048, 2010.
- HARRELL, C.; GHOSH, B.; BOWDEN, R. *Simulation using ProModel*. Boston: **Mc Graw-Hill**, 2000.
- HARVIAINEN, J. T. Increasing impact of simulation/gaming and Simulation & Gaming. *Simulation & Gaming*, v. 47, n. 6, p. 707-709, 2016. DOI:10.1177/1046878116677642
- HCM, HCM - Highway Capacity Manual (2000), **Transportation Research Board**, National Research Council, Washington, D.C., USA, 2000.
- HE, J.; QI, Z.; HANG, W.; KING, M.; ZHAO, C. Numerical evaluation of pollutant dispersion at toll plaza based on system dynamics and computational fluid dynamics models. *Transportation Research Part C*, v. 19, p. 510-520, 2011. DOI:10.1016/j.trc.2010.08.001
- HELBING, D.; HENNECKE, A.; SHVETSOV, V.; TREIBER, M. *Transpn. Res. Part B*, v. 35, n. 183, 2001.
- HENSHER, D. A. Electronic Toll Collection. *Transportation Research Part A: General*, v. 25, Issue 1, p. 9-16, 1991.
- HOOGENDOORN, S.; BOVY, P. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. Special Issue on Road traffic Modelling and Control of the *Journal of Systems and Control Engineering*, v. 215, n. 4, p. 283-303, 2001.
- HSU, W.; ZHANG, H. The fundamental law of highway congestion revisited: Evidence from national expressways in Japan. *Journal of Urban Economics*, v. 81, p. 65-76, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jue.2014.02.002>
- HUANG, F.; LIU, P.; YU, H.; WANG, W. Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersection. *Accident Analysis and Prevention*, v. 50, p. 1014-1024, 2013.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PIB de cada estado brasileiro, 2013. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br>>.
- ISMAIL, M.; SARKAR, M. Development of a model for electronic toll-collection system. *International Journal of Intelligent System and Applications*, v. 4, p. 39-45, 2012.
- ISSEMBERG, S.; MCGAGHIE, W.; PETRUSA, E.; GORDON, D.; SCALESE, R. Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: a BEME systematic review. *Med. Teach.*, v. 27, p. 10-28, 2005.
- JAHANGIRIAN, M.; ELDABI, T.; NASEER, A.; STERGIOULAS, L.; YOUNG, T.. Simulation in manufacturing and business: a review. *European Journal of Operation Research*, v. 203, p. 1-13, 2010.
- JELMY, E.; RAMAKRISHNAN, S.; DEVANATHAN, S.; RANGARAJAN, M.; KOTHURKAR, N. Optimization of the conductivity and yield of chemically synthesized polyaniline using a design of experiments. *Journal Applied Polymer Science*, 2013.
- JIANG, C.; CHENG, G. The way of the ease traffic congestion in commercial center of Beijing – the analysis and research of level analyses and fuzzy evaluation in Sanlitun Street. *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015*, p. 51-61, 2016. DOI: 10.2991/978-94-6239-180-2\_6
- JURAN, J. M.; DeFEO, J. A. **Fundamentos da Qualidade para Líderes**. Bookman, 01/01/2015. VitalSource Bookshelf Online.

- KALLRATH, J.; KLOSTERHALFEN, S.; WALTER, M.; FISCHER, G.; BLACKBURN, R. Payload-based fleet optimization for rail cars in the chemical industry. **European Journal of Operation Research**, v. 259, p. 113-129, 2017.
- KARAMOUZIAN, A.; TEIMOURY, E.; MODARRES, M. A model for admission control of returned products in a remanufacturing facility using queueing theory. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 54, p. 403-412, 2011. DOI: 10.1007/s00170-010-2933-7
- KAZEM, N.; LESSARD, B.; MARIC, M.; DUEVER, T.; PENLIDIS, A. Reactivity ratio estimation in radical copolymerization: from preliminary estimates to optimal design of experiments. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, p. 7305-7312, 2014.
- KERNER, B. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: a brief review. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 392, p. 5261–5282, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2013.06.004>
- KETZENBERG, M.; SOUZA, G. Mixed assembly and disassembly operations for remanufacturing. **Prod. Oper. Manag.**, v. 12, n. 3, p. 321–335, 2003.
- KHALEGHI, H.; LAU, A.; DEBRUYN, J.; EBADIAN, M.; SOKHANSANJ, S. Modeling and Simulation of Logistics Integration of Electronic Commerce Online Shopping Platform. **Canadian Biosystems Engineering**, v. 58, n. 1, 2016.
- KITTELSON, W. K.; ROESS, R. P. **High Capacity Analysis After the HCM 2000**. Presentation at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., Janeiro de 2001, CD-ROM, 2001.
- KLASSEN, R.; MENOR, L. The process management triangle: an empirical investigation of process trade-offs. **Journal of Operations Management**, v. 25, p. 1015–1034, 2007.
- KLEINROCK, L. Queueing systems: theory. **J. Wiley**, New York, v. 1, 1975.
- KLODZINSKI, J.; AL-DEEK, H. M. Transferability of a stochastic toll plaza computer model. **Transportation Research Record**, v. 1811, p. 40–49, 2002a.
- KLODZINSKI, J.; AL-DEEK, H. M. New Methodology for Defining Level Of Service at Toll Plazas. **Journal of Transportation Engineering**, n. 2, v. 28, p. 173–181, 2002b.
- KLODZINSKI, J.; AL-DEEK, H. M. **Proposed Level of Service Methodology for Toll Plazas**. Presentation at the 81th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., Janeiro de 2002, CD-ROM, 2002c.
- KOHAMA, H. Contabilidade pública teoria e prática. 10ª ed. São Paulo: **Atlas**, 2006.
- KORTELING, H.; HELSDINGEN, A.; SLUIMER, R. An Empirical Evaluation of Transfer-of-Training of Two Flight Simulation Games. **Simulation & Gaming**, v. 48, n. 1, p. 8-35, 2016. DOI: 10.1177/1046878116671057
- KOTLER, P.; KELLER, K. L. Administração de marketing. 12. ed. São Paulo: **Pearson Prentice Hall**, p. 750, 2006.
- KRIS, L.; NICO, V. Reverse logistics network design with stochastic lead times. **Comput. Oper. Res.**, v. 34, n. 2, p. 395–416, 2007.
- KUMAR, V.; BHALLA, A.; RATHORE, A. Design of Experiments applications in Bioprocessing: concepts and approach. **Biotechnol. Prog.**, v. 30, n. 1, 2014.
- LANGE, R.; SAMOILOVICH, I.; RHEE, B. Virtual queueing at airport security lanes. **European Journal of Operational Research**, v. 225, p. 153-165, 2013.

- LAPPONI, J. C. Estatística usando Excel. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2005.
- LAS CASAS, A.. Qualidade total em serviços. 5. ed. São Paulo: **Atlas**, 2007.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation modeling and analysis. 3. ed. Boston: **McGraw-Hill**, 2000.
- LAW, A. Simulation model's level of detail determines effectiveness. **Industrial Engineering**, v. 23, n. 10; p. 16-18, 1991.
- LAW, A.; KELTON, W. Simulation Modeling and Analysis. New York: **Mc Graw-Hill**, 1ª ed., 1982.
- LAZIC, L.; MILINKOVIC, S. Reducing *software* defects removal cost via Design of Experiments using Taguchi approach. **Software Qual. Journal**, v. 23, p. 267-295, 2015.
- LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D.; MARINS, F. O uso do projeto de experimentos simulados para análise do efeito interativo de falhas em processos: um caso hipotético. **Sistemas & Gestão**, v. 2, n. 3, p. 285-302, 2007.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D.; MONTEVECHI, J. **Uma proposta de técnica de modelagem conceitual para a simulação através de elementos do IDEF**. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, João Pessoa-PB: Anais XL, 2008.
- LEAL, F.; COSTA, R. F. S.; MONTEVECHI, J. A. B.; ALMEIDA, D. A.; MARINS, F. A. S. A practical guide for operational validation of discrete event simulation models. **Pesquisa Operacional**, v. 31, n. 1, p. 57-77, 2011.
- LI, J.; GILLEN, D.; DAHLGREN, J. Benefit-Cost Evaluation of the Electronic Toll Collection System: A Comprehensive Framework and Application. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, n. 1659, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., p. 31-38, 1999.
- LIGHTHILL, M.; WHITHAM, G. On kinematic waves. **Proc. Roy. Soc. A**, v. 229, p. 281-345, 1995.
- LIMA, A.; MASCARENHAS, F.; FRZZON, E. Simulation-based planning and control of transport flows in port logistic systems. **Mathematical Problems in Engineering**, 2015. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/862635>
- LIN, F. B. Delay model for planning analysis of main-line toll plazas. **Transportation Research Record**, v. 1776, p. 69-74, 2001.
- LIN, F. B.; SU, C. W. Level-of-service analysis of toll plazas on freeway main lines. **Journal of Transportation Engineering**, v. 120, p. 246-263, 1994.
- LIU, H. *Software* performance and scalability: a quantitative approach. **Wiley Publishing**, 2009.
- LIU, P.; QU, X.; YU, H.; WANG, W.; CAO, B. Development of a VISSIM simulation model for U-turns at unsignalized intersections. *Journal of Transportation Engineering*, 138(11), p. 1333-1339, 2012
- LOBÃO, E. **Discussão, sistematização e modelamento do processo de realização de estudos de simulação**. Tese de doutorado. São Carlos: USP, 2000.
- LOVELOCK, C.; WRIGHT, L. Serviços: marketing e gestão. São Paulo: **Saraiva**, p. 416, 2001.
- LU, X.; LIU, Z.. Traffic simulation of Beijing West railway station North area. **Journal of Industrial Engineering and management**, v. 6, n. 1, p. 336-345, 2013.

MACATANGAY, R.; SONKAEW, T.; VELAZCO, V.; BERBIG, C.; INTARAT, N.; NANTAJAI, N.; BAGTASA, G. Factors influencing surface CO<sub>2</sub> variations in LPRU, Thailand and IESM Philippines. **Environmental Pollution**, v. 195, p. 282-291, 2014.

MACEDO, R. **Aplicação da metodologia de planejamento de experimentos para formulação de massas cerâmicas para telhas**. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

MACHADO, K. Concessões de rodovias: mito e realidade. 2.ed. São Paulo: **Prêmio Editorial**, 2005.

MAHESHWARI, V.; RANGAIAH, G.; SAMAVEDHAM, L. Multiobjective framework for model-based Design of Experiments to improve parameters precision and minimize parameter correlation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, p. 8289-8304, 2013.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. Administração da produção. 2. ed. São Paulo: **Saraiva**, 2005.

MARTINS, R. A.; MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. Guia para elaboração de Monografia e TCC em Engenharia de Produção. Primeira ed. **Atlas**, 2013.

MATOS, C. L. **Avaliação e Análise do Desempenho dos Processos de Serviço, numa Agência Bancária, sob a ótica de seus Clientes e Funcionários da “Linha de Frente”**. Dissertação (Mestrado em Eng. Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

MCDONALD, D.; STAMMER, R. Contribution to the Development of Guidelines for Toll Plaza Design. **Journal of Transportation Engineering**, v. 127, n. 3, p. 215–222, 2001.

MCGAGHIE, W.; ISSEMBERG, S.; PETRUSA, E.; SCALESE, R. A critical review of simulation-based medical education research: 2003–2009. **Med. Educ.**, v. 44, p. 50–63, 2010.

MEHAR, A.; CHANDRA, S.; VELMURUGAN, S.. Highway capacity though Vissim calibrated for mixed traffic conditions. **Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 639-645, 2014a.

MEHAR, A.; CHANDRA, S.; VELMURUGAN, S. Passenger car units at different levels of service for capacity analysis of multilane interurban highways in India. *Journal of transportation Engineering*, v. 140, n. 1, p. 81-88, 2014b. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000615

MENDONÇA, M.; MONTEVECHI, J.; MIRANDA, R. **Aplicação da modelagem conceitual IDEF-SIM ao software de modelagem computacional Simul8: um caso prático**. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, 2013.

MENEZES, T. S. **Planejamento logístico como ferramenta para o aprimoramento do nível de serviço: um estudo de caso em uma empresa do ramo atacadista na cidade de Cruz das Almas – BA**. Monografia (curso de bacharelado em Logística Empresarial) – Faculdade Adventista da Bahia, Bahia, 2012.

MONTEVECHI, J.; PINHO, A. de; LEAL, F.; MARINS, F. **Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry**. In: Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, 2007.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments, 6<sup>a</sup> ed., **John Wiley & Son**, EUA, 2005.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments, 7<sup>a</sup> ed., **John Wiley & Sons**, EUA, 2009.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Industrial Experiments. 8. ed. Wiley: **New York**, NY, 2013.

MONTGOMERY, D. C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. 4. ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2004.

- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied statistics and probability for engineers. New York: **John Wiley and Sons**, 2010.
- MORRIS, R.; SYKES, P. Building and reporting on microsimulation models. **JCT Signals Symposium**, p. setembro, 2005.
- MORTON, T.; W.K. LAM, W. K. The Effect of Automatic Vehicle Identification On Toll Capacity at The Dartford River Crossing. **Traffic Engineer and Control**, v. 35, p. 298-303, 1994.
- NAGATANI, T. Jam formation with line changing at two tollgates on highway. **Physica A**, v. 416, p. 596-603, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2014.09.024>
- NETO, B.; SACARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. Como fazer experimentos. Campinas, SP: **Editora da Universidade Estadual de Campinas**, 2007.
- NEUFELD, J. L. Estatística aplicada à administração usando Excel. São Paulo: **Pearson Prentice Hall**, 2003.
- NISTA, S.; PERES, L.; D'ÁVILA, M.; SCHMIDT, F.; MEI, L. Nanostructured membranes Based on Cellulose Acetate Obtained by Electrospinning, Pat 1: Study of the Best Solvents and Conditions by Design of Experiments. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 126, p. E70-E78, 2012.
- NOGUEIRA, T.; LAS CASAS, A.. Avaliação da qualidade na prestação de serviços em uma instituição e ensino superior: um estudo de caso comparativo das perspectivas dos clientes internos e externos através do uso da ferramenta SERVQUAL. Revista **Perspectivas Contemporâneas**, v. 4, n. 1, p. 81-100, 2009.
- OBELHEIRO, M. Método de análise de níveis de serviço em praças de pedágio brasileiras. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- OBELHEIRO, M.; CYBIS, H.; OLIVEIRA, M.; RIBEIRO, J. Método para análise de níveis de serviço em praças de pedágio. **Transportes**, v. 19, n. 3, p. 18-27, 2011.
- OBELHEIRO, M.; OLIVEIRA, M. E CYBIS, H. Avaliação da influência do tipo de cobrança e da composição do tráfego sobre o desempenho operacional de praças de pedágio. **Transportes**, v. 18, n. 3, p. 25-33, 2010.
- OLIVEIRA, C. Modernização dos portos. 3. ed. São Paulo: **Aduaneira**, 2000.
- OLIVEIRA, J.; ALVEZ, M.; COSTA, J. Optimization of biogas production from Sargassum sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. **Bioresource Technology**, v. 175, p. 480-495, 2015.
- OLIVEIRA, M. **Fatores intervenientes na capacidade de atendimento de praças de pedágio**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- OLIVEIRA, M. L. **Método para Determinação de Nível de Serviço em Praças de Pedágio**. Tese (Doutorado), 138 p., Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- OLIVEIRA, M.; NETO, J.; CYBIS, H. **A Influência do Tamanho das Filas na Capacidade de Atendimento das Praças de Pedágio**. Anais do XVII Congresso da ANPET - Rio de Janeiro, v.2, p.1264-1275, 2003.
- OWENS, S.; PERKINS, M.; ELDRIDGE, R. Computational fluid dynamics simulation of structured packing. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 5, p. 2032-2045, 2013.
- PALADINI, E. P. Perspectiva Estratégica da Qualidade. Cap. 2, p. 40-42. In: CARVALHO, M. M (Org.). Gestão da Qualidade: teoria e casos. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2005 – 7ª reimpressão.

- PANNIRSELVAM, G.; FERGUSON, L.; ASH, R.; SIFERD, S.. Operations management research: An update for the 1990s. **Journal of Operations Management**, v. 18, p. 95–112, 1999.
- PARANAÍBA, A.; FORTES, J. **Concessões rodoviárias no contexto da evolução da Teoria Macroeconômica e os benefícios para Goiás**. SEGPLAN, IMB – Instituto Mauro Borges de Estatística de Estudos Socioeconômicos, n. 28, p. 27-32, 2014.
- PARASURAMAN, A.; BERRY, L.; ZEITHAML, V. A. More on improving service quality measurement. **Journal of Retailing**, vol. 69, n. 1, p. 140-147, 1993.
- PEIXOTO, M. Estudo e modelagem da distribuição do tempo de atendimento e da frequência de chegada de veículos em praças de pedágio. Monografia para o grau de Bacharel em Estatística, Universidade Federal do rio Grande do Sul, 2009.
- POLUS, A. Methodology and Simulation for Toll Plaza Analysis. **Road & Transport Research**, v. 1, n. 5, 1996.
- PORTUGAL, L. Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem. Rio de Janeiro: **Interciencia**, 2005.
- PRADO, D. Teoria das filas e da simulação. Nova Lima (MG): **INDG**, 2006.
- PRAIA, C.; GOMES, C. Simulação computacional aplicada à modelagem do processo de recebimento de uniformes na marinha do Brasil. **Engevista**, v. 17, n. 2, p. 273-287, 2015.
- PTV VISSIM v.4.30 **User Manual**. PTV – Planung Transport Verkehr AG, 2011.
- RAMOS, B. S. **Percepção de qualidade das escolas do ponto de vista de alunos do ensino médio**. 2015. 77f. Dissertação (Mestrado em Administração Pública e de Empresas) – Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro/RJ, 2015.
- RANGEL, J.; SOUZA, A.; BASTOS, P.; BAPTISTA, R. Simulação a eventos discretos para treinamento em sistemas de controle. **PO Desenvolvimento**, v. 4, p 97-111, 2012.
- RASHID, R.; HOSEINI, S.; GHOLAMIAN, M.; FEIZABADI, M. Application of queuing theory in production-inventory optimization. **J. Ind. Eng. Int.**, v. 11, p. 485-494, 2015. DOI 10.1007/s40092-015-0115-9
- REDDING, R. T.; JUNGA, A. J. **TPASS**: Dynamic, discrete event simulation and animation of a toll plaza. Proc., 24th Conf. on Winter Simulation, p. 1292–1295, 1992.
- ROSA, G.; LUZ, J. Simulação de moagem mista por rede neural artificial. **REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**, v. 65, n. 2, p. 247-255, 2012.
- ROSSETTI, M.; NI, Q. **Simulating large-scale evacuation scenarios in commercial shopping districts** – methodologies and case study. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010.
- RUSSO, C.; HARB, R.; RADWAN, E. Calibration and verification of SHAKER, a deterministic toll plaza simulation model. **Journal of Transportation Engineering**, v. 136, n. 2, p. 85-92, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000060
- SAKURADA, N.; MIYAKE, D. Aplicação de simulação de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviço. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 1, p. 25-43, 2009.
- SAMUTHIRA, V.; SHYAM, D.; SHOBANA, D. **Analytical energy consumption model for packet transfer over wireless multihop network**. 2016 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES), 2016. DOI: 10.1109/ICICES.2016.7518931
- SANCHEZ, S. M. **Better than a Petaflop**: The Power of Efficient Experimental Design. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, p.73-84, 2008.

- SANTALUCIA, P.; ZANINELLI, A.; RAGAZZONI, L.; GENSINI, G. SIMMED SIMulation in MEDicine, Italian Society for simulation in medicine position paper: executive summary. **Intern. Emerg. Med.**, v. 11, n. 4, p. 537-544, 2015. DOI: 10.1007/s11739-015-1341-2
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 1, p. 12-24, 2012.
- SCHMITT, D. T. **Modeling toll plaza performance** — Decision support system for operators — SHAKER. Thesis, Univ. of Massachusetts, Dartmouth, Mass., 2003.
- SCHAUFLER, A. Toll Plaza Design. NCHRP Synthesis of Highway Practice 240. Transportation Research Board, **National Research Council**, 1997.
- SEYEDHOSEINI, S.; RASHID, R.; KAMALPOUR, I.; ZANGENEH, E. Application of queuing theory in inventory systems with substitution flexibility. **J. Ind. Eng. Int.**, v. 11, p. 37-44, 2015. DOI 10.1007/s40092-015-0099-5
- SHAN, Y.; LIU, W. The study of traffic queuing based on computer simulations and queuing theory. **Applied Mechanics & Materials**, p. 404-3407, 2014.
- SHAMBLIN, J.; STEVENS JR. Pesquisa Operacional: Uma abordagem básica. 3. ed. São Paulo: **Atlas**, 1989.
- SHIH, T.; LAI, C.; HUNG, H.; KU, S.; TSAI, P.; YANG, T.; LIOU, S.; LOH, C.; JAAKKOLA, J. Elemental and organic carbon exposure in highway tollbooths: a study of Taiwanese toll station workers. **Science of the Total Environment**, v. 402, p. 163–170, 2008.
- SHANNON, R. Systems Simulation – The Art and Science. **Prentice-Hall**, 1975.
- SHEU, C.; BABBAR, S. A managerial assessment of the waiting-time performance for alternative service process designs. Omega, **Int. J. Mgmt Sci.**, v. 24, n. 6, p. 689-703, 1996.
- SHUANGSHUANG, J.; YOUSU, C.; RUISENG, D.; ZHENYU, H.; WILLIAM, P.; BRUCE, P. Power grid simulation applications developed using the GridPACK™ high performance computing framework. **Electric Power Systems Research**, v. 141, p. 22–30, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.024>
- SILVA, V.; SOUZA, R.; BORTOLOTTI, S.; COELHO, A. **Teoria das filas aplicada ao caso: Porto de Itajaí-SC. XIII SIMPEP – Bauru, SP, Brasil, novembro, 2006.**
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. Statistical methods. AMES: **Iowa State University Press**, 1967.
- SOARES, R. P.; NETO, C. A. S. Das concessões rodoviárias às parcerias público-privadas: preocupação com o valor do pedágio. Brasília: **Ipea**, 2006.
- SPILIOPOULOU, A.; PAPAMICHAIL, I.; PAPAGEORGIU, M. Toll plaza merging traffic control for throughput maximization. **Journal Transportation Engineering**, v. 136, n. 1, p. 67-76, 2010. 10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:1(67)
- STANIC, B., TUBIC, V., CELAR, N. Design and evaluation of a grade-separated intersection: a case study of the proposed Belgrade ‘Hipodrom’. **Transportation Planning and Technology**, v. 34, n. 6, p. 625–636, 2011.
- STEFFENS, J.; HEIST, D.; PERRY, S.; ISAKOV, V.; BALDAUF, R.; ZHANG, K. Effects of roadway configurations on near-road air quality and the implications on roadway designs. **Atmospheric Environment**, v. 94, p. 74-85, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.015>
- STEVANOVIC, A.; STEVANOVIC, J.; KERGAYE, C. Optimization of traffic signal timings based on surrogate measures of safety. **Transportation Research Part C**, v. 32, p. 159-178, 2013.

- STEVANOVIC, J., STEVANOVIC, A., MARTIN, P.T., BAUER, T. Stochastic optimization of traffic control and transit priority settings in VISSIM. **Transportation Research Part C**, v. 16, n. 3, p. 332–349, 2009.
- SUYABATMAZ, A.; ALTEKIN, F.; SAHIN, G. Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider. **Computers & Industrial Engineering**, v. 70, p. 74–89, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2014.01.004>
- TAGUCHI, G. System of Experimental Design. UNIPUB, **Kraus International Publications**, New York, 1986.
- TAHA, H. Sistemas de Filas. In: TAHA, H. A. Pesquisa Operacional. Ed. 8. São Paulo: **Person Prentice Hall**, cap. 15, p. 247-270, 2008.
- TAMPERE, C.; AREM, B. Traffic flow theory and its applications automated vehicle control: a review. In Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. **IEEE**, p. 391-397, 2001.
- TIANZI, C.; SHAOCHEN, J.; HONGXU, Y.. Comparative study of VISSIM and SIDRA on signalized intersection. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 96, p. 2004-2010, 2004.
- TIEFENSEE, M. **Dimensionamento de cabines de cobrança em praças de pedágio**. Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- TORRES, O. Elementos da teoria das filas. **RAE – Revista de Administração de Empresas**, v. 6, n. 20, 1996.
- TSAI, P. J.; LEE, C. C.; CHEN, M. R.; SHIH, T. S.; LAI, C. H.; LIOU, S. Predicting the contents of BTEX and MTBE for the three types of tollbooth at a highway toll station via the direct and indirect approaches. **Atmospheric Environment**, v. 36, p. 5961–5969, 2002.
- TSAI, P. J.; SHIH, T. S.; CHEN, H. L.; LEE, W. J.; LAI, C. H.; LIOU, S. Assessing and predicting the exposures of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their carcinogenic potencies from vehicle engine exhausts to highway toll station workers. **Atmospheric Environment**, v. 38, p. 333–343, 2004.
- VANBERKEL, P.; BOUCHERIE, R.; HANS, E.; HURINK, J. Optimizing the strategic patient mix combining queueing theory and dynamic programming. **Computers & Operations Research**, v. 43, p. 271-279, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2013.09.020>
- VAN DIJK, N. M.; HERMANS, M. D.; TEUNISSE, M. J. G.; SCHURMAN, H. **Designing the Westerschelde tunnel toll plaza using a combination of queueing and simulation**. Winter Simulation Conference Proceedings Part 22, p. 1272–1279, 1999.
- VASCONCELOS, A. Modelos de atribuição/simulação de tráfego: O impacto na qualidade dos resultados de erros no processo de modelação. Tese de Doutorado. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2004.
- VATS, S.; VATS, G.; VAISH, R.; KUMAR, V. Selection of optimal electronic toll collection system for India: a subjective-fuzzy decision making approach. **Applied Soft Computing**, v. 21, p. 444-452, 2014.
- VENIGALLA, M.; KRIMMER, M. Impact of Electronic Toll Collection and Electronic Screening on Heavy-Duty Vehicle Emissions. In Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, n. 1987, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., p. 11–20, 2006.
- VILAPLANA, J.; SOLSONA, F.; TEIXIDÓ, I.; MATEO, J.; ABELLA, F.; RIUS, J. A queueing theory model for cloud computing. **J. Supercomput**, v. 69, p. 492-507, 2014. DOI 10.1007/s11227-014-1177-y
- VILARINHO, C. Calibração de modelos microscópicos de simulação de tráfego em redes urbanas. Tese de mestrado. Porto: FEUP, 2008.

VORASAYAN, J.; RYAN, S. Optimal price and quantity for refurbished products. **Production and Operations Management**, v. 15, p. 369–383, 2006.

WANISUBUT, S. **A Toll Plaza Simulation Model and Level-of-service Criteria**, Ann Arbor, Mich., U.M.I., PhD thesis, 1989.

WEN, D.; XUE-FEN, C.; ZI-CHUAN, L.; YU-HONG, Z. Queueing theory based analysis for packet jitter of mixed services. **The Journal of China Universities of Posts and telecommunications**, v. 21, n. 3, p. 71-76, 2014.

WERKEMA, M. Planejamento e análise de experimentos: como identificar, avaliar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte: **Fundação Christiano Ottoni**, E.E.UFMG, 1996.

WIEDEMANN, R. **Simulation des staßenverkehrsflusses (in German)**. Schriftenrsitat des Institutes Fur Verkehrswesen der Uinversitat, Karlsruhe, heft 8, Germany, 1999.

WIEDEMANN, R. **Simulation des Verkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen**, Heft 8, Universität (TU) Karlsruhe, Germany, 1974.

WNAG, Z.; LU, M.; YUAN, X.; ZHANG, J.; WETERING, H. Visual traffic jam analysis based on trajectory data. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 19, p. 2159-2168, 2013. DOI: 10.1109/TVCG.2013.228

WOO, T. H.; HOEL, L. H. Toll Plaza Capacity and Level of Service. Transportation Research Record 1320, p.119-127. **Transportation Research Board**, Washington, D.C., 1991.

XU, B.; LIN, B. Factors affecting carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in China’s transport sector: a dynamic nonparametric additive regression model. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 311-322, 2015.

XU, S.; LONG, G.; JIHONG, O. Service performance analysis and improvement for a ticket queue with balking customers. **Management Science**, v. 53, n. 6, p. 971–990, 2007.

YANG, S.; HU, F.; JAEGER, C. Impact factors and risk analysis of tropical cyclones on a highway network. **Risk Analysis**, v. 36, n. 2, 2016.

YIN, J. The traffic capacity model M/G/1 simulated by the Monte Carlo algorithm. Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE), 2014. DOI: 10.1109/InfoSEEE.2014.6948116

ZANG, H.; KIM, T. Transpn. **Res. Part B**, v. 39, n. 385, 2005.

ZARRILLO, M. L. Capacity calculations For two toll facilities: two experiences in ETC implementation. **Transportation Research Board**, 79th Annual Meeting, Paper No. 00-1658, 2000.

ZARRILLO, M. L. **Development and Applications of TPMODEL: A Queuing model describing Traffic Operations during Electronic Toll Collection (ETC)**. Ph.D. Thesis. University of Central Florida - UFC, Florida, USA, 1998.

ZARRILLO, M.L., RADWAN, A.E., AL-DEEK, H.M. Modeling traffic operations at electronic toll collection and traffic management systems. **Computers and Industrial Engineering**, v. 33, p. 857–860, 1997.

ZARRILLO, M. L.; RADWAN, A. E.; DOWD, J. Toll network capacity calculator: Operations management and assessment tool for toll network operators. **Transp. Res. Rec.**, v. 1181, 2002.

ZEITHAML, V.; BITNER, M.. Marketing de serviços: a empresa com foco no cliente. 2 ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2003.

ZHANG, J.; LI, H.; LUO, Y.; TANG, G. Error analysis for rendezvous phasing orbital control using design of experiments. **Aerospace Science and technology**, v. 17, p. 74-82, 2012.

ZHANG, Y.; OWEN, L. E.; CLARK, J. E. Multi-regime Approach for Microscopic Traffic Simulation, Transportation Research Record 1631, **Transportation Research Board**, Washington, DC, p. 103–112, 2001.

ZHAO, Y.; DING, H.; WANG, M.; LIANG, Z. The application of the double queue asymmetric gated service polling control theory in intelligent traffic system. **MATEC Web of Conference**, v. 44, 2016. DOI 10.1051/mateconf/20164401025