

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA

DIMENSIONAMENTO DE CABINES DE COBRANÇA EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

Marisa Dagmar Tiefensee

Porto Alegre

2005

Marisa Dagmar Tiefensee

DIMENSIONAMENTO DE CABINES DE COBRANÇA EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia – modalidade Profissionalizante – Ênfase Sistemas de Transportes.

Orientador: Professora Helena Bettella Cybis, PhD

Porto Alegre

2005

Este Trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pelo Coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^ª. Helena Beatriz Bettella Cybis, Dra.

Orientadora Escola de Engenharia/UFRGS

Prof^ª. Helena Beatriz Bettella Cybis, Dra.

Coordenadora MP/Escola de Engenharia/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Afonso dos Santos Senna

PPGEP/UFRGS

Prof. Dr. Emílio Merino Dominguez

PPGEP/UFRGS

Prof. Dra. Christine Tessele Nodari

PPGEP/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Roberto e minhas filhas Camila e Luísa, pela paciência e compreensão nas tantas horas privadas de minha companhia.

Ao Consórcio Univias, na pessoa de seu Presidente, Eng. Sérgio Coelho da Silva e seu Gerente de Operações, Eng. Marco Antônio Campesatto dos Santos, pelo incessante incentivo à busca do conhecimento. Aos demais colegas do Univias que me ajudaram coletando de dados, aplicando e analisando os resultado, corrigindo o trabalho ou simplesmente me substituindo nos afazeres rotineiros, para que eu pudesse me dedicar a conclusão deste.

Aos professores e colegas do Lastran, pelo auxílio na elaboração deste, me orientando e dividindo comigo seus conhecimentos.

A todos que de alguma forma me ajudaram e me incentivaram a concluir este trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a elaboração de um procedimento de cálculo para o dimensionamento de condições ótimas de operação para praças de pedágio. O número de cabines de cobrança abertas deve propiciar uma boa relação entre a oferta e a demanda de serviço nestas infra-estruturas, minimizando custos e mantendo níveis de serviço aceitáveis aos usuários. Os dados utilizados são provenientes de séries históricas de uma concessionária do estado do Rio Grande do Sul. Foi realizada modelagem utilizando teoria de filas, sendo os parâmetros as taxas de chegadas e atendimento de veículos nas cabines. Tempos de espera para pagamento e o número de veículos nas filas foram utilizadas como restrição e também como medidas de eficiência resultantes. A modelagem inicial não conseguiu refletir as condições de tráfego nas praças, verificando-se a necessidade de um tratamento específico para as diferentes categorias de veículos. Aplicou-se um coeficiente de correção aos tempos de atendimento do modelo inicial, levando-se em consideração a composição do tráfego por dia e hora e a taxa de atendimento para veículos leves e pesados. O resultado foi um adequado dimensionamento do número de cabines abertas, conforme a intensidade e composição do fluxo de tráfego horário.

Palavra-chave: Praças de Pedágio. Teoria das Filas. Coleta Manual de Pedágios. Níveis de Serviço.

ABSTRACT

The objective of this work is to provide a calculus process for determining optimal operational conditions for toll plazas. The number of opened tollbooths has to provide satisfactory relationship between supply and demand in these infrastructures, minimizing costs with acceptable level of service. A model based on queuing theory was constructed using arrival rates and service rates in tollbooths collected in a concessionary in the state of Rio Grande do Sul. Total waiting time for payment and number of vehicles in queue were regarded as modeling constraints. Estimations of waiting time and queuing length obtained from the model were also regarded as measures of efficiency. Initial analysis of the model indicated that the model couldn't reflect the reality. A correction coefficient was applied in service times for different categories of vehicles and intensity of traffic stream. The result is an appropriate model that can be used to determine the optimal number of opened tollbooths according to intensity of traffic.

Key Word: Toll Plaza. Queuing Theory. Manual Toll Collection. Level of Service

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de filas	36
Figura 2 - Convias: Pólo rodoviário de Caxias do Sul	44
Figura 3 - Metrovias: Pólo rodoviário Metropolitano	45
Figura 4 - Sulvias: Pólo rodoviário de Lajeado	46
Figura 5 - Fluxo médio horário - Praça de Guaíba	50
Figura 6 - Distribuição de frequência real e Poisson para taxa de chegada - Guaíba - 16:00 as 17:00 h	51
Figura 7 - Tempos de atendimento - praça de Guaíba.....	52
Figura 8 - Tempo de atendimento por categoria de veículo	54
Figura 9 - Tempo de atendimento por forma de pagamento	55
Figura 10 - - Esquema de distribuição de cabines de cobrança praça de Guaíba.....	57
Figura 11 - DFD Nível 0 – Dimensionamento de cabines de cobrança em praça de pedágio .	61
Figura 12 - DFD Nível 1 - Dimensionar cabines de cobrança	62
Figura 13 – DFD Nível 2 – Dimensionar cabines de cobrança.....	64
Figura 14 - Dimensionamento de cabines de cobrança - Praça de Guaíba – Semanal - Jan	65
Figura 15 - Dimensionamento de cabines de cobrança - Praça de Guaíba – domingo - Jan....	66
Figura 16 - Lay-out praça de Guaíba.....	70
Figura 17 - Dimensionamento de cabines de cobrança – Praça de Guaíba - ref. Quarta-feira do mês de maio – Original.....	72

Figura 18 - Dimensionamento de cabines de cobrança – Praça de Guaíba - ref. Quarta-feira do mês de maio – Revisado	72
Figura 19 – Formulário para a pesquisa de tempo de atendimento	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da literatura para capacidade de cabine de cobrança manual e tempos de atendimentos.....	29
Tabela 2 - Critérios de níveis de serviço - Woo e Hoel.....	32
Tabela 3 - Critérios de níveis de serviço - Lin e Su	32
Tabela 4 - Critérios de níveis de serviços - Klodzinski e Al-Deek	33
Tabela 5 - Teste Z: Duas amostras para médias - comparando dados da entrada da praça com dados das cabines de cobrança	49
Tabela 6 - Teste de aderência da distribuição de Poisson à taxa de chegada - Teste de Kolmogorov-Smirnov.....	51
Tabela 7 - Parâmetros relativos aos tempos de atendimento - praça de Guaíba	53
Tabela 8 - Parâmetros relativos aos tempos de atendimento por categoria de veículo	54
Tabela 9 - Parâmetros relativos aos tempos de atendimento por forma de pagamento.....	54
Tabela 10 -Crescimento do tráfego na Praça de Guaíba - 2004 / 2003	68
Tabela 11 - Aumento de tráfego por categoria na Praça de Guaíba - 2004 x 2003.....	69
Tabela 12 - Composição do tráfego por hora - Praça de Guaíba - Média semanal	70
Tabela 13 - Composição do tráfego por hora - Praça de Guaíba - Média de segunda a sexta .	70
Tabela 14 - Calculo da Sazonalidade pela série artificial da média móvel	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categoria de Veículos para Cobrança de Pedágio por País	20
Quadro 2 - Ampliação da malha rodoviário	22
Quadro 3 - Quantidade de km explorados pelo estado ou iniciativa privada no Brasil, nº de Praças de Pedágio e cabines de cobrança	23
Quadro 4 - Trechos pedagiados, Concedidos no PECCR/RS, Sob Administração do DAER e concessões federais - Situação Atual.....	26
Quadro 5 – Descrição dos níveis de serviço para auto-estradas.....	31
Quadro 6 - Nº de cabines disponíveis - praça de Guaíba	57
Quadro 7 - Passo do Cálculo da série artificial da média móvel.....	80

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABCR – Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias

AGCR – Associação Gaúcha de Concessionárias de Rodovias

AGERGS – Agência Reguladora de Serviços Delegados do Rio Grande do Sul

AVI – *Automatic Vehicle Identification*

CPE – Carros de passeio equivalentes

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DFD – Diagrama de Fluxo de Dados

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DSRC – *Dedicated Short Range Communication*

EPG – Programa de Excelência nas Práticas de Gestão do Univas

ETC – *Electronic Tool Collection*

FRN – Fundo Rodoviário Nacional

GPS – *Global Position System*

GSM – *Global System for Mobile Communications*

HCM – Highway Capacity Manual

OBU – *On Board Unities*

PBE – Projeto Básico de Exploração, parte integrante do contrato de concessão do PECR.

PECR/RS – Programa Estadual de Concessões Rodoviárias do Rio Grande do Sul

SNV – Sistema Nacional Viário

SPU – Sistema de Pedágio Univias

TA-1 – Primeiro Termo Aditivo ao Contrato

VDMA – Volume Diário Médio Anual

VPS – *Vehicle Positioning System*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE QUADROS.....	10
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS	11
SUMÁRIO.....	13
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 COBRANÇA DE PEDÁGIO E CONCESSÕES RODOVIÁRIAS	19
2.1 EXPERIÊNCIA DE OUTROS PAÍSES	19
2.2 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS	22
2.3 EXPERIÊNCIAS DO RIO GRANDE DO SUL – PECCR/RS	24
3 PRAÇAS DE PEDÁGIO.....	27
3.1 CAPACIDADE DE UMA PRAÇA DE PEDÁGIO.....	28
3.2 NÍVEL DE SERVIÇO.....	30
3.3 ANÁLISE DE PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DE PRAÇA DE PEDÁGIO	33
3.4 TEORIA DAS FILAS	35

4	DESCRIÇÃO DO MODELO	42
4.1	CONCEPÇÃO DO MODELO	42
4.2	CONSÓRCIO UNIVIAS.....	43
4.2.1	Pólo de Caxias do Sul.....	44
4.2.2	Pólo Metropolitano	45
4.2.3	Pólo de Lajeado	45
4.2.4	Praças de Pedágio	46
4.3	FORMULAÇÃO DO MODELO DE FILAS PARA MODELAGEM DE PRAÇA DE PEDÁGIO	47
4.4	PADRÕES ADMISSÍVEIS.....	47
4.5	DADOS Coletados	48
4.5.1	Taxa de Chegada	48
4.5.2	Taxa de Atendimento.....	51
4.5.3	Índice de Sazonalidade	56
4.5.4	Número de Cabines	57
4.5.5	Fator de Crescimento.....	57
4.5.6	Fator de Segurança	58
4.6	DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	58
5	RESULTADOS OBTIDOS	65
5.1	MODELO IMPLANTADO.....	65
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.3	REVISÃO DO MODELO	71
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A - FORMULÁRIO PARA PESQUISA DE TEMPO DE ATENDIMENTO	79
	APÊNDICE B – CÁLCULO DA SAZONALIDADE DA PRAÇA DE GUAÍBA	80

1 INTRODUÇÃO

A cobrança de pedágio como fonte de renda para manutenção e operação de rodovias, administradas pelo Poder Público ou por empresas privadas através de concessão, é uma realidade tanto no Rio Grande do Sul, como no Brasil e no mundo.

Os primeiros registros de concessões rodoviárias no Brasil são datados do século XIX, quando o Imperador Pedro II autorizou o Engenheiro Mariano Procópio Ferreira Laje a construir, entre 1856 e 1861, ligação entre Juiz de Fora e Petrópolis. Entretanto, somente em 1946 o pedágio foi instituído formalmente na Constituição Brasileira, que o inclui no artigo 27º entre as taxas destinadas a indenizar por despesas de construção, conservação e melhoramentos de estradas. Do final da década de 60, até o início da década de 90, os pedágios existentes no Brasil foram basicamente explorados por órgãos estatais, tais como o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), Desenvolvimento Rodoviário SA (DERSA), Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP) e Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens (DAER/RS). Somente a partir do início da década de 90 começaram a ser negociados os contratos de concessão hoje em vigor, vindo a se concretizar em 1995 com a BR 101, Rio–Niterói (ponte Presidente Costa e Silva) e BR 116, Rio–São Paulo (rodovia Presidente Dutra) (Machado, 2000).

No Rio Grande do Sul, a formatação atual dos pedágios iniciou no período entre 1991 e 1994 com a implantação do Programa de Pedágio Estadual, onde o DAER/RS, passou a operar três trechos rodoviários, num total de 182 km de rodovias, com 3 praças de pedágio. No governo seguinte (1995/1998), o DAER/RS, criou o Programa Estadual de Concessões Rodoviárias (PECR), concedendo em torno de 1.800 Km de rodovias, através de um modelo de Pólos de Concessão Rodoviária (Machado, 2000) num total de 26 praças de pedágio. Há também no estado, 2 concessionárias federais, operando 735 km de rodovias, com 8 praças de pedágio.

Atualmente no Brasil em torno de 9.500 km de rodovias estão concedidas à iniciativa privada, perfazendo um total de 5% de sua malha asfaltada, onde são operadas 164 praças de pedágio, além de outras 20 praças operadas pela administração pública (ABCR, 2004).

Com o evento da transferência das rodovias e cobrança de pedágio para empresas privadas, vários controles foram adicionados ao processo de operação de rodovias, tanto por imposição contratual quanto por necessidade de controle de custo das empresas.

Normalmente os contratos são monitorados por parâmetros de qualidade do serviço prestado ao usuário, em aspectos que dizem respeito à qualidade do pavimento e sinalização, serviço de assistência ao usuário, capacidade e nível de serviço nos diversos segmentos e tempo de atendimento às diversas ocorrências.

A busca da qualidade exigida pelos contratos faz com que as empresas procurem minimizar seus custos e otimizar seus investimentos, dentro da realidade de cada contrato.

As melhorias implantadas pela operação de rodovias, concedidas ou não, nem sempre são percebidas pelos usuários. Em função do pagamento do pedágio, estes buscam resultados imediatos, como por exemplo: rodovias em boas condições, atendimento rápido e eficaz, tanto na rodovia, através de atendimento de guincho e ambulância, quanto na praça de pedágio.

A praça de pedágio passa a ser elemento chave na operação de rodovia. É a ela que o usuário relaciona suas satisfações e insatisfações em relação à rodovia, aos atendimentos e à cobrança de pedágio.

No Rio Grande do Sul, nas 37 praças de pedágio em operação, com um total de 284 cabines de cobrança, apenas 7 cabines possuem cobrança automática, sendo que em 98% dos casos a cobrança é manual.

Entende-se por cobrança manual, aquela em que o veículo tem que parar na cabine de cobrança e que, de algum modo, é necessária a interferência de um arrecadador para que a transação seja realizada.

Nas praças que possuem cobrança manual, o desconforto sentido pelo usuário em virtude das paradas necessárias para efetuar pagamento em espécie, o aumento no consumo de combustível e o desgaste do veículo em virtude destas paradas, são mais acentuados. A poluição sonora e ambiental e o custo operacional da concessionária, também aumentam neste tipo de cobrança (FIPE, 2003).

A introdução de novas tecnologias de cobrança de pedágio pode trazer benefícios, acelerando o tempo de atendimento, diminuindo atrasos e espera em fila. Atualmente, a implantação da cobrança eletrônica na maioria das praças de pedágio do Rio Grande do Sul

não possui viabilidade econômica, devido aos baixos volumes de tráfego. Assim sendo, as concessionárias estão em constante busca por alternativas que minimizem o desconforto ao usuário e seus custos operacionais.

Normalmente o número de cabines em operação, por hora, em uma praça de pedágio, é dimensionada conforme a experiência do responsável pela operação, o que, muitas vezes, onera os custos da concessionária.

Um correto dimensionamento do número de cabines de cobrança leva a um efetivo adequado às necessidades e conseqüente redução de custos. Já em 1954, Edie propôs uma metodologia de dimensionamento de cabines, visando reduzir os custos da concessionária. Outros estudos foram produzidos com este mesmo objetivo (DANKO e GULEWICZ, 1994; WIDMER, 1999).

Consciente da parcela que a cobrança manual representa nos custos operacionais das concessionárias, e do pouco material técnico disponível sobre o assunto, buscou-se desenvolver um trabalho de dimensionamento do número de cabines abertas, levando em consideração o fluxo de tráfego, parâmetros contratuais e a qualidade dos serviços oferecidos. Para tanto, buscou-se o apoio do Consórcio Univias, que possui 13 praças de pedágio, com 101 cabines de cobrança, todas manuais. O Univias colaborou na realização deste, fornecendo os dados necessários para validação do modelo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo a elaboração de um procedimento de cálculo que permita dimensionar o número de cabines de cobrança manuais necessárias para determinada praça de pedágio. Este dimensionamento deve atender aos requisitos contratuais e operacionais da concessionária, maximizando a eficiência dos recursos empregados na operação, e minimizando custos e os efeitos negativos da cobrança manual.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar um procedimento de cálculo que, otimize o número de cabines abertas por dia, hora e sentido de tráfego, mantendo níveis de serviço aceitáveis. Esta deve levar em consideração a cobrança manual de pedágio, dados reais das praças analisadas, parâmetros contratuais e operacionais como sazonalidade de tráfego, limitações físicas das praças e necessidades específicas;
- Obter informações operacionais que justifiquem a adoção de possíveis medidas alternativas de pagamento (papa-fila).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 6 capítulos, nos quais são apresentados e desenvolvidos os assuntos referentes ao dimensionamento de cabines de cobrança em praça de pedágio:

O capítulo 2 faz uma análise da cobrança de pedágio e concessão rodoviária no Mundo, no Brasil e no Estado do Rio Grande do Sul.

No capítulo 3 apresenta-se uma revisão bibliográfica, enfocando a cobrança de pedágio em cabines manuais, o dimensionamento do número de cabines, as medidas de desempenho para praças de pedágio, o nível de serviço, as características operacionais que influenciam no comprimento das filas e o uso da teoria das filas.

O capítulo 4 é dedicado à descrição do modelo de filas desenvolvido, ao processo de coleta e a análise dos dados.

O capítulo 5 trata da apresentação dos resultados do modelo e de uma aplicação em campo.

Finalmente no capítulo 6, estão apresentadas as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 COBRANÇA DE PEDÁGIO E CONCESSÕES RODOVIÁRIAS

Este capítulo aborda como a cobrança de pedágio e a gestão de rodovias são tratadas no mundo, no Brasil e no Rio Grande do Sul.

Procurou-se enfocar os vários aspectos relacionados ao assunto, visando o tipo de estrutura pedagiada, critério de cobrança, estrutura tarifária, classificação de veículo e sistema de cobrança, elencando-se os pontos positivos e negativos e sua repercussão nos modelos nacionais implantados.

2.1 EXPERIÊNCIA DE OUTROS PAÍSES

A concessão de rodovias, como forma de transferência de encargos de financiamento para manutenção e ampliação do sistema rodoviário ao usuário, através de pagamento de pedágio, passou a ser uma tendência mundial. Países com características tão diferentes como Japão, Rússia, Hungria, Malásia, China, México, Argentina, Paquistão, Cingapura, Chile, Filipinas e integrantes da Comunidade Européia são alguns dos exemplos que aderiram ao pedágio como fonte de financiamento para suas demandas rodoviárias (MACHADO, 2000).

Até poucos anos atrás, a experiência mundial na exploração dos pedágios, era majoritariamente feita pelo Poder Público, diretamente ou através de entidades sob controle estatal, como é o caso da França e Itália. Somente a partir do final dos anos 80, é que se desenvolveu a transferência deste serviço à iniciativa privada, como é o caso do México, Argentina e Brasil. O controle da concessão e a definição da tarifa, via de regra, ficam com o Estado.

Cada país possui suas características em relação à cobrança de pedágio, moldadas por circunstâncias peculiares, como veremos a seguir:

Quanto ao tipo de estrutura rodoviária a ser pedagiada, na maioria dos países, os pedágios são cobrados mediante a exploração das estruturas de grande porte, como auto-estradas, túneis e/ou grandes pontes, com características de vias bloqueadas, em pista dupla, construídas para substituir ou complementar vias obsoletas existentes (LEE, 1996).

No critério de cobrança, o valor da tarifa de pedágio leva em conta vários fatores que muitas vezes não são percebidos pelo usuário, como por exemplo: o custo de congestionamentos, desgaste de pavimento, acidentes e fatores ambientais.

Conforme afirmam Huang e Huang (2002), a praça de pedágio além de coletar valores, também tem a função de regular o fluxo da rodovia na qual esta inserida. Há casos onde o pedágio é utilizado para reprimir a demanda, como os pedágios urbanos de Londres e Cingapura, onde o acesso a determinadas regiões é taxado. Em algumas rodovias do EUA, nos horários mais congestionados, o pedágio fica mais caro, diminuindo a circulação de veículos. Em Portugal há rodovias que praticam descontos para veículos pesados durante algumas horas de baixo tráfego. O Chile também utiliza o escalonamento de tarifas, conforme horário e nível de serviço da rodovia (FIPE 2003).

A cobrança de pedágio por quilômetro rodado é uma forma justa de solucionar a iniquidade na cobrança de pedágio. Este sistema de cobrança já é realidade em países como a Suíça e Austrália. Vários outros países estão estudando e implantando sistemas semelhante.

Em relação à composição tarifária, no geral baseia-se na categoria dos veículos, tendendo a cobrar mais dos veículos pesados em função do desgaste gerado no pavimento, variando a maneira de categorizar os veículos. O Quadro 1 indica como são categorizados os veículos para cobrança em alguns países do mundo (Lastran, 1998):

Quadro 1 - Categoria de Veículos para Cobrança de Pedágio por País

Noruega	3 categorias (leves < 3,5 toneladas ou < 6 metros; pesado > 3,5 toneladas ou entre 6 e 12 metros; e veículos > 12 metros)
Espanha	3 categorias (leves, Camionetas de 2 ou 3 eixos, caminhões >= 4 eixos)
França	Altura do capô e número de eixos (5 categorias)
EUA	De acordo com o número de eixos
Brasil	De acordo com o número de eixos
Argentina	Tamanho do veículo e número de eixo

Fonte: FIPE 2003

Quanto ao sistema de cobrança de pedágio, muitos países possuem, além do sistema de cobrança manual, sistemas de cobrança eletrônica de pedágio. A grande vantagem

é que na maioria das vezes estes são interoperáveis, ou seja, dados e serviços provenientes de outros sistemas ou operadores podem ser compartilhados entre diversas concessionárias. Estudos indicam também, que a utilização de vias com *Electronic Tool Collection* (ETC), diminuem a emissão de gases nocivos nas praças de pedágio (COELHO et al, 2004, KLONDZINSKI et al, 1998). Como os veículos não necessitam parar para efetuar o pagamento, a emissão destes gases diminui. Um exemplo é a Via Verde em Portugal, que possui um sistema ETC interoperável em 118 praças de pedágio (VIA VERDE, 2004).

Como exemplos de sistema eletrônicos de cobrança de pedágio, podemos citar:

Sistema de Radio Freqüência – Comunicação dedicada de curto alcance ou *DSRC* (*Dedicated Short Range Communication*), conhecido na Europa como road-side systems ou RBS. Permite que a cobrança seja feita sem necessidade de parada (ECOPLAN, 2001) através de equipamentos instalados na rodovia (balizas antenas) que se comunicam com unidades a bordo dos veículos (*transpondes*), por intermédio de micro-ondas de curto alcance. Encontramos este sistema instalado nas rodovias da Europa, França, Dinamarca (nas pontes Storebaelt e Oresund), Suécia, Noruega, Portugal, Argentina, Hong Kong e Japão.

Sistemas Ópticos e Semi-Ópticos são usados para cobrança e coação de infratores. O sistema óptico lê a placa da licença dos veículos e a identifica em uma base de dados. O Sistema Semi-Óptico identifica adesivo contendo códigos de barra estrategicamente afixados. Os selos pedágios como os usados na Dinamarca e Holanda são exemplos deste sistema.

Sistema Autônomo ou de Posicionamento de veículos, *Vehicle Positioning System* (VPS). Cobra o número de quilômetros rodados dentro de determinada área. Utiliza receptores GPS (*Global Position System*) para localizar o veículo, e a tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communications*) para comunicação dos dados de localização à uma central de cobrança. Encontramos este sistema na Suíça e na Austrália (FIPE 2003). Na Alemanha o sistema está em implantação (DEUTSCHE-WELLE, 2004).

No Chile foi proposto o sistema *free-flow multiline*, onde um pórtico metálico abriga os dispositivos eletrônicos de identificação dos *transponders* dos veículos equipados, sem a presença física de praça de pedágio.

O Smart-card é um meio automático de pagamento bastante utilizado no mundo. A tarifa de pedágio é deduzida do saldo armazenado num chip eletrônico que é instalado no cartão. Estes cartões podem ser sem contato, que são lidos por uma unidade leitora por

aproximação, ou com contato, requerendo contato físico com a unidade leitora. Este meio de pagamento é muito usado na Itália.

Como no Brasil concessão e cobrança de pedágios são assuntos relativamente novos, a implantação dos modelos nacionais muitas vezes foram baseados nas experiências internacionais.

2.2 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS

No início da década de 40 a infra-estrutura rodoviária era bastante precária. A partir de 1945, por meio da Lei Joppeter, foi criado o Sistema Nacional Viário (SNV), mantido pelo Fundo Rodoviário Nacional (FRN), cujos recursos permitiram a qualificação do quadro técnico do DNER e ampliação de nossa malha viária, conforme dados do Quadro 2 (MACHADO, 2002; DNIT,2004).

Quadro 2 - Ampliação da malha rodoviária

Ano	Malha rodoviária (km)	Nº de km pavimentados
1940	192.000	775
1965	570.000	19.000
2004	2.703.766	181.762

Fonte: Machado, 2002; DNIT, 2004

Desde a década de 70, após duas crises do petróleo e aumento das taxas de juros internacionais, a população brasileira tem assistido uma gradativa deterioração dos serviços públicos, principalmente no setor de infra-estrutura viária. O fato das políticas fiscal e tributária ter alterado nossos dispositivos constitucionais, levaram ao esvaziamento do FRN, até a sua extinção na constituição de 1988.

A falta de investimento no setor rodoviário provocou um gradativo e sistemático processo de deterioração das rodovias. Conforme levantamento feitos pela Confederação Nacional dos transportes (CNT), malha rodoviária brasileira pavimentada no início da década de 90 apresentava as seguintes características: 33% irrecuperável, 21% ruim, 44% regular e 2% boa (MACHADO, 2002).

Baseada nas experiências de pedágios operadas por órgãos estatais e em experiências internacionais bem sucedidas, a solução encontrada pela União e por diversos Estados, foi a concessão à iniciativa privada dos serviços de manutenção, operação e conservação das rodovias. Em troca da arrecadação do pedágio, empresas privadas concessionárias se comprometem a prestar estes serviços e, em alguns casos, até ampliar a capacidade das rodovias. Neste modelo foram concedidas não apenas auto-estradas e pontes, mas também viabilizados investimentos em conservação de vias singelas (FIPE, 2001).

No Quadro 3 pode ser verificada a atual configuração das rodovias brasileiras operadas tanto pela iniciativa privada como por órgãos estatais.

Quadro 3 - Quantidade de km explorados pelo estado ou iniciativa privada no Brasil, nº de Praças de Pedágio e cabines de cobrança

ESTADO	Nº de km Explorados	Nº de Praças de pedágio	Nº de Cabines de cobrança
Operadas pela iniciativa privada			
Bahia	217,17	1	18
Espírito Santo	67,50	2	27
Paraná	2.495,23	26	235
Rio de Janeiro	566,06	16	155
Rio Grande do Sul	2.403,31	34	263
São Paulo	3.890,33	85	997
Total	9.639,60	164	1695
Operadas por órgãos estatais			
Rio Grande do Sul	182	3	21
Mato Grosso	ponte	1	Dados indisponíveis
São Paulo	Dados indisponíveis	14	Dados indisponíveis
Paraná	ponte	1	2
Fortaleza	ponte	1	12
Total		20	

Fonte: ABCR, 2004

Quanto ao sistema de pagamento, as cobranças em geral se baseiam no tipo de veículo e no número de eixos, com cobranças que podem ser com ou sem paradas. A cobrança manual é utilizada em 65% das cabines de cobrança no Brasil (OLIVEIRA et al, 2004).

Entende-se por cobrança manual, aquele onde o veículo necessita parar na cabine de cobrança, e que de algum modo, é necessário a interferência do arrecadador para a transação ser realizada.

Em termos de cobrança eletrônica, no Brasil há basicamente dois tipos, que serão descritos a seguir. Um dos maiores entraves para a expansão da cobrança eletrônica nas rodovias do país é a falta de interoperabilidade entre os sistemas das diversas concessionárias:

a) Sistema Sem-Parar, é baseado no sistema DSRC com equipamento de bordo (*transponder*) e equipamento nas vias. O nome “Sem-Parar” deve-se ao fato que o veículo passa por uma via dedicada, sem necessidade de parar para efetuar o pagamento. O valor do pedágio é debitado automaticamente na conta corrente ou cartão de crédito do usuário.

As concessionárias que operam com este sistema se concentram nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo e são divididas em 4 grupos que permitem a interoperabilidade entre seus sistemas.

b) Cartões tipo *Smart-card* com ou sem contato, são geralmente desenvolvidos pelas próprias concessionárias que possuem cadastro próprio, não permitindo a interoperabilidade com sistemas similares de outras concessionárias. Neste grupo pode ser classificada uma operadora de vale-pedágio que possui um cartão, operável na grande maioria das concessionárias.

Para agilizar a cobrança manual, algumas concessionárias desenvolveram sistemas de cartões, com tarja magnética ou código de barras, que ainda requerem a parada e a interferência de um arrecadador para concluir a operação.

2.3 EXPERIÊNCIAS DO RIO GRANDE DO SUL – PECR/RS

Entre 1992 e 1994, o DAER implantou o “Programa de Pedágio sob Administração Direta”, que foi composto de 3 praças de pedágio e 182 km de rodovias estaduais. Este programa é gerenciado pelo próprio DAER, num modelo chamado pedágio comunitário, onde as entidades representativas das comunidades participam efetivamente na

aplicação das receitas provenientes das tarifas. Os recursos são utilizados para melhorias das vias e em obras para as comunidades lindeiras.

Baseado nesta experiência e diante da situação precária em que se encontravam as rodovias do estado, a falta de recursos e a determinação do governo federal em delegar aos estados e municípios a administração das rodovias federais, o DAER desenvolveu o PECR, baseado no modelo Pólo de Concessão Rodoviária (1995/1998). Este seguia a tendência nacional de promover uma maior participação do setor privado na conservação e melhoramentos da malha rodoviária, com a implantação de novas praças de pedágio.

O modelo consiste em um nó da malha rodoviária, agrupando no mínimo três e no máximo cinco trechos rodoviários que possuem em média 50 km de extensão, com Volume Diário Médio Anual (VDMA) variado, onde poderão ser dispostas as praças de pedágio. Neste modelo, une-se em um mesmo Pólo, com mesmo valor de tarifa, trechos de maior e de menor tráfego, de forma que, por grupo de rodovias, o empreendimento torna-se viável. Rodovias com maior VDMA subsidiam economicamente rodovias, pertencentes ao mesmo pólo, com baixo VDMA.

O PECR resultou em 7 Pólos Rodoviários, com 1.766,25 quilômetros de rodovias concedidas, totalizando 26 praças de pedágios com 173 cabines de cobranças, todas manuais (ABCR, 2004).

Os contratos prevêm as tarifas a serem cobradas e as formas de reajustamento, sendo que estas são diferenciadas por categoria de veículo, em função dos desgastes físicos que causam aos pavimentos das rodovias e conseqüentes custos de manutenção.

No Quadro 4 verifica-se que, no Rio Grande do Sul, além das concessionárias do PECR e dos pedágios sob administração do DAER, há também duas concessionárias sob jurisdição federal, o Pólo de Pelotas, sob administração da Ecosul, e a BR290, de Osório a Eldorado do Sul, administrado pela Concepa.

Quanto ao tipo de cobrança praticada nas praças do Estado, pode-se dizer que é predominantemente manual em todas as suas 284 cabines de cobrança, com exceção da Concepa que possui 7 cabines automáticas, equipadas para transações com Smart-card sem contato, desenvolvido pela própria concessionária e que não é interoperável. As demais concessionárias estão equipadas para receber cartões de tarja magnética e de código de barras. Nesta modalidade de pagamento enquadram-se cartões desenvolvidos pelas próprias concessionárias, que não são interoperáveis, e outros dois tipos, desenvolvidos por uma

operadora de Vale Pedágio, interoperável no Brasil e um sistema pós-pago, interoperável em todas as praças do Rio Grande do Sul.

Quadro 4 - Trechos pedagiados, Concedidos no PECCR/RS, Sob Administração do DAER e concessões federais - Situação Atual

PÓLO	Nº de km pedagiados	Nº de Praças de pedágio	Nº DE CABINES DE COBRANÇA	CONCESSIONÁRIA
PECCR/RS				
Caxias do Sul	191,07	4	30	Convias
Metropolitano	501,22	4	37	Metrovias
Vacaria	141,84	3	14	Rodosul
Sta Cruz do Sul	207,88	3	20	Santa Cruz Rodovias
Carazinho	250,4	4	18	Coviplan
Lajeado	329,77	5	38	Sulvias
Gramado	144,07	3	16	Brita Rodovias
Total	1766,25	26	173	
Concessões Federais				
Pólo Pelotas	623,40	5	38	Ecosul
BR 290	112,30	3	52	Concepa
Total	735,7	8	90	
DAER				
DAER	182,00	3	21	DAER
Total				
Total de Rodovias Pedagiadas no RS	2.683,00	37	284	

Fonte: AGCR, 2004; DAER, 2004.

3 PRAÇAS DE PEDÁGIO

Na busca de referências sobre dimensionamento de cabines de cobrança manuais, em praça de pedágio, foi encontrada pouca literatura disponível tratando diretamente o assunto. A seguir faremos referência a vários autores e a contribuição de cada um deles na montagem do modelo proposto.

Na etapa de projeto de uma praça de pedágio, normalmente considera-se determinado número de cabines, que atenda o fluxo correspondente à capacidade da rodovia e operando com condições de atendimento compatível com as técnicas de cobrança adotada. Nem sempre os parâmetros utilizados na fase de projeto confirmam-se durante a operação. Tanto o volume de tráfego quanto o tempo de atendimento verificados na prática, podem ser diferentes dos utilizados na fase de projeto. É necessário fazer uma verificação do dimensionamento de cabines da praça de pedágio, usando os dados reais e atendendo aos níveis de serviço contratuais, para se adequar à realidade. Como modificações na estrutura física da praça geralmente são bastante onerosas, há práticas operacionais que podem ser implantadas, a fim de solucionar o sub dimensionamento de cabines. Por outro lado, otimizar o número de cabines abertas, pode gerar uma economia substancial no custo operacional das concessionárias.

Em muitos casos, quando surgem problemas de filas nas praças de pedágio, o responsável pela operação tenta uma solução baseada na sua experiência (EDIE, 1954; DANKO e GULEWICZ, 1994). Há várias formas de intervir sobre o processo de chegada ou sobre o processo de atendimento em uma praça de pedágio.

Tarifas diferenciadas para períodos de baixo tráfego, podem atenuar picos de tráfego, embora no Brasil, sejam pouco usadas na prática. Nos Estados Unidos a idéia de limitar a utilização das rodovias nos horários de pico, através de tarifa diferenciada, vem sendo seriamente discutida. Economistas e especialistas em transportes defendem a taxaço sobre congestionamento como uma ferramenta útil para aumentar a eficiência do sistema, aliviando o congestionamento de tráfego e atuando sobre a demanda (TURNBULL et al., 1994; ADLER e CETIN, 2000; *apud* ARAÚJO, 2001).

Para reduzir tempos médios de atendimentos pode-se melhorar a tecnologia de cobrança, melhorar o treinamento dos atendentes ou alterar a forma de processamento. Por

exemplo, a criação de um cartão para determinado tipo de usuário pode diminuir o tempo de atendimento.

Um dos elementos-chaves no dimensionamento do número de cabines de pedágio é a capacidade da praça. Esta pode ser relacionada a um sistema de cabines, caracterizado por elementos de demanda e oferta (ASTARITA et al, 2001), como veremos a seguir.

3.1 CAPACIDADE DE UMA PRAÇA DE PEDÁGIO

A capacidade de uma praça de pedágio depende de características de tráfego, bem como das características da própria praça tal como número de cabines, sistema de cobrança e taxa de atendimento.

Uma praça de pedágio está operando em sua capacidade, quando existem filas nas cabines e os arrecadadores estão ocupados o tempo todo (WOO e HOEL, 1991), ou seja, quando a taxa de chegada de veículos (demanda) for maior ou igual a taxa de atendimento multiplicada pelo número de cabines disponíveis atendendo naquele momento (oferta).

A capacidade de uma cabine de cobrança pode ser definida como o fluxo máximo horário de veículos que podem atravessá-la em um período de tempo, obedecendo às condições de tráfego e controle (LIN e SU, 1994).

A Tabela 1 apresenta valores de capacidade de cabines de atendimento para cobrança de pedágio com cobrança manual, sugerida por diversos autores, bem como o tempo de atendimento estipulado no contrato das concessionárias administradas pelo Consórcio Univias.

A taxa de chegada depende do fluxo de veículos e das características da rodovia, o que é levada em consideração quando do dimensionamento do número de cabines de cobrança das praças de pedágio.

Vários são os fatores que influenciam o tempo de atendimento em uma praça de pedágio, conforme demonstram estudos de alguns autores. McDonald e Stammer (2000), descrevem a influência geométrica da praça, no tempo de atendimento. Zarrillo (2000), avalia o tempo de atendimento em instalações com métodos de cobrança, manual, automática, eletrônica ou mista e as variações causadas por diversos fatores em cada modalidade. A forma de pagamento, seja com cartão, dinheiro, cheque ou outro, o valor da tarifa e a necessidade de fornecer troco, também geram uma variação neste quesito (WOO e HOEL, 1991,

KLODZINSKI e AL-DEEK, 2002a). Outro fator determinante é a categoria do veículo a ser atendido, pois veículos pesados tendem a ser mais lentos e com menores taxas de aceleração. A existência de cabines exclusivas para veículos pesados também é levada em consideração (WOO e HOEL, 1991; ZARRILLO, 2000; ZARRILLO et al,1997). Fatores humanos do arrecadador e motoristas e a existência de filas, também pode influenciar no tempo do atendimento. Motoristas podem utilizar o tempo ocioso resultante das filas de pagamento para obterem a quantia exata. Arrecadadores podem se sentir pressionados a realizarem os atendimentos de forma mais ágil, quando da situação de filas crescentes (EDIE, 1954; WOO e HOEL, 1991; OLIVEIRA et al, 2003).

Tabela 1 - Valores da literatura para capacidade de cabine de cobrança manual e tempos de atendimentos

Estudos	Capacidade (veic./h)	Tempo Médio de Atendimento (s)
Edie (1954)	225	16
Lin e Su (1993)	360	10
Araújo (2001)	148	24,28
Klodzinski e Al-Deek (2002)	400	9
Oliveira et al. (2003)	183	19,62
Contrato Univias - PBE (1996)	-	15

Conforme Danko e Gulewicz, (1994), o motorista tem tendência a escolher a cabine de cobranças da direita. Em segundo lugar escolhe a que tem menos fila e em muitos casos, escolhe a que tem menor fila, mesmo que tenha cabines vazias, deduzindo que estas estejam fechadas. Somente uma pequena parcela escolhe a cabine aleatoriamente.

Edie (1954) definiu atraso em uma praça de pedágio como a soma do tempo de espera na fila, mais o tempo de atendimento na cabine, ou seja, o tempo necessário para desobstruir as cabines de cobrança.

Astarita et al (2001), afirmaram que a capacidade de armazenamento de uma praça, antes da cancela, é um fator fundamental para determinar a capacidade de atendimento da praça de pedágio e está relacionada com a dimensão e lay-out da praça. Quando a taxa de chegada excede a taxa de atendimento, gerando fila, conforme o posicionamento dos veículos, esta pode causar um corte do fluxo em algumas cabines laterais, normalmente destinadas a tráfego rápido. Este fator pode gerar redução no nível de serviço da praça de pedágio.

3.2 NÍVEL DE SERVIÇO

Nível de serviço é um conceito que utiliza medidas qualitativas, para avaliar as condições operacionais na corrente de tráfego. No caso de rodovias, a análise dos níveis de serviço é baseada em fatores como velocidade, tempo de viagem, facilidade de manobra, interrupção de tráfego, conforto psicológico dos usuários, tempo de retardamento, segurança de trânsito, custos operacionais, dentre outros.

O Highway Capacity Manual (HCM) (TRB, 2000), apresenta métodos de avaliação de níveis de serviço para várias facilidades rodoviárias, tais como auto-estradas, rodovia de duas pistas e múltiplas pistas, rodovias urbanas, tráfego de pedestres e ciclistas, interseções semaforizadas.

Para cada tipo de facilidade são estabelecidos 6 níveis de serviços, designados por letras, variando de A à F, sendo que A é o melhor nível de serviço e F o pior, conforme Quadro 5. Normalmente o nível de serviço E representa a capacidade da via.

A avaliação de níveis de serviços para praças de pedágio, ainda não foi formalmente definida no HCM. Alguns autores fazem uma analogia entre praças de pedágio e interseções semaforizadas (DANKO e GULEWICZ, 1994). Por outro lado, Klodzinski e Al-Deek (2002a) afirmam que, como os atrasos em interseções semaforizadas são resultantes de um equipamento automatizado, em praça de pedágio a avaliação não pode ser da mesma forma. Os vários fatores que influenciam os tempos de atendimento e conseqüentemente os atrasos, como o tipo de pagamento, necessidade de troco, características humanas tanto do motorista como do arrecadador, tipo de veículo, dentre outros, não permitem que a avaliação seja feita pelos mesmos métodos.

Vários autores realizaram estudos com metodologias variadas, sugerindo a avaliação de níveis de serviço em praças de pedágio, utilizando uma nomenclatura semelhante ao proposto no HCM.

Woo e Hoel (1991) usaram a densidade para avaliar o nível de serviço em praças de pedágio, baseado no critério de volume / capacidade (v/c). Para representar estes níveis de serviço, foram usadas letras de A a F conforme Tabela 2.

Lin e Su (1994) basearam seus estudos em duas medidas relativamente simples, o comprimento médio de fila por canal de atendimento e o tempo médio no sistema. Estes indicadores refletem eficazmente a qualidade do serviço e são facilmente percebidos pelo

usuário. Este critério tem relação direta com a teoria das filas que analisa o grau de congestionamento ρ (fluxo médio de chegadas / fluxo médio de atendimento), variando o nível de desempenho em função do número de canais disponíveis, (WIDMER, 1999). A Tabela 3 apresenta os parâmetro para cada nível de serviço, utilizando os fatores acima descritos.

Quadro 5 – Descrição dos níveis de serviço para auto-estradas

Nível de Serviço	Descrição
A	Operação em regime de fluxo livre, no qual a velocidade média é a velocidade de fluxo livre. Liberdade completa de manobra dentro da corrente de tráfego. Excelente nível de conforto psicológico para os usuários.
B	Operação ainda ocorre em regime de fluxo livre, e a velocidade de fluxo livre ainda é mantida. Facilidade de manobra dentro da corrente de tráfego. Alto nível de conforto psicológico para os usuários.
C	Velocidade média da corrente é igual ou muito próxima da velocidade de fluxo livre. Facilidade de manobra bem menor. Manobras e mudanças de pista exigem cuidado. Qualquer bloqueio do tráfego pode gerar pequenas filas.
D	Velocidade média da corrente começa a diminuir com o aumento do volume de tráfego. A densidade aumenta rapidamente com o crescimento do volume. Liberdade de manobra é limitada. Os usuários começam a experimentar certo grau de desconforto psicológico. Qualquer incidente provoca o aparecimento de filas.
E	Corresponde a capacidade de operação de uma freeway. Qualquer ocorrência pode causar mudança na operação do tráfego. Fluxo altamente instável. Qualquer incidente, mesmo uma mudança de faixa pode provocar congestionamentos significativos. A liberdade de escolha de velocidade é muito pequena e o nível de conforto psicológico, muito baixo.
F	Descreve o colapso no fluxo de veículos. A demanda (taxa de fluxo de tráfego) excede a oferta (capacidade da via). O congestionamento pode se estender por distâncias expressivas, e o progresso dos veículos se dão de forma descontínua.

Fonte: HCM, 2000

Em 2002, Klodzinski e Al-Deek, realizaram um estudo onde sugeriram que o atraso, é um dos mais eficazes parâmetros para embasar a medida do nível de serviço em praça de pedágio conforme Tabela 4. O atraso é medido pelo tempo médio no sistema, que considera o tempo na fila, tempo de serviço e hadway. Este pode ser influenciado por vários fatores tais como sistema de cobrança, tipo de pagamento, necessidade de troco, fator humano

tanto do arrecadador como do motorista e ainda o número de carros de passeio equivalentes (cpe), que influência no tamanho da fila.

Tabela 2 - Critérios de níveis de serviço - Woo e Hoel

Nível de Serviço	Densidade (cpe/km.faixa)	V/C
A	< 12,5	0,24
B	< 18,8	0,40
C	< 26,3	0,57
D	< 41,9	0,74
E	< 67	1,00
F	> 67	-

Fonte: Woo e Hoel, 1991

Tabela 3 - Critérios de níveis de serviço - Lin e Su

Nível de Serviço	Nº de Veículos na fila (veículos)	Tempo médio no sistema (segundos)
A	$L \leq 1$	$T \leq 15$
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	$L > 10$	$t > 80$

Fonte: Lin e Su, 1994

Já em 1954, Edie afirmou que a porcentagem de veículos em atraso poderia ser usada como uma medida do nível de serviço nas cabines de pedágio. Esta medida levaria em conta tanto o tempo de espera como o tempo de serviço. Outra medida que ele sugeriu, foi a disponibilidade de cabines de cobrança desocupada.

Tabela 4 - Critérios de níveis de serviços - Klodzinski e Al-Deek

Nível de Serviço	Percentil 85 - atraso (seg/veic)
A	≤ 14
B	$> 14 - 28$
C	$> 28 - 49$
D	$> 49 - 77$
E	$> 77 - 112$
F	> 112

Fonte: Klodzinski e Al-Deek, 2002

3.3 ANÁLISE DE PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DE PRAÇA DE PEDÁGIO

Para análise dos parâmetros operacionais com o intuito de avaliar intra-estruturas de transportes, normalmente recorre-se a diversos tipos de modelos que apresentam uma representação simplificada de um sistema real, formando um conjunto de suposições relativas à operação e ao funcionamento deste sistema. Há casos em que os problemas podem ser resolvidos através de métodos matemáticos, utilizando cálculo diferencial, análise de regressão ou teoria das filas. Nos casos mais complexos, em que as técnicas matemáticas não são aplicáveis, tem se utilizado a simulação, que possibilita a solução de problemas pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema, usando computador (Prado, 1999).

Para estudo de alguns parâmetros relativos a praças de pedágio, podem ser usados modelos analíticos (EDIE 1954, ZAZZILLO 1997; WIDMER et al 1999), embora se verifique que, com as facilidades tecnológicas existentes, a maioria dos autores prefere recorrer à simulação (LIN e SU, 1994; WOO e HOELER, 1991; DANKO e GULEWICZ, 1994; ARAÚJO, 2001; SETTI e ARAÚJO, 2002). Neste estudo, optou-se por utilizar um modelo em planilha eletrônica, baseado numa modelagem de teoria das filas, devido as facilidades operacionais desta ferramenta.

Van Dijk (2000) traça um paralelo entre o uso de teoria das filas e simulação, e sugere um sistema híbrido destes dois modelos para resolver alguns problemas de filas na vida cotidiana.

Edie (1954) montou um modelo baseado na teoria da probabilidade, com objetivo de dimensionar o número de cabines de cobrança manual em praças de pedágio e o pessoal necessário para atendimento, reduzindo custos e mantendo um bom serviço ao usuário. Após analisar o tráfego das praças de pedágio em questão, foi sugerido o dimensionamento das cabines de pedágio necessárias, combinando o tráfego com a taxa de atraso de veículos e o tempo de atendimento no sistema. Verificou-se que os tempos de atendimento eram afetados tanto pela composição do tráfego, como pela posição da cabine (cabines da direita do centro normalmente são mais requisitadas) e pelo volume de tráfego (arrecadador pressionado por grandes fluxos atende mais rápido e os usuários providenciam o troco enquanto esperam na fila). Concluiu-se que era possível determinar o nível de serviço a ser fornecido para usuários de praça de pedágio, medindo a porcentagem de atraso de veículos e a disponibilidade de cabines de pedágio desocupadas.

Por fim foi apresentada uma metodologia para dimensionamento do pessoal necessário para atender as cabines de cobrança, sempre levando em conta o controle de custo, tempo de atendimento e nível de serviço oferecido aos usuários.

Zarrillo (1997) montou um modelo matemático que estima o atraso e o comprimento de filas baseado em um processo determinístico para uma configuração em particular. Seu modelo leva em consideração o tipo de serviço oferecido na praça de pedágio (várias opções de meios de pagamento), tipo de motorista, a taxa de chegada e as taxas de atendimento. As medidas de desempenho foram calculadas através do:

- a) Comprimento de fila na cabine tipo i no minuto j (Q_{ij}), em veíc.
- b) Atraso na cabine tipo i no minuto j (D_{ij}) em veic/min;
- c) Atraso total (D) em veic/min.

Os autores concluíram que uma possível solução para otimizar o uso de uma praça de pedágio é o gerenciamento eficiente dos padrões de configuração da praça.

Widmer (1999) propôs um algoritmo baseado em teoria das filas, através do qual pode-se determinar os turnos de trabalho, o número de cabines abertas em cada turno, levando em conta um determinado nível de serviço e a minimização dos custos. Os parâmetros analisados foram:

- a) Probabilidade do sistema estar vazio (P_0);
- b) Comprimento médio da fila (Q);

- c) Tempo médio no sistema (d) em min;
- d) Probabilidade do tempo de espera ultrapassar um minuto ($P(w>1)$).

Seguindo a mesma linha de raciocínio de Widmer, revisaremos alguns conceitos da teoria das filas para serem aplicados no trabalho.

3.4 TEORIA DAS FILAS

Atrasos provocados por problemas de filas são muito comuns na vida cotidiana. Desde os anos 20, com o evento das telecomunicações, a teoria das filas tem sido altamente desenvolvida e bastante aplicada nesta área.

Por muito tempo, o conceito de que a análise da teoria das filas seria muito detalhista e matematicamente complexa, foi reforçada pelos teóricos e seus trabalhos publicados, o que vem mudando nos últimos anos.

Van Dijk (1997; 2000) desenvolveu estudos que confirmam que a teoria das filas pode ser usada em várias situações da vida diária, como por exemplo: fila de banco, supermercado, estacionamentos, correio, situações administrativas, industriais, transporte público como aeroportos, trens e rodovias.

Morabito e Lima (2000) também desenvolveram um estudo visando o dimensionamento de caixas de um supermercado em São Paulo, usando a teoria das filas.

Pode-se dizer que os modelos de filas sempre envolvem aproximações e simplificações do sistema real. Os resultados podem ser úteis para estimativas a respeito da grandeza de medidas de desempenho do sistema, análises de sensibilidade a respeito do impacto de mudanças operacionais e tomadas de decisão sobre melhorias no sistema.

O sistema de filas pode ser descrito pelo seu processo de chegada, sua disciplina de fila e processo de atendimento, conforme demonstrado na Figura 1.

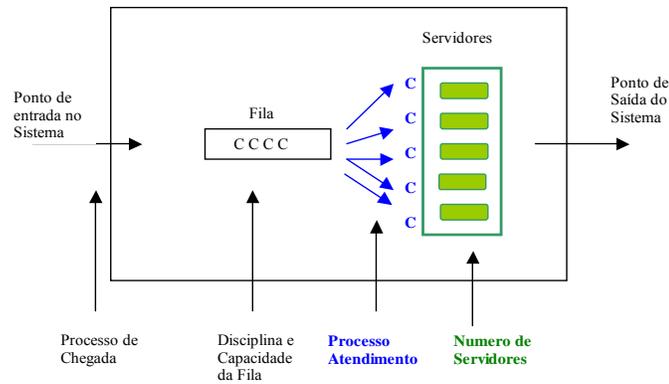


Figura 1 - Sistema de filas

O processo de chegada se configura pela distribuição de probabilidade do tempo entre sucessivos eventos de chegadas, que podem ser uniformes (determinísticos) ou aleatórios (estocásticos), e pelo número de indivíduos ou unidades que aparecem em cada evento, que podem ser individuais ou em grupos. Neste estudo serão abordadas as chegadas individuais.

O processo é uniforme quando todas as chegadas ocorrem rigorosamente no mesmo intervalo de tempo, como por exemplo, os headway entre veículos que partem de uma fila formada num semáforo.

No processo aleatório, as taxas de chegada se dão de acordo com uma distribuição de Poisson e os intervalos de chegada, de acordo com uma distribuição exponencial negativa (ANECKER e GAFARIAN, 1960; PRADO, 1999).

Ao representar o processo de chegadas, é usada a variável λ que será denominada taxa de chegada e calculada dividindo-se o número de chegadas (C) pelo intervalo total (t) (veíc/min):

$$\lambda = \frac{C}{t} \quad 3.1$$

Para ser considerada uma distribuição de Poisson, as chegadas devem ser independentes e as características probabilísticas do sistema não devem se alterar com o tempo. Isto se dá quando o comportamento médio do sistema, no período considerado, permanece praticamente inalterado, fazendo com que taxa de chegada λ não varie significativamente (NOVAES, 1975).

Um processo de chegada é dito de renovação, quando os intervalos entre chegadas sucessivas forem variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas. A independência entre os intervalos sucessivos pode ser verificada através de testes estatísticos. As distribuições dos tempos podem variar qualitativamente (natureza da distribuição) ou quantitativamente, através da alteração de seus parâmetros.

Para exemplificar, pode-se analisar o processo de chegadas de veículos em uma Praça de Pedágio: No intervalo de tempo T_1 , este pode ser regida pelo processo de Poisson, com taxa de chegada λ_1 . Já no intervalo T_2 que se refere à hora pico, a taxa de chegada λ_2 pode ser bem maior que a anterior. Se formos analisar $T_1 + T_2$, provavelmente chegaremos a conclusão que o processo de chegada não possa mais ser considerada um processo de renovação e que o congestionamento de tráfego em T_2 faça com que as chegadas deixem de ser regidas pelo processo de Poisson. Esta variação pode ser de natureza quantitativa, em função do número de veículos que chegam à praça, ou qualitativa, quando leva em consideração o tipo de veículo que chega, congestionamentos, comboios etc...

Edie (1954) concluiu que, quando os volumes de tráfego horário são relativamente baixos, a taxa de chegada se assemelha a uma distribuição de Poisson, à medida que o volume de tráfego horário aumenta, a curva tende a uma distribuição normal.

A disciplina da fila descreve a ordem na qual os usuários que entram no sistema são atendidos. A disciplina FIFO - first in, first out (PEPS - primeiro que entra é o primeiro que sai) é aplicada a maioria das situações de filas do dia a dia. No entanto, não pode deixar de ser citada a disciplina LIFO - last in, first out (UEPS - último que entra é o primeiro a sair), que se aplica, por exemplo, a um elevador que vem dos andares superiores para o térreo. Existe também o sistema de aleatoriedade, por exemplo, quando professores fazem chamada oral para os alunos e também a disciplina por prioridade como por exemplos “mulheres e crianças primeiro”, na espera por um lugar num bote salva-vidas.

O processo de atendimento se configura pela quantidade de veículos atendidos por minuto e, assim como o processo de chegada, também se divide em regular (determinístico) ou aleatório (estocástico).

Em uma praça de pedágio, normalmente o processo de atendimento é estocástico, uma vez que os atendimentos dependem das características próprias da posição de serviço, do fator humano do arrecadador e também da disponibilidade do motorista. O fato de alternar períodos com baixa e alta demanda, faz com que o tempo de atendimento, em alguns casos,

seja regido por uma distribuição exponencial (NOVAES, 1975). Por outro lado, outros autores sugerem que a afirmação de que o tempo de serviço segue uma distribuição exponencial, é uma conveniência matemática por se referir a uma distribuição sem memória, não importando o tempo em que foi realizado o atendimento (WAGNER, 1986) e que raramente se confirma na realidade, podendo ser melhor representada por uma distribuição de Erlang (PRADO, 1999).

Para representar o processo de atendimento, é usada a variável μ que será denominada taxa de atendimento e calculada dividindo-se o número de atendimentos (A) pelo intervalo total (t) (veíc/min):

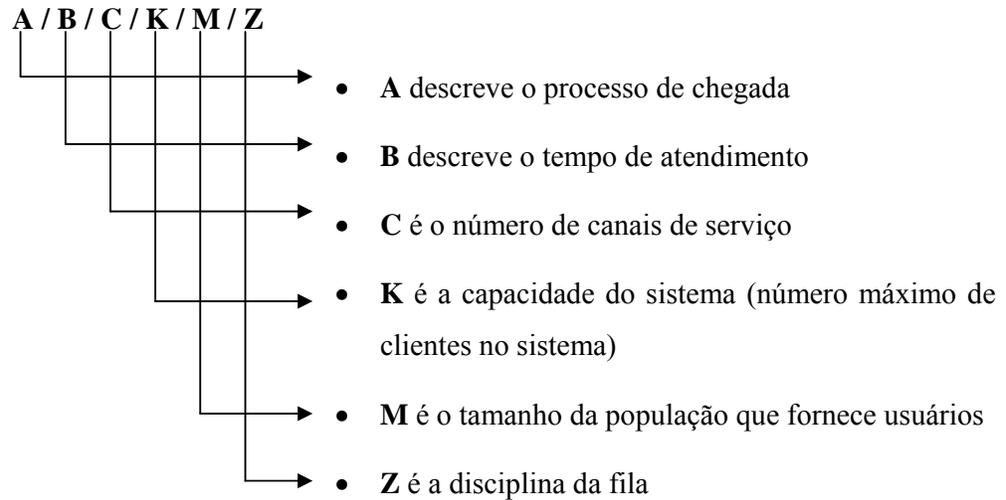
$$\mu = \frac{A}{t} \quad 3.2$$

Para testar as hipóteses de que λ e μ correspondem a distribuição teórica proposta, é recomendado testes de aderência a exemplo do Chi Quadrado ou Kolmogorov-Smirnov (NOVAES, 1975).

O número de canais disponíveis para o atendimento é outro aspecto importante para o modelo de filas. O mais simples é aquele em que um único servidor pode atender um usuário de cada vez, como por exemplo, na saída de um estacionamento, em interseções rodoviárias ou em trechos rodoviários de pista simples. A praça de pedágio é um exemplo de vários canais de atendimento, bem como caixas de um banco ou supermercado, em que o número de servidores varia conforme a necessidade, buscando manter um certo padrão de serviço. No caso de mais de um servidor, pode-se ter fila única ou diversas filas.

Em praças de pedágio normalmente encontram-se sistema com atendimento e filas em paralelo. Via de regra os veículos, ao se aproximarem das praças se dirigem às cabines com filas menores, e assim estão fisicamente mais perto do seu atendimento. Eventualmente podem mudar de fila caso uma delas fique sensivelmente maior que as outras (NOVAES, 1975).

A nomenclatura de modelos de filas normalmente é traduzida por uma terminologia padronizada como a notação de Kendall, a saber:



Conforme Prado (1999) o nome da notação é em homenagem a seu criador David Kendal.

A notação condensada **A/B/C** é muito mais utilizada e os valores para A e B dependem do tipo de distribuição a que elas se referem:

- a) M \equiv tempo entre chegadas ou de serviços exponencialmente distribuídos (M é uma abreviatura para Markoviano);
- b) D \equiv tempo entre chegadas ou de serviço determinístico (ou constante, regular);
- c) E_n \equiv distribuição erlanguiana de ordem *n* para tempo de chegadas ou de serviços;
- d) GI \equiv distribuição geral independente dos tempos de chegadas;
- e) G \equiv distribuição geral do tempo de serviço.

O modelo que representa uma praça de pedágio, onde as entradas seguem uma distribuição de Poisson, os serviços prestados nas cabines seguem uma distribuição exponencial, e vários servidores, é representado pela seguinte notação: M/M/C.

O Grau de congestionamento do sistema ρ , é um parâmetro importante num sistema de filas. Ele é definido pela razão entre a taxa de chegada (λ) e o produto a taxa de atendimento (μ) e do número de canais de serviço (*c*) conforme descrito na Equação 3.3.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu \times c} \quad 3.3$$

Se $\rho = 1$, o sistema está operando na sua capacidade, ou seja a taxa de atendimento é igual à taxa de chegada.

Se $\rho < 1$, a taxa de atendimento é maior que a taxa de chegada, e mesmo que hajam filas localizadas, elas se dispersão rapidamente.

Se $\rho > 1$, o sistema está em colapso, e filas tendem a aumentar infinitamente se a situação de $\rho > 1$ persistir.

Baseado nestes conceitos da Teoria das Filas, segue as fórmulas que servirão para o trabalho em questão, onde as variáveis são as seguintes:

- a) λ = taxa de chegada (veic/min)
- b) μ = taxa de atendimento (veic/min)
- c) c = número de canais de atendimento
- d) Parâmetro $n = c-1$

A probabilidade de o sistema estar vazio é definida pela seguinte equação:

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{1}{n!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] + \frac{1}{c!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \cdot \frac{c \cdot \mu}{c \cdot \mu - \lambda}} \quad 3.4$$

O tempo médio de espera na fila (W_q) é definido pelo seguinte equação:

$$W_q = \frac{\mu \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \cdot P_0}{(c-1)! \cdot (c \cdot \mu - \lambda)^2} \quad 3.5$$

O tempo médio de espera no sistema (W) é o tempo médio na fila mais o tempo de atendimento:

$$W = \frac{\mu \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \cdot P_0}{(c-1)! \cdot (c \cdot \mu - \lambda)^2} + \frac{1}{\mu} \quad 3.6$$

O número médio de elementos na fila (Lq) é calculado pela seguinte equação:

$$Lq = \frac{\lambda \cdot \mu (\lambda / \mu)^c \cdot P_0}{(c-1)! \cdot (c \cdot \mu - \lambda)^2} \quad 3.7$$

O número médio de elementos no sistema (L) engloba o número de elementos na fila mais os em atendimento.

$$L = \frac{\lambda \cdot \mu (\lambda / \mu)^c \cdot P_0}{(c-1)! \cdot (c \cdot \mu - \lambda)^2} + \frac{1}{\mu} \quad 3.8$$

O modelo proposto será desenvolvido comparando-se os resultados dos parâmetros calculados baseado na teoria das filas, aos contratuais e operacionais estipulados, buscando manter um nível de serviço C , conforme sugerido por Lin e Su (1994).

4 DESCRIÇÃO DO MODELO

Neste capítulo serão descritos: o modelo utilizado para dimensionamento de cabines de cobrança, as praças de pedágio escolhidas para o estudo de caso, os parâmetros necessários para aplicação da teoria das filas e a metodologia de coleta de dados utilizada além de uma análise dos dados coletados.

4.1 CONCEPÇÃO DO MODELO

Conforme Woo e Hoel (1991), usuários pagam as tarifas pelo uso da rodovia e pelos serviços prestados pelas concessionárias sem maiores dificuldades, mas não toleram o fato de terem suas viagens atrasadas por filas para pagamento.

Qualquer ação tomada para reduzir o tempo de cada transação na praça de pedágio pode significar um ganho substancial no tempo total de espera deste usuário.

Existem várias maneiras de reduzir este tempo de serviço nas praças de pedágio, uma das mais difundidas no mundo é a cobrança eletrônica de pedágio, com linhas dedicadas, tipo *Electronic Toll Collection* (ETC) ou *Automatic Vehicle Identification* (AVI) (ZARRILLO, 1997), cartão sem contato, entre outros.

Analisando a realidade das praças de pedágio do Estado do Rio Grande do Sul, verificou-se que das 284 cabines de cobrança em operação, 98% destas são de cobrança manual. Como o VDMA atual não justifica um investimento em meios eletrônicos de cobrança de pedágio, concluiu-se que seria necessário buscar outras maneiras de reduzir este tempo de serviço, levando em conta a cobrança manual de pedágio.

Depois de pesquisar as possibilidades, chegou-se a conclusão que a Teoria das Filas poderia auxiliar na solução do problema. Embora alguns autores (WOO e HOEL, 1991; LIN e SU, 1994) afirmem que a metodologia baseada nesta teoria não seja a melhor solução para a análise global da operação de praças de pedágio, devido à complexidade de fatores envolvidos, optou-se em utilizar a mesma. O objetivo do modelo proposto está focado no dimensionamento de cabines de cobrança, levando em consideração taxa de chegada, taxa de atendimento, número de cabines disponíveis e tempo de espera na fila, parâmetros estes que estão diretamente ligados à Teoria das Filas.

Optou-se por desenvolver a modelagem em planilha eletrônica, considerando parâmetros contratuais e operacionais, com o objetivo de obter a indicação da quantidade necessária de cabines de cobrança por dia e hora, para determinada praça de pedágio.

4.2 CONSÓRCIO UNIVIAS

O Consórcio Univias está entre as maiores empresas do setor de concessão de rodovias do Rio Grande do Sul e do Brasil, reunindo três concessionárias que operam em três importantes pólos rodoviários no Estado, contando atualmente com um VDMA em torno de 68.500 veículos e mais de 720 colaboradores diretos, dos quais 460 estão ligados às praças de pedágio e arrecadação (UNIVIAS, 2004).

As concessionárias que formam o Consórcio Univias são: Convias, Metrovias e Sulvias, que operam os Pólos de Caxias do Sul, Metropolitano e Lajeado. Ao todo são 1.022 quilômetros de rodovias federais e estaduais e 13 praças de pedágio distribuídas nos três pólos rodoviários, totalizando 101 cabines de cobrança, todas com sistema de cobrança manual (UNIVIAS, 2004).

Conforme citado, assim como nas outras praças do Estado, o VDMA não justifica um investimento em qualquer meio eletrônico de cobrança de pedágio, portanto a busca de outras alternativas visando a redução do tempo de serviço, levando em conta a cobrança manual de pedágio foi bem aceita pela concessionária..

Engajada ao programa de Excelência nas Práticas de Gestão do Univias (EPG), a Gerência de Operações viu a necessidade de desenvolver um procedimento de cálculo que permitisse determinar com precisão o número de cabines que deveriam permanecer abertas, por dia, hora e sentido. Este dimensionamento deveria atender à demanda de suas praças, seguindo parâmetros definidos, condições contratuais, restrições físicas das praças de pedágio e considerando níveis mínimos de serviço para a satisfação dos usuários e redução de custos operacionais. Assim sendo, o Consórcio Univias aceitou colaborar na elaboração deste estudo, fornecendo os dados necessários para a validação do modelo proposto.

4.2.1 Pólo de Caxias do Sul

Está situado na segunda região mais importante do estado em termos de industrialização, abrangendo a RS122 de Nova Milano até Antônio Prado. Outra rodovia concedida é a BR116, indo de Nova Petrópolis à Campestre da Serra, abrangendo os trechos urbanos.

As praças de pedágio da Convias, situadas no Pólo de Caxias são: Farroupilha, São Marcos, Vila Cristina e Flores da Cunha, totalizando 30 cabines de cobrança.



Figura 2 - Convias: Pólo rodoviário de Caxias do Sul

Fonte: Univias, 2004

4.2.2 Pólo Metropolitano

Abrange a RS040, trechos da BR116, BR290 e RS030, conforme Figura 3

As praças de pedágio da Metrovias, situadas no Pólo Metroploitano são: Guaíba, Pantano Grande, Eldorado do Sul e Viamão, totalizando 35 cabines de cobrança.



Figura 3 - Metrovias: Pólo rodoviário Metropolitano

Fonte: Univias, 2004

4.2.3 Pólo de Lajeado

Com posição privilegiada em relação às cargas transportadas, a Sulvias, responsável pelo Pólo Rodoviário de Lajeado é composto por segmentos da BR386 (estrada da produção), RS129, RS130 e RST453.

As suas praças de pedágio são: Fazenda Vilanova, Cruzeiro do Sul, Encantado, Boa Vista do Sul e Marques de Souza, totalizando 36 cabines de cobrança. Originalmente, a praça de Marques de Souza era dividida em Picada May e Tamanduá, conforme verificado na Figura 4.



Figura 4 - Sulvias: Pólo rodoviário de Lajeado

Fonte: Univias, 2004

4.2.4 Praças de Pedágio

As 13 praças de pedágio das concessionárias possuem características operacionais e de tráfego peculiares, tanto pela topografia da região onde se encontram, como pelas características do tráfego, VDMA e outros.

A Praça de pedágio escolhida para embasar este estudo foi a de Guaíba, situado na BR116, km 303, no Pólo Metropolitano. As características de tráfego pesado são marcantes, por ser rota de exportação, ligando o Porto de Rio Grande à região Metropolitana de Porto Alegre e possui o maior VDMA do Pólo ao qual pertence.

4.3 FORMULAÇÃO DO MODELO DE FILAS PARA MODELAGEM DE PRAÇA DE PEDÁGIO

Ao montar o sistema baseado na teoria das filas, foram levados em consideração os seguintes fatores:

Utilização de modelo M/M/C, pois se verifica que as frequências de chegadas e atendimento são aleatórias, com vários canais de atendimento. Esta aleatoriedade pode ser justificada pela variabilidade do tráfego, modalidade de pagamento, quantidade de troco, agilidade do arrecadador, agilidade do usuário. Esta análise indica a utilização do modelo de filas estocástico.

As características do modelo de fila a ser considerado são as seguintes:

- a) Disciplina da fila: FIFO (Primeiro que entra, primeiro que sai)
- b) Taxa de chegada: $\lambda = C/t$ (veic/min), C = chegadas em número de veículos;
- c) Taxa de Atendimento: $\mu = A/t$ (veic/min), A = Atendimento em número de veículos;
- d) Grau de Congestionamento: $\rho = \lambda / \mu \cdot c$, sendo c = número de cabines abertas.
 - $\rho = 1$ Sistema operando em sua capacidade;
 - $\rho < 1$ Ideal (capacidade da via maior que ao taxa de chegada).

Para os cálculos serão utilizadas as equações já descritas no capítulo 3.

4.4 PADRÕES ADMISSÍVEIS

Para calcular o número de cabines de cobrança necessárias, estipulou-se alguns parâmetros que atendessem as exigências contratuais e operacionais da empresa, como por exemplo:

- a) Tempo médio de espera no sistema = 40 s, definido no Projeto Básico de Exploração (PBE), parte integrante do contrato de concessão.
- b) Número máximo de veículos no sistema (fila + atendimento) = 3 veic. por/cabine. Definido por questões operacionais.

Estes parâmetros vêm de encontro ao nível de serviço C, sugerido por Lin e Su (1994), onde o nível de serviço está associado ao comprimento médio da fila por canal de atendimento e ao tempo médio no sistema de um modelo de filas estocástico, conforme mostra a Tabela 3 no item 3.2.

4.5 DADOS COLETADOS

Os dados utilizados na elaboração deste trabalho foram coletados in loco, na praça de Guaíba, por processo manual, através de cronômetro e planilha, ou através de contador mecânico. Também foram usados dados oriundos do Sistema de Pedágio Univas (SPU), que possui séries históricas desde 1998.

4.5.1 Taxa de Chegada

Na revisão bibliográfica ficou claro que a taxa de chegada deve ser baseada em contagens do número de veículos que chegam na praça de pedágio. Como a concessionária possui um vasto banco de dados, com informações bastante detalhadas sobre o número de veículos que passam pela praça de pedágio, resolveu-se verificar a possibilidade de usar estes dados sem prejuízo ao modelo proposto.

No período de 17 a 23/05/04 foi realizada uma contagem dos veículos na entrada da praça de Guaíba, na ponta da agulha, ponto onde rodovia começa a ser alargada para acessar a praça de pedágio,. A contagem foi realizada em ambos os sentidos, nos horários de maior movimento, das 06:00 hs às 18:00 hs, em intervalos de 15 min, feita por arrecadadores, utilizando contador manual e cronômetro.

Comparou-se o número obtido nesta contagem, com o tráfego registrado no sistema SPU, no mesmo horário e sentido. Fez-se uma análise estatística das duas amostras, utilizando a ferramenta de análise “*Teste Z: Duas Amostras para médias*”, a um nível de significância 0,05. O resultado para o período total das observações, pode ser observado na Tabela 5, onde é demonstrado que o *p-value* é igual a 0,5603. O teste indica, ao nível de significância de 5%, que não existem diferenças significativas entre as médias das duas amostras. O teste foi também realizado para intervalos horários, sendo que o resultado foi semelhante ao já citado.

Vale ressaltar que antes da aplicação deste modelo, as praças de pedágio tinham como prática, abrir o número de cabines necessárias à boa fluidez do tráfego, com o claro objetivo de não formar fila. Assim sendo, pode-se assumir que a série histórica de dados de chegada é válida.

Tabela 5 - Teste Z: Duas amostras para médias - comparando dados da entrada da praça com dados das cabines de cobrança

	<i>Entrada da</i>	
	<i>Praça</i>	<i>Cabines</i>
	<i>(vei/min)</i>	<i>(vei/min)</i>
Média	3,415575	3,453373
Variância conhecida	1,465808	1,365453
Observações	672	672
Hipótese da diferença de média	0	
z	-0,58231654	
P(Z<=z) uni-caudal	0,28017670	
z crítico uni-caudal	1,64485300	
P(Z<=z) bi-caudal	0,56035339	
z crítico bi-caudal	1,95996108	

Baseado nestes resultados, a taxa de chegada λ (veic/min) foi calculada sobre o VDMA da praça em questão, a partir dos dados do ano de 2003, por dia da semana, horário e sentido. Dividindo-se este VDMA por 60 min., estimou-se a taxa de chegada em veic/min, hora por hora, por sentido, corrigido para o mês em questão, através do índice de sazonalidade, fator de crescimento e fator de segurança. Estes dados foram obtidos através de consulta ao banco de dados do SPU.

Quanto ao comportamento da taxa de chegada, verificou-se na literatura, que esta deve ser semelhante à curva de Poisson e que para garantir o processo de renovação, a razão média entre as taxas de chegadas λ , do período em análise, não deve apresentar grandes variações.

Na Figura 5 verifica-se que o fluxo médio horário da Praça de Guaíba, varia consideravelmente. Sendo assim, o processo de chegada foi analisado hora por hora, forma na qual os dados utilizados no modelo serão coletados, mantendo assim as características do tráfego naquele horário.

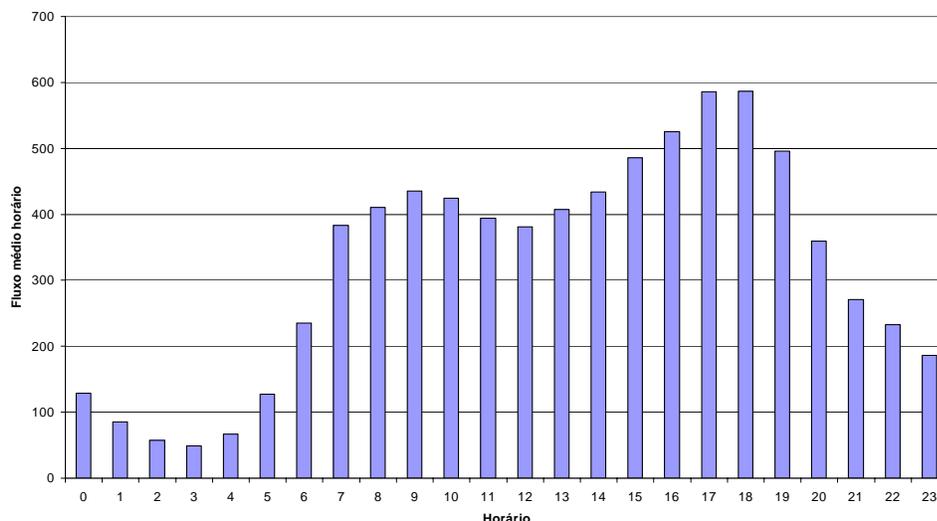


Figura 5 - Fluxo médio horário - Praça de Guaíba

Para analisar o comportamento da taxa de chegada na praça de Guaíba, foram utilizados dados de tráfego por minuto, referentes a 7 dias, por sentido, totalizando 840 observações por hora e 20.160 observações nos 7 dias. Através do número de veículos por minuto, montou-se uma distribuição horária, a partir da qual procurou-se obter a distribuição teórica que mais se aproximava da observada. Através da aplicação do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (NOVAES, 1975), com nível de significância de 5%, foi testada a validade da hipótese nula, de que as taxas de chegada (veic/min) podem ser representadas por uma distribuição de Poisson.

Na Tabela 6 pode-se observar o resultado obtido a cada hora e na Figura 6 segue um exemplo da aderência da distribuição de Poisson à realizada, para o horário das 16:00 às 17:00 hs:

O resultado confirma o que diz a literatura. Nem todos os horários têm o mesmo comportamento em relação à taxa de chegada média. Verifica-se que para a amostra do intervalo das 18:00 hs, das 19:00 hs e para o total, a hipótese nula foi rejeitada. O fato de nestes horários não ter se confirmado a aderência pode ser explicado pelo volume de tráfego horário, aliado à heterogeneidade do tráfego na praça, com diferentes tipos e categorias de veículos atendidos na mesma cabine. Sendo uma rodovia de pista simples, a formação de comboios devido ao grande volume de veículos pesados que por lá trafegam dificulta a chegada dos veículos na praça de pedágio.

Tabela 6 - Teste de aderência da distribuição de Poisson à taxa de chegada - Teste de Kolmogorov-Smirnov

Hora	Nº Observações	D _{Max} ⁽¹⁾	D _{Critico} ⁽²⁾	Hipótese Ho ⁽³⁾
00:00 - 01:00	840	0,0053	0,0469	Aceita
01:00 - 02:00	840	0,0074	0,0469	Aceita
02:00 - 03:00	840	0,0044	0,0469	Aceita
03:00 - 04:00	840	0,0140	0,0469	Aceita
04:00 - 05:00	840	0,0084	0,0469	Aceita
05:00 - 06:00	840	0,0132	0,0469	Aceita
06:00 - 07:00	840	0,0201	0,0469	Aceita
07:00 - 08:00	840	0,0130	0,0469	Aceita
08:00 - 09:00	840	0,0239	0,0469	Aceita
09:00 - 10:00	840	0,0209	0,0469	Aceita
10:00 - 11:00	840	0,0308	0,0469	Aceita
11:00 - 12:00	840	0,0210	0,0469	Aceita
12:00 - 13:00	840	0,0272	0,0469	Aceita
13:00 - 14:00	840	0,0213	0,0469	Aceita
14:00 - 15:00	840	0,0362	0,0469	Aceita
15:00 - 16:00	840	0,0239	0,0469	Aceita
16:00 - 17:00	840	0,0134	0,0469	Aceita
17:00 - 18:00	840	0,0448	0,0469	Aceita
18:00 - 19:00	840	0,0615	0,0469	Rejeitada
19:00 - 20:00	840	0,0653	0,0469	Rejeitada
20:00 - 21:00	840	0,0228	0,0469	Aceita
21:00 - 22:00	840	0,0181	0,0469	Aceita
22:00 - 23:00	840	0,0056	0,0469	Aceita
23:00 - 24:00	840	0,0123	0,0469	Aceita
00:00 - 24:00	20.160	0,1125	0,0096	Rejeitada

(1) distribuição percentual máxima entre os percentuais relativos das distribuições da taxa de chegada (veic/min) observadas e teórico

(2) valor crítico do teste para o nível de significância de 5% onde: $D_{critico} = 1,36/(n)^{1/2}$

(3) a distribuição relativa acumulada das taxas de chegada (veic/min) pode ser representada por uma distribuição de Poisson

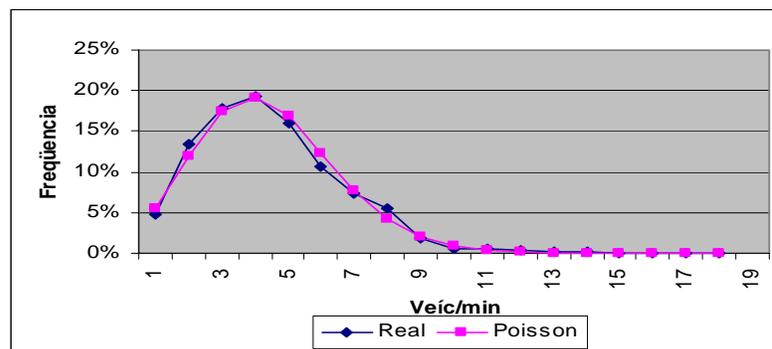


Figura 6 - Distribuição de frequência real e Poisson para taxa de chegada - Guaíba - 16:00 as 17:00 h

4.5.2 Taxa de Atendimento

A Taxa de Atendimento para cobrança manual foi estimada a partir da coleta de dados realizada pela concessionária nas praças de pedágio, onde, na praça de Guaíba, foram

registradas 5412 observações, sendo que 62% eram veículos leves e 38% veículos pesados, atingindo 10 % do tráfego total da praça durante o período.

A coleta foi realizada em um período de 7 dias, de 15 a 21 de julho de 2003, das 06:00 hs às 23:00 hs, perfazendo em média 10 leituras por via, por hora. Buscando atingir todos os turnos de trabalhos, foram realizadas também algumas coletas na madrugada. Procurou-se contemplar todas as cabines abertas no momento das medições e todos os arrecadadores da praça de pedágio. As leituras foram feitas por funcionários, que ficaram dentro das cabines de cobrança, com cronômetros. O formato da planilha usada na coleta dos dados pode ser observado na Figura 19 , Apêndice A.

O tempo de atendimento medido, refere-se ao intervalo de tempo decorrente desde a parada do veículo na cabine para atendimento, até a descida da cancela, após a passagem. Foram coletadas também informações sobre o turno de trabalho, identificação da cabine de cobrança, arrecadador, horário da coleta, categoria do veículo, número de veículos que esperavam na fila no início do atendimento e meio de pagamento utilizado.

A teoria de que a distribuição dos tempos de atendimento pode ser regida por uma distribuição exponencial, vista na revisão bibliográfica, não se confirmou. Ao testar os dados coletados, concluiu-se que existe uma grande diferença entre frequência observada e a modelada pela distribuição exponencial. A distribuição exponencial sugere que há grande número de ocorrências com baixo tempo de atendimento, o que não procede, conforme Figura 7. Prado (1999) afirmou que em várias situações do mundo real, a distribuição exponencial não se adapta ao processo de atendimento.

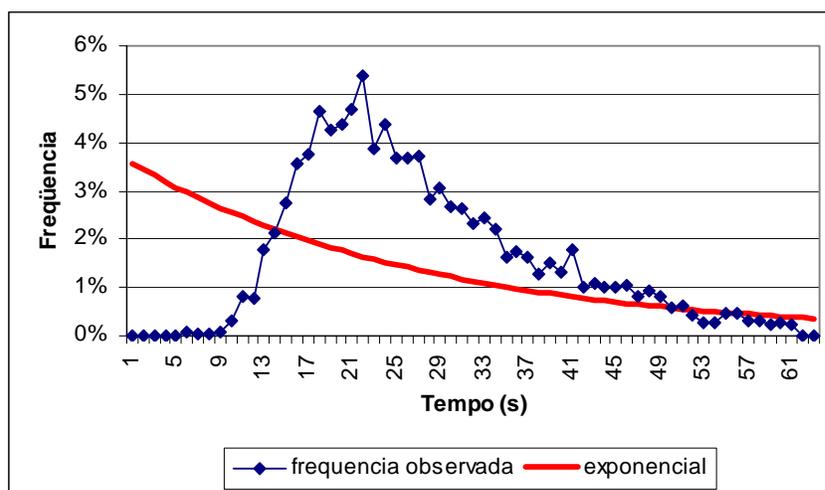


Figura 7 - Tempos de atendimento - praça de Guaíba

Comparando-se o tempo médio de atendimento medido nas praças de pedágio, conforme Tabela 7, com as médias de atendimento para cobrança manual, descrita na literatura segundo a Tabela 1, verificou-se que estes estavam acima dos valores médios previstos. Ao fazer uma verificação, constatou-se que o tempo que a cancela leva para baixar após o veículo ultrapassar o sensor, nas várias praças do Univias, tinha sido aumentado por motivos operacionais. Fazendo-se uma verificação deste tempo, constatou-se que na praça de Guaíba a média era de 4,5 seg. Optou-se por descontar este valor do tempo médio de atendimento da praça. Para fins deste trabalho, chamaremos este tempo de retardo da cancela.

Tabela 7 - Parâmetros relativos aos tempos de atendimento - praça de Guaíba

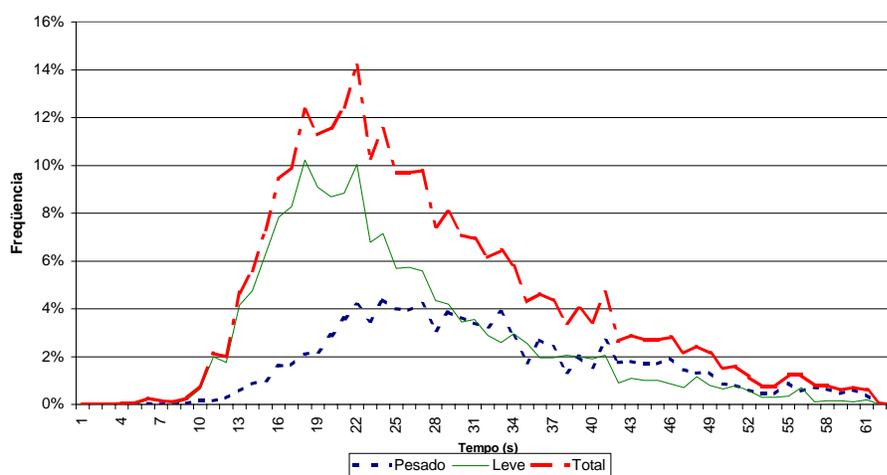
Média	27
Mediana	25
Moda	23
Desvio Padrão	11
Nº Observações	5.296

Analisando-se os resultados da pesquisa, identificaram-se vários fatores que, conforme a revisão bibliográfica, afetam o tempo de atendimento nas praças de pedágio.

Na Figura 8 e na Tabela 8 pode-se verificar a influência das diferentes classes de veículos sobre o tempo de cobrança. O tráfego da praça de Guaíba é constituído por 60% de veículos leves, que são veículos de passeio com e sem reboque, e 40% de veículos pesados, que são veículos comerciais e ônibus de 2 a 10 eixos. Está comprovado que os tempos de atendimento para veículos pesados são mais elevados que os dos veículos leves, pois estes tendem a ser mais lentos e com menor taxa de aceleração (WOO e HOEL, 1991; ZARRILO, 2000; ZARRILLO et all, 1997).

Tabela 8 - Parâmetros relativos aos tempos de atendimento por categoria de veículo

	Leve	Pesado
Média	24	31
Mediana	22	29
Moda	23	23
Desvio Padrão	10	11
Nº Observações	3.293	2.005

**Figura 8 - Tempo de atendimento por categoria de veículo**

Conforme Tabela 9 e Figura 9 verificou-se outra variável que influencia no tempo de atendimento, a forma de pagamento.

Tabela 9 - Parâmetros relativos aos tempos de atendimento por forma de pagamento

	C/ troco	S/troco	Cartão
Média	29	24	20
Mediana	26	22	18
Moda	23	14	14
Desvio Padrão	11	9	7
Nº Observações	3.766	1.016	517

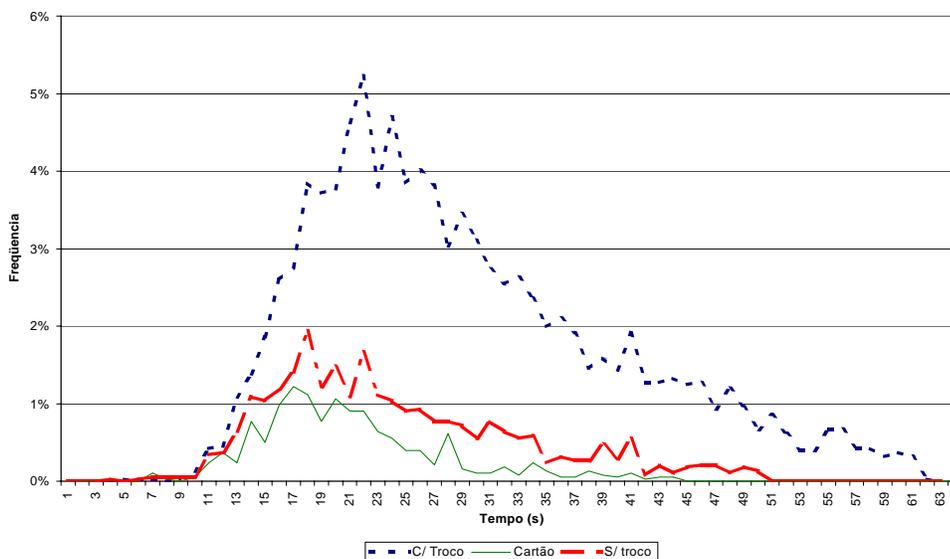


Figura 9 - Tempo de atendimento por forma de pagamento

Os contratos do PECR/RS apresentam uma particularidade em relação aos outros contratos de concessão no Brasil: a passagem múltipla, que garante ao usuário que cada veículo pague apenas uma vez por dia em cada sentido. Este fator influencia bastante no tempo de atendimento quando comparado à média nacional

O SPU aceita diversas formas de pagamentos. Para que o sistema funcione em sua plenitude, é indispensável que todas as placas de licença dos veículos sejam digitadas corretamente. As formas de pagamento aceita pela concessionária são:

Dinheiro, com e sem troco ⇒ Moeda corrente nacional;

Cheque ⇒ Normalmente aumenta o tempo de atendimento pela conferência e anotação dos dados do emitente, que é realizado na cabine;

Cartão com código de barras ⇒ Lido através de leitor ótico. Utilizado por usuários que possuem bonificação (veículos leves e pesados) e por clientes especiais (normalmente empresas de caminhões e ônibus). Estes veículos são cadastrados no sistema, que registra sua passagem automaticamente, não necessitando de impressão de ticket;

Vale Pedágio Nacional Dbtrans ⇒ Ticket de papel, cuja autenticidade necessita ser verificada por equipamento ótico;

Vale Pedágio Nacional Visa ⇒ Cartão magnético que precisa ser lido em uma leitora de cartões. Na época da pesquisa havia apenas 2 equipamentos por sentido, por praça, aumentando o tempo de atendimento;

Passagem múltipla \Rightarrow O PECCR/RS prevê que cada veículo pague somente uma vez por dia, na mesma praça de pedágio, em cada sentido de cobrança. O SPU tem a facilidade de, ao ser digitada a placa, verificar se já houve registros desta no sistema, neste sentido, neste dia e em caso positivo, liberar a passagem automaticamente;

Papa-Fila \Rightarrow Ticket de papel, com código de barra que é vendido na fila em dias de grandes movimentos. Ao passar na cabine é passado no leitor ótico sem a necessidade de digitação de placa agilizando o tempo de atendimento. Esta opção de pagamento é uma medida operacional adotada para agilizar o pagamento em dias de movimento. O supervisor da praça é responsável por disparar o processo, de acordo com o volume de tráfego que se acumula na agulha da praça;

Nota Promissória \Rightarrow Forma de pagamento só utilizada em casos especiais. Normalmente o veículo sai da via e se dirige a supervisão para concluir o processo, liberando a cabine de cobrança;

Isentos \Rightarrow O contrato prevê a isenção de veículos do tipo ambulância, policia, exercito, bombeiros, que ao ser digitada a forma de pagamento libera automaticamente a cancela;

No dimensionamento em questão, optou-se pela utilização de um tempo de atendimento médio (23 s), desconsiderando-se a categoria do veículo e a forma de pagamento que estava sendo atendido, descontando-se o tempo de retardo da cancela, conforme descrito.

4.5.3 Índice de Sazonalidade

A Sazonalidade mensal indica o percentual do VDMA que ocorre no mês em questão. Esta foi calculada baseado em séries históricas utilizando o método de média móvel. Calculou-se a sazonalidade de cada mês por praça de pedágio, conforme demonstrado na Tabela 14, Apêndice B. Apesar da sazonalidade variar por dia da semana, optou-se em utilizar a sazonalidade mensal, pois o uso do VDMA por dia da semana e hora neutraliza o efeito desta.

4.5.4 Número de Cabines

O número máximo de cabines admissíveis por praça e sentido foi determinado de acordo com a capacidade da praça em questão. O Quadro 6. apresenta o número máximo de cabines por sentido de tráfego para a Praça de Guaíba, conforme pode ser verificado na Figura 10.

Quadro 6 - Nº de cabines disponíveis - praça de Guaíba

Sentido	Nº de Cabines
Camaquã – Guaíba	5
Guaíba – Camaquã	4
Cabines simultâneas	7

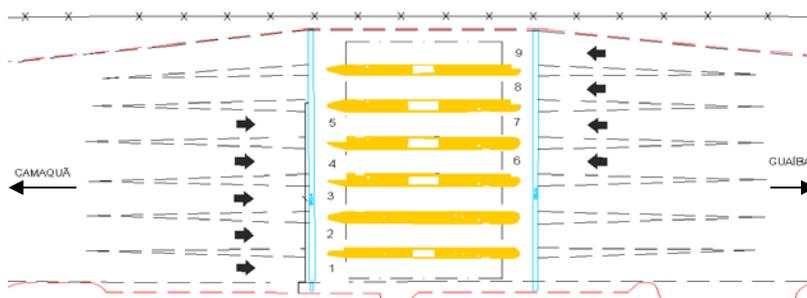


Figura 10 - - Esquema de distribuição de cabines de cobrança praça de Guaíba

4.5.5 Fator de Crescimento

Como os cálculos foram baseados no VDMA do ano de 2003, foi prevista a possibilidade de aplicar um fator de crescimento, que será utilizado ou não, conforme o comportamento do tráfego no momento da aplicação do modelo. Neste estudo optou-se por considera-lo igual a 1,00.

4.5.6 Fator de Segurança

Visando corrigir possíveis erros de projeções, foi prevista a possibilidade de aplicar um fator de segurança, que no caso deste modelo foi de 10%.

Baseado nos dados e parâmetros acima descritos, usou-se a teoria das filas para elaborar um sistema em planilha eletrônica, capaz de dimensionar o número de cabines abertas por sentido, conforme será descrito a seguir.

4.6 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para representar o modelo proposto, optou-se por um Diagrama de Fluxo de Dados (DFD) (GARCIA, 2004). O DFD é uma ferramenta utilizada em Engenharia de Software, capaz de fazer o mapeamento de todas as funções de um sistema e dos dados utilizados para executá-las. Esta ferramenta permite a abertura do sistema em vários níveis de detalhe, seguindo uma seqüência numérica, de acordo com a necessidade, conforme pode ser visto na Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

No nível zero, Figura 11, é apresentada uma visão geral do sistema, onde são representadas as diversas entradas de dados que alimentam o modelo, seu processamento macro e o destino final dos dados.

Dentre os dados disponibilizados para o cálculo, estão os dados de tráfego por praça, os tempos de atendimentos pesquisados por praça, o tempo de espera na fila, que é determinado pelo contrato e dados operacionais, tais com o número de cabines por praça, número admissível de veículos na fila e fatores de crescimento e de segurança.

Na Figura 12, nível 1, faz-se uma análise mais detalhada do processo de dimensionamento de cabines de cobrança:

- 1.1 Os dados de tráfego são tabulados e calculados o VDMA e a sazonalidade por praça de pedágio;
- 1.2 Da tabulação dos dados de pesquisa de tempo de atendimento por praça, resulta a média de tempo de atendimento, que pode ser por praça, categoria ou tipo de pagamento, conforme vimos anteriormente;

1.3 Com estes dados, juntamente com o tempo de espera na fila, definido em contrato, mais o número de cabines disponíveis por praça e os fatores de segurança e crescimento, calcula-se o número de cabines, descrito no nível 2, Figura 13.

O Nível 2, desdobra o processo do cálculo propriamente dito:

- 1.3.1 O sistema disponibiliza a opção de escolher a praça de pedágio e o mês a que se refere o dimensionamento;
- 1.3.2 Os VDMA por praça, que são disponibilizados por dia da semana e por hora, são corrigidos pela sazonalidade, conforme o mês em questão. Sobre ele também existe a possibilidade de ser aplicado um fator de segurança e crescimento. Dividindo-se este VDMA horário por 60 min, calcula-se a taxa de chegada λ em veíc/min;
- 1.3.3 A partir de então, parte-se para os cálculos usando os recursos da teoria das filas. Através da equação 3.3, com a taxa de chegada λ , o tempo de atendimento μ e o número de cabines disponíveis c , é calculada a taxa de congestionamento ρ ;
- 1.3.4 Utilizando basicamente os mesmos parâmetros e a equação 3.6, calcula-se o tempo médio de espera na fila W ;
- 1.3.5 Em seguida, através da equação 3.8 calcula-se o número médio de veículos na fila L ;
- 1.3.6 Após, é verificado se estes três parâmetros atendem as seguintes condições: $\rho < 1$, $W \leq 40$ s e $L \leq 3$ veículos;
- 1.3.7 Caso algum dos parâmetros não atenda as condições, incrementa-se uma cabine e recalcula-se todos os parâmetros novamente;
- 1.3.8 Caso atenda-se todas as condições, é verificada a disponibilidade do número de cabines, indicados pelo dimensionamento, em cada sentido da praça em questão;
- 1.3.9 Os resultados do dimensionamento são apresentados através de gráfico diários, onde consta por hora, o número de cabines que devem estar abertas, em cada sentido. Estes gráficos são encaminhados à praça de

pedágio para serem analisados e aplicados. Caso não haja disponibilidade de abrir todas as cabines indicadas, segue um alerta a supervisão da praça, indicando que alguma medida operacional tem que ser tomada, sob pena haver congestionamento na praça, não alcançando o nível de serviço desejado.

- 1.4 Posteriormente este sistema pode ser monitorado, comparando-se o dimensionamento indicado, com os dados de cabines abertas registrados no SPU.

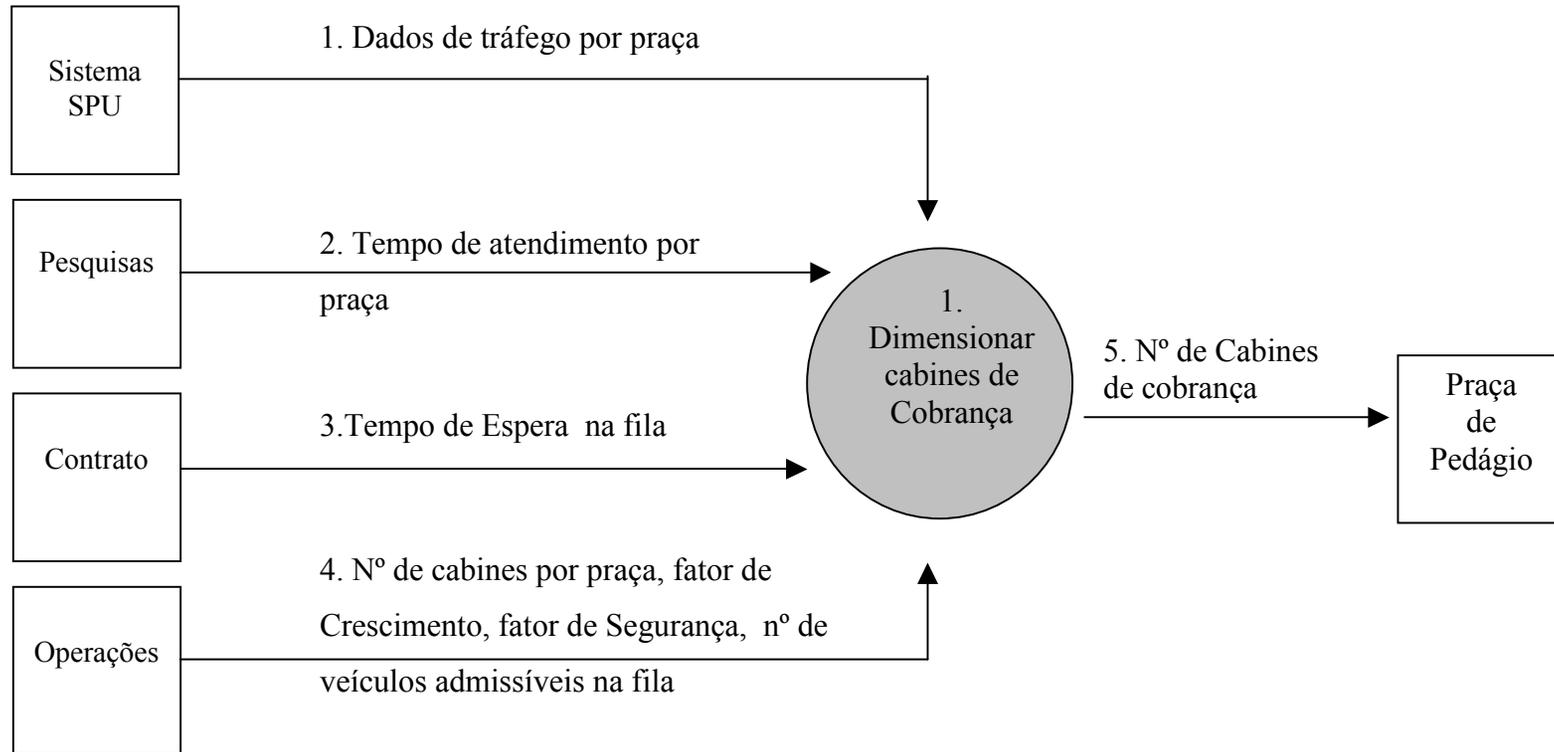


Figura 11 - DFD Nível 0 – Dimensionamento de cabines de cobrança em praça de pedágio

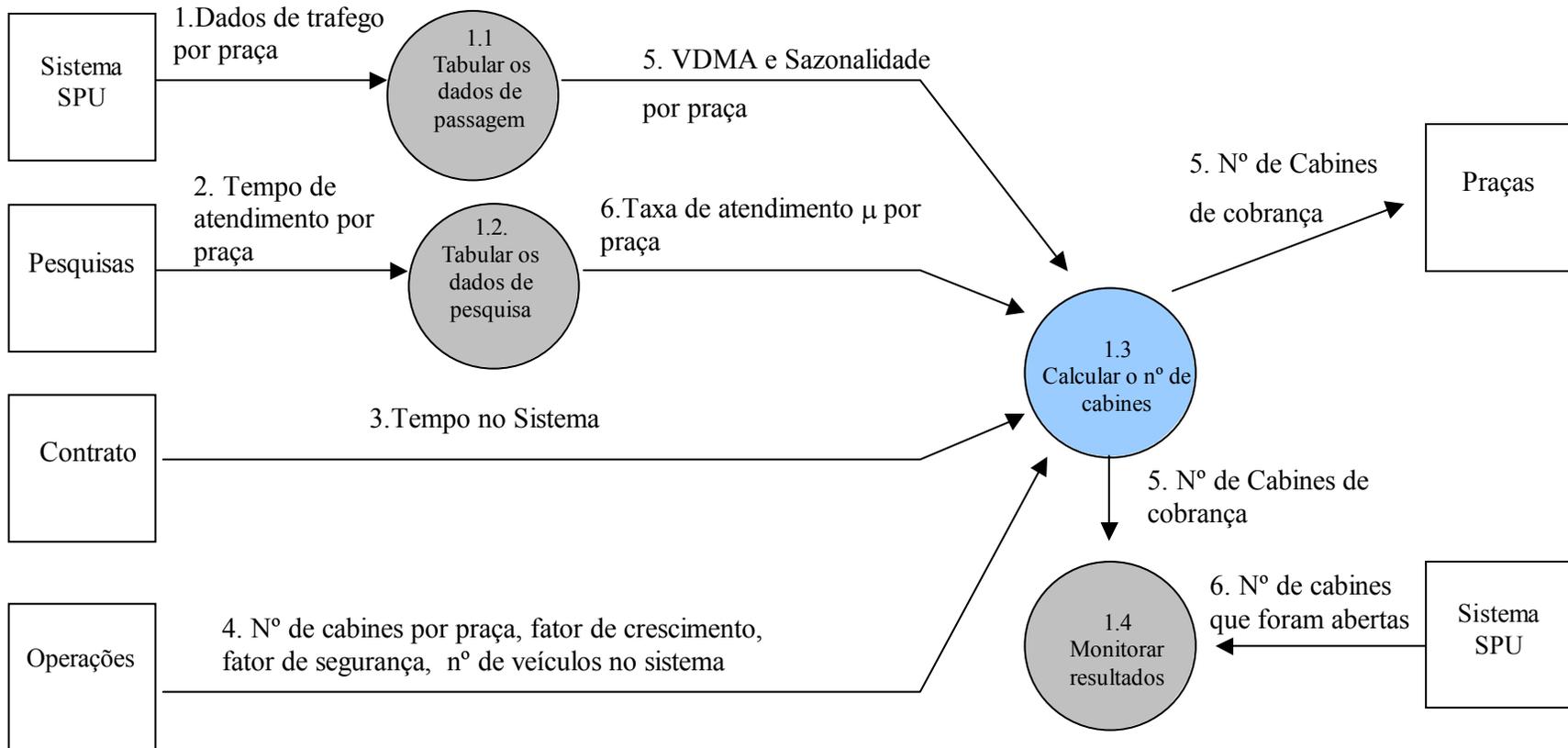


Figura 12 - DFD Nível 1 - Dimensionar cabines de cobrança

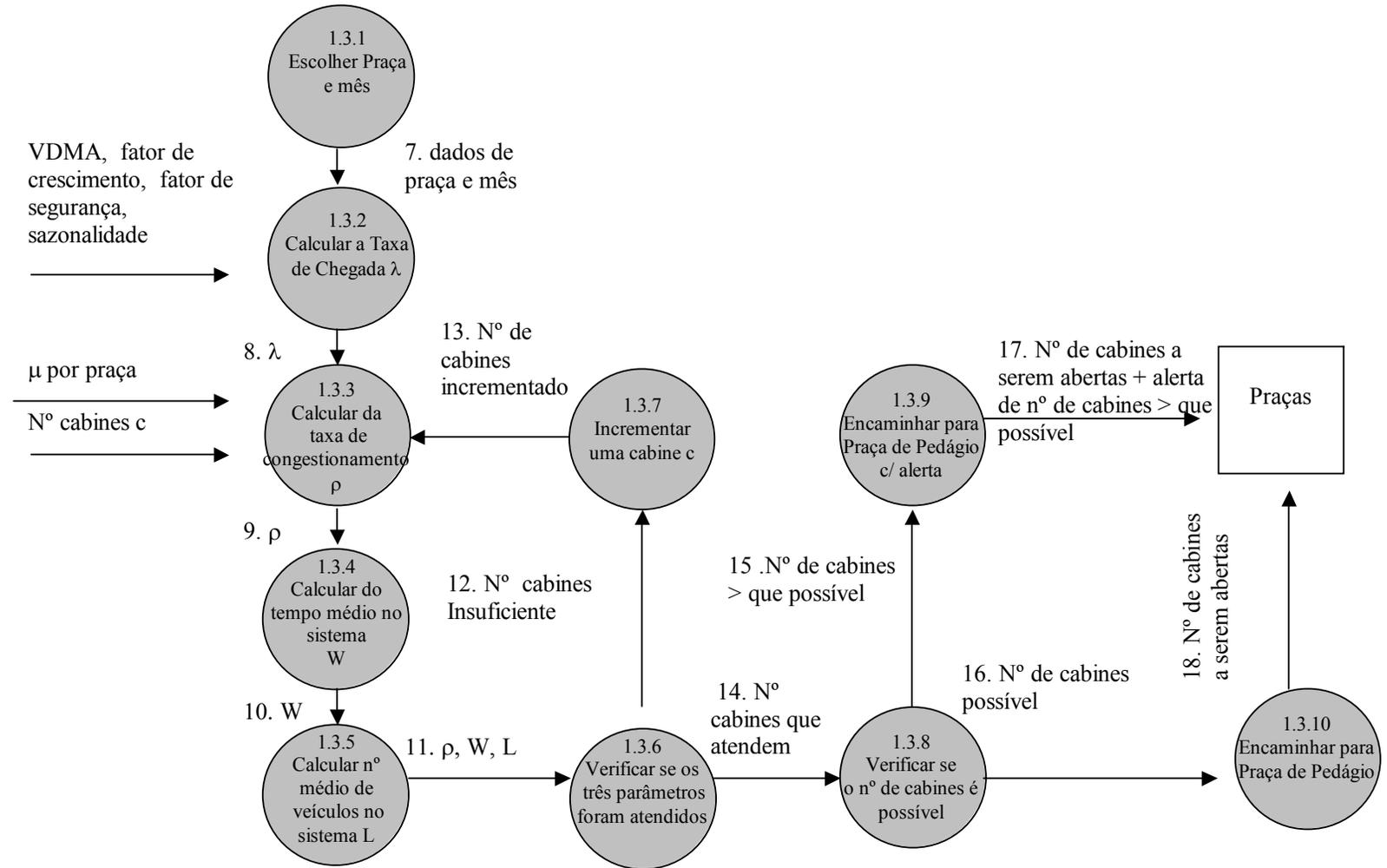


Figura 13 – DFD Nível 2 – Dimensionar cabines de cobrança

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 MODELO IMPLANTADO

A seguir será detalhado um exemplo de aplicação do modelo, baseado no mês de maio/04. Embora o modelo tenha sido aplicado em todas as praças do Consórcio Univias, neste trabalho serão analisados, exclusivamente, os resultados da Praça de Guaíba.

O dimensionamento das cabines de cobrança, por praça, são apresentados através de gráficos, que podem ser divididos em semanal, o qual indica a distribuição de cabines por dia e hora, ao longo da semana, conforme Figura 14, ou mais detalhados, para cada dia da semana (Figura 15).

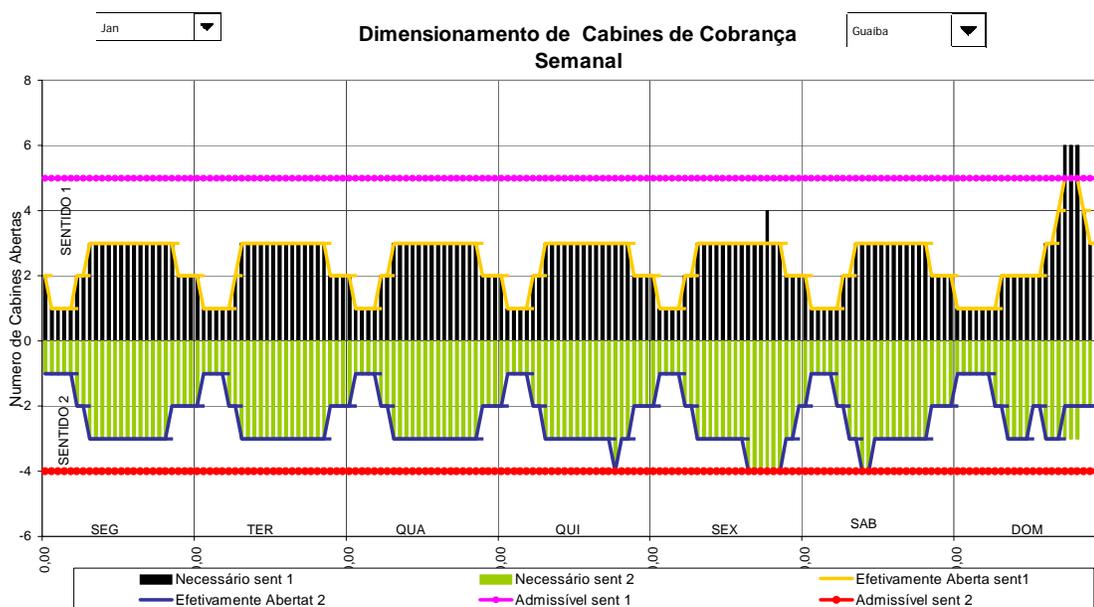


Figura 14 - Dimensionamento de cabines de cobrança - Praça de Guaíba – Semanal - Jan

O gráfico diário apresenta o dimensionamento do número de cabines para uma determinada praça de pedágio, visando atender ao nível de serviço C, conforme critérios estipulados por Lin e Su (1994), onde se admite de 2 a 3 veículos na fila, e um tempo médio de espera na fila de 30 a 45 s.

No eixo das ordenadas, encontra-se o número de cabines necessárias, sendo que o sentido 1 é representado pelos valores positivos e o sentido 2 pelos negativos. O eixo das abscissas representa o horário em que o dimensionamento deve ser aplicado.

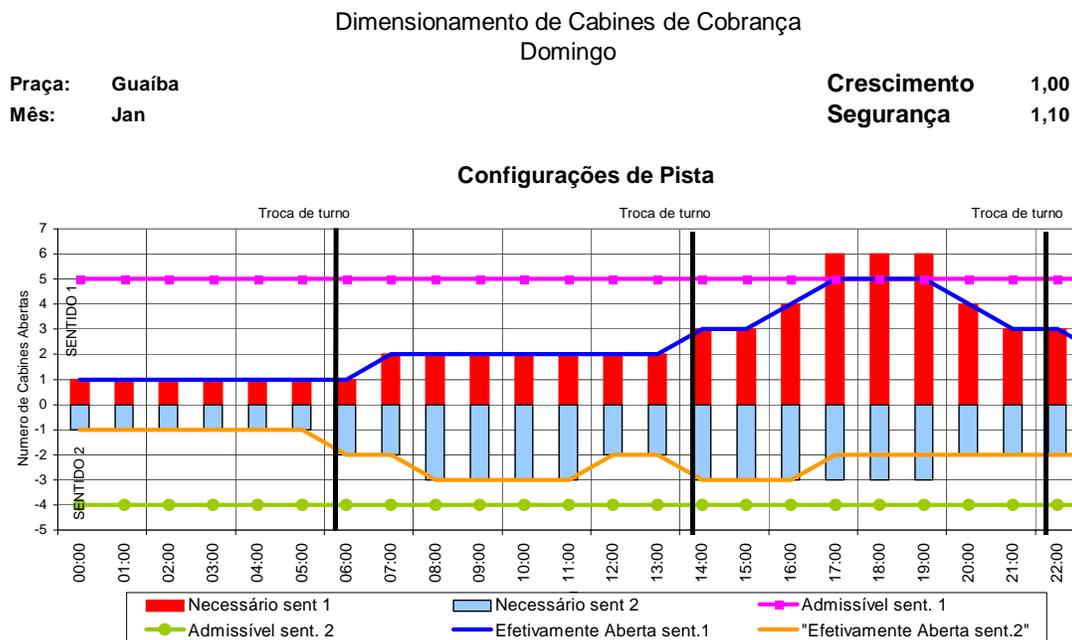


Figura 15 - Dimensionamento de cabines de cobrança - Praça de Guaíba – domingo - Jan

Há indicação do número de cabines que efetivamente podem ser abertas em cada horário, em função da combinação por sentido, privilegiando sempre o sentido de maior tráfego. O número máximo admissível representado, é em função das limitações da praça, conforme Quadro 6. do item 4.5.4. Quando o limite de cabines é ultrapassado, é indicação de que possivelmente haverá crescimento das filas, e que alguma medida operacional deverá ser tomada no sentido de prevenir congestionamento na praça.

No gráfico também aparecem indicações do mês a que se refere o dimensionamento, fator de segurança e índice de crescimento utilizado nos cálculos.

O dimensionamento destina-se à uma semana típica do mês em questão, não levando em conta eventos especiais como feriados, que devem tratados de forma particular pela operação da praça. A sazonalidade do verão ou safra são consideradas.

Este dimensionamento foi repassado às praças de pedágio da concessionária no início do mês de maio/04, a fim de ser aplicado e acompanhado, com exceção das praças de Marques de Souza e Farroupilha.

A partir da análise dos resultados, verificou-se que nestas duas praças, haveria problemas com a implantação dos dimensionamentos propostos.

A praça de Marques de Souza localiza-se na BR386, uma rodovia de pista simples em região de serra. Apesar de apresentar um VDMA baixo, em torno de 4500 veículos, possui

um tráfego composto por aproximadamente 47% de veículos pesados. As características da rodovia e o grande fluxo de veículos pesados propiciam a formação de pelotões, dificultando a ultrapassagem, fazendo com que os veículos cheguem em comboios na praça de pedágio. Apesar do dimensionamento indicar duas cabines por sentido, na maioria dos horários do dia, não há condições de aplicá-lo, devido às filas que se formam na praça. Neste caso seria necessária a aplicação de um coeficiente de correção, para adequar a composição do tráfego, considerando o tráfego de veículos leves e pesados, bem como tempo de atendimento diferenciado para estas categorias, conforme indicado por Novaes (1975). Neste momento esta correção não foi considerada.

Na praça de Farroupilha, o tráfego possui um fluxo constante com pouca variabilidade nos horários de pico. Como não há muitos períodos de ociosidade nas cabines, a impressão é que a praça esta sempre atuando na capacidade. Por política da concessionária, optou-se por não implantar o resultado do dimensionamento nesta praça.

Após dois meses de aplicação do modelo, foi solicitada aos supervisores das praças, uma avaliação dos resultados do dimensionamento implantado.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Praça de Guaíba, o relatório de análise, feito pelo supervisor da praça, indicou que em alguns horários específicos era bastante difícil implantar o modelo proposto, devido às filas que se formavam na praça.

Fez-se uma análise detalhada nos dias e horários em que as discrepâncias ao modelo aconteceram, chegando-se às seguintes possibilidades:

a) Aumento de tráfego na praça:

No ano de 2004 houve aumento de tráfego em relação ao ano de 2003, base dos dados para o estudo, conforme Tabela 10. Porém, no modelo foi aplicado um fator de segurança de 10%, índice este, maior do que o crescimento de tráfego verificado. Há fortes indícios de que não seja o tráfego o fator gerador da discrepância no modelo acusada pela supervisão de praça.

Tabela 10 -Crescimento do tráfego na Praça de Guaíba - 2004 / 2003

Mês	Crescimento
Maio	4%
Junho	8%
Julho	8%
Trimestre	6%

b) Aumento de veículos pesados e formação de comboios gerando maiores filas:

Uma das características da praça de Guaíba é o fluxo de veículos pesados. Ao analisar o comportamento do tráfego, verificou-se uma modificação na composição dos veículos pesados que trafegam por aquela rodovia conforme Tabela 11, ou seja, troca de veículos de 2 eixos por veículos de 6, 7 e 9 eixos, os chamados treminhões, bitrens e rodotrens. Com o aumento do tamanho dos veículos, aumenta a dificuldade de movimentação e aceleração, fazendo aumentar o tempo de atendimento e a necessidade de espaço físico na praça, gerando uma sensação de diminuição de capacidade desta e formação de filas. Conforme o Demarchi (2001), para um Nível de Serviço C em trecho longos de rodovias, cada caminhão equivale a 2,2 carros no plano, 5 carros em terreno ondulado e 10 carros para terreno montanhoso. No caso de uma praça, considerando o fator de desaceleração e aceleração e as configurações atuais dos caminhões que trafegam nas rodovias, poderia se dizer que os caminhões de 6 a 9 eixos tomam lugar de pelo menos 5 a 6 veículos leves.

Analisando os dados da praça de Guaíba verifica-se que a composição do tráfego é em média de 60% de veículos leves e 40% de veículos pesados. Via de regra, no turno da noite há uma maior concentração percentual de veículos pesados. Ao verificar o horário das 5:00 hs, que foi questionado, observa-se 36% de veículos leves e 64% de veículos pesados, analisando a média semanal. Se a análise se restringir ao tráfego de segunda-feira a sexta-feira, atinge 29% de veículos leves e 71% de veículos pesados, conforme Tabela 12 e Tabela 13. Como o número de veículos que passa na praça no turno da noite é relativamente baixo, o dimensionamento normalmente indica uma cabine por sentido, o que não se confirma devido a concentração de veículos pesados e as dificuldades que eles causam na operação da praça. Mais uma vez verificou-se a necessidade de aplicação de um coeficiente de correção para veículos pesados.

Tabela 11 - Aumento de tráfego por categoria na Praça de Guaíba - 2004 x 2003

Categoria	Descrição	Mai	Jun	Jul
01	Automóvel	7%	7%	9%
02	Caminhão 02 eixos	-5%	-2%	-4%
03	Caminhão 03 eixos	1%	16%	11%
04	Caminhão 04 eixos	-6%	5%	1%
05	Caminhão 05 eixos	-1%	12%	8%
06	Caminhão 06 eixos	14%	37%	19%
07	Automóvel c/ Reboque 1 Eixo	-4%	20%	37%
08	Automóvel c/ Reboque 2 Eixo	0%	-8%	10%
09	Caminhão 07 eixos	26%	83%	57%
10	Caminhão 08 eixos	0%	0%	-29%
11	Caminhão 09 eixos	32%	63%	24%
12	Ônibus 02 eixos	-1%	0%	-1%
13	Ônibus 03 eixos	-1%	-2%	0%
14	Ônibus 04 eixos	-33%	-70%	25%
Total		4%	8%	8%

Nesta praça em especial, há um outro fator que pode estar interferindo no fluxo do tráfego. Na chegada do sentido 2, em função do alto índice de acidentes que ocorriam no local, foram colocados tachões no centro da pista, numa extensão de 2 km. Isto faz com que os veículos não possam ultrapassar. No caso do veículo que vem na frente ser um caminhão, ele represa o tráfego, formando comboios que possivelmente irão congestionar a praça de pedágio.

c) Troca de tarifa:

O aumento do valor tarifa ocorrido em junho/04 passou a exigir um trabalho maior de arrecadadores em providenciar o troco, aumentando assim o tempo de atendimento. A tarifa passou de R\$ 4,00, para R\$ 4,30 para os veículos leves. Em pesquisa realizada no mês de janeiro/04, verificou-se que com o valor da tarifa inteira, não necessitando de troco em moedas, os tempos de atendimento diminuem consideravelmente.

Tabela 12 - Composição do tráfego por hora -
Praça de Guaíba - Média semanal

Hora	%Veic Leve	%Veic Pesado
0	39%	61%
1	35%	65%
2	28%	72%
3	29%	71%
4	33%	67%
5	36%	64%
6	42%	58%
7	57%	43%
8	67%	33%
9	70%	30%
10	67%	33%
11	64%	36%
12	59%	41%
13	60%	40%
14	64%	36%
15	65%	35%
16	67%	33%
17	68%	32%
18	68%	32%
19	64%	36%
20	58%	42%
21	53%	47%
22	46%	54%
23	44%	56%
Total	60%	40%

Tabela 13 - Composição do tráfego por hora -
Praça de Guaíba - Média de segunda a sexta

Hora	%Veic Leve	%Veic Pesado
0	30%	70%
1	25%	75%
2	19%	81%
3	19%	81%
4	28%	72%
5	29%	71%
6	36%	64%
7	54%	46%
8	63%	37%
9	64%	36%
10	59%	41%
11	58%	42%
12	53%	47%
13	56%	44%
14	59%	41%
15	59%	41%
16	60%	40%
17	61%	39%
18	60%	40%
19	56%	44%
20	50%	50%
21	46%	54%
22	40%	60%
23	36%	64%
Total	54%	46%

d) Lay-out da Praça:

Astarita et al (2001) concluiu que conforme o lay-out da praça, quando existe fila, o posicionamento de alguns veículos pode causar o corte do fluxo ou dificultar o acesso à algumas cabines. Verificou-se que este fenômeno ocorre na praça de Guaíba. Conforme mostra a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** em função da geometria da praça, quando mais de dois caminhões se posicionam para pagamento na cabine 8, a cabine 9 fica com seu acesso prejudicado, diminuindo com isto a capacidade da praça e gerando filas.

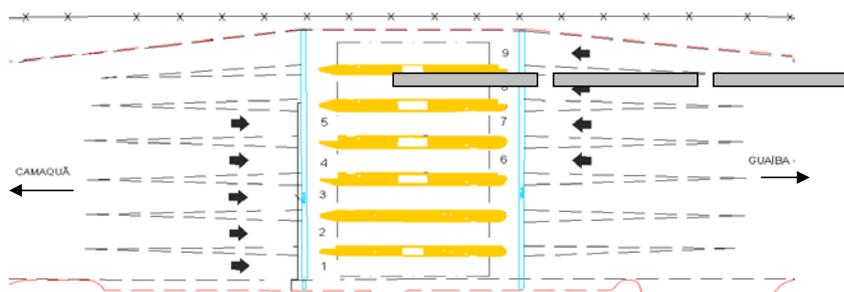


Figura 16 - Lay-out praça de Guaíba

5.3 REVISÃO DO MODELO

Considerando as discrepâncias apontadas pelo supervisor da praça, após analisar os resultados da aplicação do modelo na Praça de Guaíba e os possíveis motivos destas, optou-se por revisar o modelo proposto.

No conceito original do trabalho, foi utilizado o tráfego passante, desconsiderando a categoria dos veículos que estavam sendo atendidos. Foi utilizado também, o tempo de atendimento médio da praça de pedágio, desconsiderando qualquer outro fator que pudesse influenciar neste tempo de atendimento. Considerou-se implicitamente que o tráfego da praça fosse homogêneo. Esperava-se que a heterogeneidade do tráfego fosse absorvida pela dispersão dos tempos de atendimento, o que não aconteceu.

Chegou-se a conclusão de que algumas distinções são necessárias, pois na praça atende-se numa mesma cabine tanto veículo leve como pesado, que possuem claras diferenças quanto ao desempenho (potencia, velocidade, capacidade de aceleração), quanto ao valor da tarifa e tamanho.

Conforme indica Novaes (1975), uma solução seria aplicar um coeficiente de correção aos tempos de atendimento do modelo em questão, levando em conta a composição do tráfego observado na praça.

Para tanto, levantou-se o percentual de veículos leves e pesados por dia, hora e sentido, para cada praça de pedágio. Considerando também, o tempo de atendimento médio para veículos leves e pesados, calculou-se um coeficiente de correção que foi aplicado aos tempos de atendimento do modelo original.

Analisando os resultados, pode-se observar que houve uma adequação do número de cabines necessárias. Nos horários indicados como crítico pela supervisão, houve um aumento no número de cabines, em contrapartida, em outros momentos em que predomina o tráfego de veículos leves, houve uma diminuição no número de cabines, conforme indicado nas Figura 17 e Figura 18.

Dimensionamento de cabines
Quarta - Feira

Praça: Guaíba
Mês: Mai

Crescimento 1,00
Segurança 1,10

Configurações de Pista

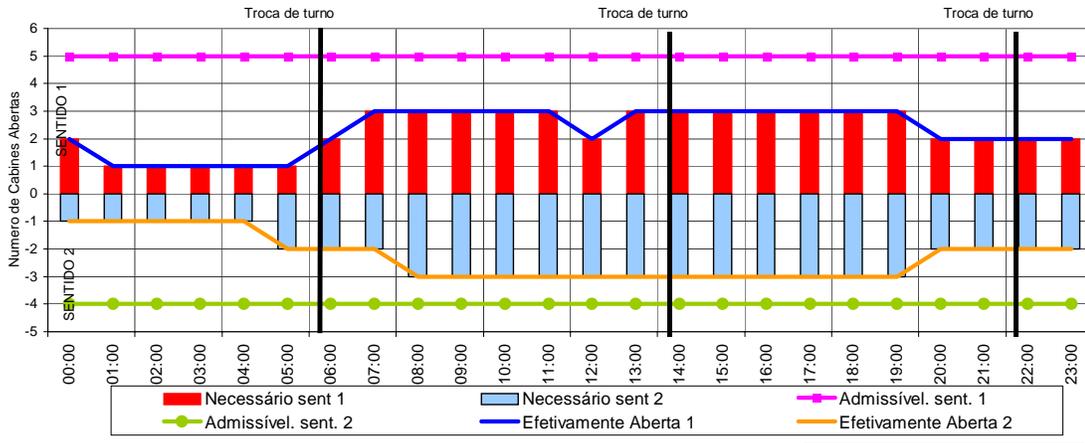


Figura 17 - Dimensionamento de cabines de cobrança – Praça de Guaíba - ref. Quarta-feira do mês de maio – Original

Dimensionamento de cabines
Quarta - Feira

Praça: Guaíba
Mês: Mai

Crescimento 1,00
Segurança 1,10

Configurações de Pista

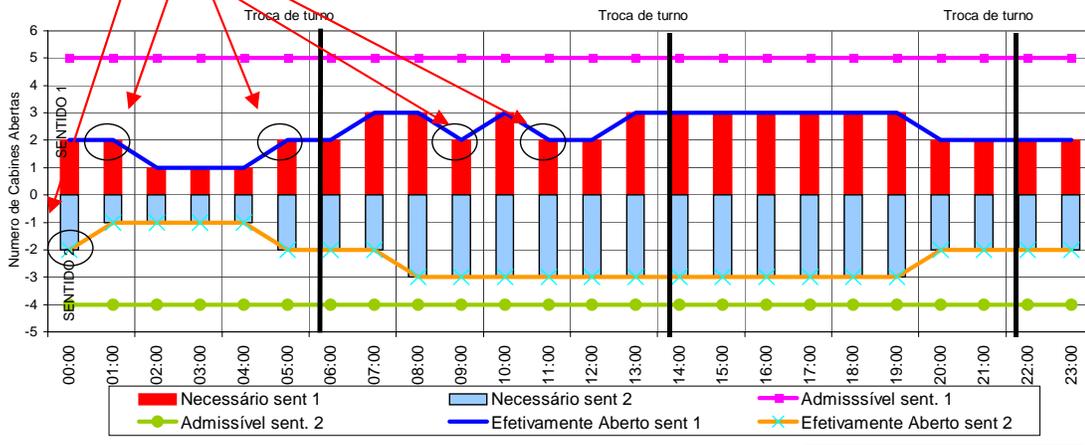


Figura 18 - Dimensionamento de cabines de cobrança – Praça de Guaíba - ref. Quarta-feira do mês de maio – Revisado

Os resultados foram revisados e encaminhados às praças de pedágio para nova aplicação e avaliação. O desempenho obtido após a revisão, foi satisfatório.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A cobrança de pedágio é uma realidade presente na vida de boa parte dos brasileiros que, na maioria das vezes, admitem pagar as tarifas pelo uso da rodovia e pelos serviços prestados pelas concessionárias, mas não toleram o fato de terem suas viagens atrasadas por filas para pagamento.

Apesar de a cobrança eletrônica de pedágio ser uma opção para resolver parte dos problemas das praças de pedágio, 65% das cabines de cobrança do Brasil e 98% das cabines de cobrança do Rio Grande do Sul ainda utilizam a cobrança manual.

Como no Rio Grande do Sul atualmente é inviável modificar o sistema de cobrança, devido ao baixo VDMA das rodovias, optou-se por desenvolver esta dissertação baseada na elaboração de um modelo que auxiliasse no dimensionamento do número de cabines manuais abertas em determinada praça de pedágio, por dia, hora e sentido.

Sabe-se que na prática, nos horários mais congestionados, aplica-se a experiência operacional do supervisor de praça, conforme previsto por Widmer (1989), abrindo-se mais cabines, utilizando-se de papa fila ou outra medida operacional de urgência. A intenção deste estudo é colaborar dando subsídios para estas tomadas de decisões visando melhorar o desempenho operacional e minimizar os custos operacionais das concessionárias.

Primeiramente fez-se uma revisão dos modelos de pedágio e concessões rodoviárias implantados no mundo, no Brasil e no Rio Grande do Sul, levantando as características de cada um e enfocando no tipo de cobrança utilizada.

O segundo passo foi a realização de uma revisão bibliográfica enfocando capacidade de praça de pedágio, níveis de serviço, parâmetros de operação, o uso de teoria das filas e outras metodologias para este tipo de dimensionamento e seus conceitos básicos.

Apesar de se ter conhecimento de que a tendência mundial para solução deste tipo de problema seria a simulação, por motivos operacionais, optou-se por desenvolver a modelagem em planilha eletrônica, usando os conceitos da Teoria das Filas. Esta ferramenta, foi escolhida pela simplicidade de entendimento e manuseio, além de se adequar bem as necessidades do problema e facilidade de replicação para as praças de pedágio. Levou-se em consideração parâmetros contratuais e operacionais, com o objetivo de obter a indicação da

quantidade necessária de cabines de cobrança por dia e hora, para determinada praça de pedágio.

A praça escolhida para a aplicação do modelo foi a Praça de Guaíba, situada na BR116, km 303, operada pelo Consórcio Univias. Esta praça possui características marcantes de tráfego pesado.

Os dados utilizados foram coletados in loco e retirados do banco de dados da Concessionária.

Analisando os dados coletados, concluiu-se que a taxa de chegada dos veículos às praças de pedágio pode ser representada por uma distribuição de Poisson, contanto que sejam analisados intervalos de tempo por hora, o que é o caso do modelo em questão.

Os tempos de atendimentos variam de acordo com a categoria do veículo atendido, de acordo com a forma de pagamento utilizada e com o fato da tarifa ser inteira ou fracionada.

Observou-se que a Teoria das Filas adequou-se perfeitamente a elaboração do modelo, uma vez que o objetivo era dimensionar o número de cabines abertas, levando em consideração, taxa de atendimento, taxa de chega, nº de cabines, tempo de espera na fila e número de veículos, dados estes que estão direta mente relacionados à teoria em questão.

Após a aplicação do modelo por dois meses, analisando-se os resultados da Praça de Guaíba, concluiu-se que na maioria das projeções se confirmaram, com exceção de alguns horários específicos. Identificou-se claramente, que as discrepâncias ocorreram nos horários com maior tráfego de veículos pesados.

Como no conceito original do trabalho, foram utilizados o tráfego passante e o tempo médio de atendimento, não considerando a categoria do veículo atendido, nem outro fator qualquer que pudesse influenciar neste atendimento, viu-se a necessidade de revisar os conceitos iniciais. Ficou clara a necessidade de um tratamento diferenciado para as diversas categorias de veículos, pois na praça atende-se numa mesma cabine tanto veículo leve como pesado, que possuem diferenças quanto ao desempenho (potencia, velocidade, capacidade de aceleração), valor da tarifa e espaço físico ocupado.

Aplicou-se um coeficiente de correção aos tempos de atendimento do modelo original, levando em consideração composição do tráfego por dia e hora e a média de

atendimento de veículos leves e pesados conforme sugerido por Novaes (1975), para um caso semelhante.

O resultado foi a adequação do número de cabines necessárias, aumentando nos horários de maior tráfego pesado e diminuindo nos horários de maior tráfego leve.

No caso específico da praça de Guaíba, outra medida que melhoraria a fluidez de tráfego na praça, seria a modificação do acesso à pista 9, para evitar a diminuição de capacidade da praça por bloqueio dos caminhões que acessam a pista 8.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como os custos das concessionárias estão diretamente relacionados ao número de funcionários contratados, a partir dos resultados deste modelo, seria interessante o desenvolvimento de um trabalho visando o dimensionamento do efetivo necessário para a colocar em prática os resultados, com o objetivo de melhorar o desempenho operacional das praças de pedágio.

Tendo em vista que o modelo gerado em planilha eletrônica tem suas limitações, integrá-lo ao sistema de cobrança de pedágio da concessionária, o tornaria mais dinâmico, com atualizações automáticas. Esta integração possibilitaria a criação de um sistema de monitoração on-line, das cabines de cobrança abertas.

A montagem de um simulador, buscando a melhoria dos resultados, também fica como recomendação de melhorias.

Para finalizar, os resultados deste dimensionamento poderiam ser transformados em ábacos, que facilitariam o supervisor da praça de pedágio a ter uma idéia melhor dos limites de fila e cabines abertas a serem respeitados, para manter o nível de serviço proposto.

REFERÊNCIAS

- ABCR. Associação Brasileira de Concessionária de Rodovias. *Concessionárias do Brasil*. Disponível na Internet em <http://www.abcr.org.br> . Acessado em agosto/2004
- ANCKER, C.J. Jr; GAFARIAN, A.V; Queuing with multiple Poisson inputs and exponential services time. *Journal of the Operations Research Society of America*, v. 5, p. 321 - 327., 1960.
- ARAÚJO, J.J. - *Características operacionais de praças de arrecadação de pedágio*. São Carlos, 2001. Dissertação de mestrado da EESC / USP.
- ASTARITA, V; FLORIAN, M; MUSOLINO, G. A microscopic traffic simulation model for the evaluation of toll station systems. In Conference Proceedings 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems, Dakland, California, EUA, august, 2001.
- COELHO, M.C., FARIAS, T.L., ROUPHAIL, N.M.. Measuring and modeling traffic and emission impacts of toll facilities. In: *Transport and Air Pollution, International Scientific Symposium, 13., 2004*. Boulder, Colorado, USA.
- DAER. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. *Concessões e pedágios*. Disponível na Internet em <http://www.daer.rs.org.br> . Acessado em maio/2004.
- DANKO, J; GULEWICZ V. Insight through innovations: A dynamic approach to demand based toll plaza lane staffing. In: Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference. p. 1116 - 1123.
- DANKO, J; GULEWICZ V. Operational Planning for Electronic Tool Collection: A Unique Approach to Computer Modeling / Analysis. In: Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference. p. 776-785, 1991.
- DEMARCHI, S. Engenharia de Tráfego. Porto Alegre: PPGEP / UFRGS, 2001. Anotações de aula.
- DEUTSCHE WELLE. *Exemplos de sistemas de pedágio na Europa*. Disponível na Internet em http://www.dw.-world.de/brasil/0,3367,757_A_1116996,00.html . Acessado em junho/2004.

- ECOPLAN; COWI; IWW; RAPP; SIEMENS e TIS.PT (2001) Possible Designs of Inter-Urban Road Pricing Schemes for Heavy Goods Vehicles. DESIRE Work-package 2 – Deliverable 2 , Rep. Tcheca.
- EDIE, L.E. Traffic delays at toll booths. *Journal of the Operations Research Society of America*, v.2 p. 107 – 138, 1954.
- FIPE, Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. *A experiência brasileira de concessões de rodovias*. São Paulo: FIPE / USP/ UFRGS, 2003.
- FIPE, Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. *Avaliação do equilíbrio econômico financeiro dos contratos de concessão de rodovias*. São Paulo: FIPE / USP, 2001.
- GARCIA, L. *Diagrama de fluxo de dados (DFD)*. Anotações de aula. Disponíveis na internet em <http://www.garcia.pro.br/ulbra-engsoft/ULBRA-Engenharia-DFD.pdf> . Acessado em novembro/2004.
- HUANG, D.W; HUANG, W.N. The influence of tollbooths on highway traffic. *Physica A*. n. 312, p. 597 – 608, 2002.
- KLODZINSKI, J e AL- DEEK, H. M. New methodology for defining level of service at toll plazas. *Journal of Transportation engineering*, v.128, n.2, p.173 – 181, 2002a.
- LEE, S. H. *Concessão de rodovias à iniciativa privada: critérios para limitação de tarifas em processos de licitação*. Florianópolis, 1996. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC/ SC.
- LIN, F.; SU, C. Level-of-service analysis of toll plazas on freeway main lines. *Journal of Transportation engineering*, v. 120, n. 2, p. 246-263, 1994.
- MACHADO, L.C.K.L. *Concessões rodoviárias mito e realidade*: São Paulo: Premio Editorial Ltda, 2002.
- MCDONALD, D. R.; STAMMER, R. E. Creation of a toll plaza design model. *Transportation Research Board*, 79^o. Annual meeting, national Research council, Washington, D.C, 2000
- MORABITO, R; LIMA, F. C. R. de. Um modelo para analisar o problema de filas em caixas de supermercados: um estudo de caso. *Pesquisa Operacional*, v. 20, n. 1, p. 59-71. Junho, 2000.
- NOVAES, A.G. *Pesquisa operacional e transportes: modelos Probabilísticos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, E. da Universidade de São Paulo, 1975.
- OLIVEIRA, M.L de, BOCANEGRA, C.W.R., CYBIS, E H.B. Avaliação do desempenho de arrecadadores de praças de pedágio com auxílio de um modelo de redes neurais artificiais. In: *Congresso Pan-americano de Engenharia de Transportes*, 13., 2004, Albany, NY.
- OLIVEIRA, M.L de, NETO, J.M.R., CYBIS, E H.B. A Influência do tamanho das Filas na capacidade de atendimento das praças de pedágio. In: *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 13., 2003, Rio de Janeiro. Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes Rio de Janeiro: *ANPET – Rio de Janeiro*, v. 2, p. 1264-1275.

PRADO, D.S. *Teoria das filas e da simulação*. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999, Serie Pesquisa Operacional, v.2.

SETTI, J.R.A; ARAÚJO, J.J. Praças de Pedágio de São Paulo: Análise de características Operacionais. *Transporte em Transformação VI – trabalhos Vencedores do Premio CNT Produção Acadêmica 2001*, C. 8, p. 145-161. Ed Universidade de Brasília, 2002.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. (TRB). Highway capacity manual 2000. Washington, D.C: National Research Council, 2000.

UNIVIAS. Consórcio Univias. *Balanco Social*. Porto Alegre: Consórcio Univias, 2004.

UNIVIAS. Consórcio Univias. *Mapas*. Disponível na Internet em <http://www.univias.com.br> . Acessado em agosto/2004

VAN DIJK, N.M. On hybrid combination of queuing and simulation, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, p. 147-150, 2000.

VAN DIJK, N.M. Why queuing never vanishes, *European Journal Operations Research* 99, p. 463-476, 1997.

VIA VERDE. (Green Lane) Portugal. *Via verde Portugal*. Disponível na Internet em <http://www.viaverde.pt> . Acessado em novembro/2004.

WAGNER, H.M. *Pesquisa operacional*. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1986.

WIDMER, J.^a Contribuição à análise de problemas de filas e estoques nos transportes. São Carlos, 1989. Tese de livre docência. EESC / USP.

WIDNER, J. A; IANNONI, A; FUNCHAL, G. Sistemática para dimensionamento do número de Canais de Atendimento em Praças de Pedágio. In: *XII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 1999, São Carlos. Anais. São Carlos, Operação de Sistema de Transporte –3, p. 585-596.

WOO, T. H; HOEL, L. H. Tool plaza e capacity and level of Service. *Transportation Research Record 1320, Transportation Research Board*, Washington, D.C, p. 119 – 127, 1991.

ZARRILLO, M. L; RADWAN, A.; AL-DEEK, H.M. Modeling traffic operations at electronic toll collection and traffic management Systems. *Computers & Industrial Engineering*, v. 33, n. 3-4, p. 857 – 860, 1997.

ZARRILLO, M.L. Capacity calculations for two toll facilities: Two experiences in ETC implementations. In 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C, Janeiro, 2000, CD-ROM.

APÊNDICE A - FORMULÁRIO PARA PESQUISA DE TEMPO DE ATENDIMENTO

Praça: _____
 Responsável: _____

Tempo de Pagamento
 Função: _____

Data: _____

	Turno	Pista	Arrecadador	Hora Final	Cat.	Tempo (mm:ss:cen)	nº Veic. Fila	Tipo Pagamento					Obs
								Cartão	C/troco	S/troco	Multi	Outro	
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													

* Justificar tempo maior de 1:30 min

** Outros - Justificar (VP, Visanet, ambulancia, etc...)

Figura 19 – Formulário para a pesquisa de tempo de atendimento

APÊNDICE B – CÁLCULO DA SAZONALIDADE DA PRAÇA DE GUAÍBA

Quadro 7 - Passo do Cálculo da série artificial da média móvel

Coluna	Denominação	Descrição
1	Série temporal com 4 componentes	
2	Média Móvel	média móvel de 12 meses
3	Média Móvel Corrigida	Média de elementos da coluna (2), X_i e X_{i+1}
4	Estacionalidade e Aleatoriedade	coluna (1) dividida por coluna (3) (porcentagem)
5	Estacionalidade	média das ocorrências de cada mês para toda série
6	Estacionalidade Corrigida	média das ocorrências de cada mês para toda série corrigida
7	Série temporal desazonalizada	coluna (1) dividida por coluna (6) (porcentagem)

Tabela 14 - Cálculo da Sazonalidade pela série artificial da média móvel

#	Mês	T.E.C.A (1)	MM (2)	MMC = T.C (3)	E.A (4)	E (5)	E (6)	T.C.A (7)
1	jan-01	268.769				1,08	1,07255	250.590
2	fev-01	252.167				0,97	0,97094	259.715
3	mar-01	245.297				1,04	1,03319	237.418
4	abr-01	242.633				0,98	0,97748	248.223
5	mai-01	232.047				0,98	0,98046	236.672
6	jun-01	227.175				0,92	0,91747	247.610
7	jul-01	238.981	240.287			0,99	0,98764	241.971
8	ago-01	235.514	239.337	239.812	0,98	0,99	0,98977	237.949
9	set-01	220.555	237.893	238.615	0,92	0,97	0,96984	227.413
10	out-01	233.158	238.714	238.304	0,98	1,01	1,00378	232.281
11	nov-01	229.971	236.344	237.529	0,97	1,01	1,00380	229.100
12	dez-01	257.171	236.247	236.296	1,09	1,10	1,09309	235.270
13	jan-02	257.377	235.147	235.697	1,09	12,03	12,00000	239.968
14	fev-02	234.834	234.595	234.871	1,00			241.863
15	mar-02	255.155	234.304	234.450	1,09			246.960
16	abr-02	214.195	234.994	234.649	0,91			219.130
17	mai-02	230.881	235.040	235.017	0,98			235.483
18	jun-02	213.967	235.721	235.381	0,91			233.214
19	jul-02	232.367	235.203	235.462	0,99			235.275
20	ago-02	232.013	234.350	234.776	0,99			234.412
21	set-02	228.844	233.211	233.780	0,98			235.960
22	out-02	233.706	231.080	232.145	1,01			232.827
23	nov-02	238.143	233.589	232.335	1,02			237.241
24	dez-02	250.948	233.459	233.524	1,07			229.577
25	jan-03	247.147	233.687	233.573	1,06			230.430
26	fev-03	221.160	233.603	233.645	0,95			227.780
27	mar-03	229.593	233.583	233.593	0,98			222.219
28	abr-03	244.302	233.226	233.404	1,05			249.930
29	mai-03	229.322	233.306	233.266	0,98			233.892
30	jun-03	216.703	232.623	232.964	0,93			236.196
31	jul-03	231.359	233.341	232.982	0,99			234.254
32	ago-03	231.764	232.085	232.713	1,00			234.160
33	set-03	224.566	233.178	232.632	0,97			231.549
34	out-03	234.664	233.576	233.377	1,01			233.781
35	nov-03	229.945	232.236	232.906	0,99			229.074
36	dez-03	259.562	232.652	232.444	1,12			237.457