GUSTAVO SIQUEIRA ALVARENGA

(contato: gsalvarenga@yahoo.com.br)

**Estudo do impacto do pedágio no
aumento do tempo de viagem, no consumo
de combustível e na emissão de poluentes**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Dinâmica das máquinas e sistemas

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Canale

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Alvarenga, Gustavo Siqueira

A473e   Estudo do impacto do pedágio no aumento do tempo de viagem, no consumo de combustível e na emissão de poluentes / Gustavo Siqueira Alvarenga ; orientador Antonio Carlos Canale. -- São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Pedágio. 2. Combustível. 3. Emissões de CO₂. 4. AVI. 5. ORT. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Engenharia de Materiais Aeronáutica e Automobilística pelo apoio institucional à pesquisa.

Ao professor Antonio Carlos Canale pela orientação.

À Central de Gestão de Meios de Pagamentos – CGMP e ao Fipai pelo apoio financeiro à pesquisa.

Aos funcionários da CGMP Pedro Donda, Maria Theresa, e Antonio Pereira pelo apoio, ao Luiz Eduardo Murakami pela ajuda nos trabalhos de campo, e em especial ao André Cardoso, pelo empenho e apoio em todas as etapas desse trabalho.

À concessionária Novadutra pelo fornecimento dos dados e por disponibilizar a praça de pedágio para realização dos testes.

Às empresas Tegma e Casas Bahia pelo empréstimo dos caminhões utilizados nos testes.

À OpenCadd pelo apoio técnico.

Ao meu amigo peruano Henry Pizarro pela ajuda nos testes em pista, pelo companheirismo como colega de departamento e por me ensinar muitas coisas.

À Renata, chefe da sala, pelo companheirismo e por todas as dúvidas sanadas.

Aos professores Josmar Pagliuso e José Reinaldo Setti.

Aos amigos: Alface, Magrão, Gilbert e Pilha, que acompanharam de perto, pela amizade.

Ao Newton pela competência na execução de seu trabalho.

À minha família, Pai e Mãe, Paulinha e Beitinha, pelo incentivo nas minhas escolhas.

À Paula Preta, por todo o restante impreterível e necessário para se viver e trabalhar.

“Não me pergunte quem sou e não me
diga para permanecer o mesmo”

(Michel Foucault)

RESUMO

A praça de pedágio é uma intervenção instalada na rodovia que obriga à uma redução da velocidade de curso dos veículos. Essa alteração no perfil de velocidade aumenta o tempo de viagem, gera um consumo de combustível extra e a produção excedente de poluentes provenientes da queima desse combustível. Este trabalho analisou automóveis e caminhões cruzando a praça de pedágio Jacareí, localizada na Rodovia Presidente Dutra km 165. Mediu-se quanto tempo um veículo leva para efetuar o pagamento da tarifa e para percorrer a praça de pedágio. Foram feitas simulações do consumo de combustível dos caminhões cruzando a praça de pedágio. Foi utilizado um modelo matemático construído na plataforma Matlab Simulink. Baseou-se em testes em pista utilizando um GPS para aquisição dos dados de velocidade e espaço. Avaliou-se o consumo de combustível em função da carga transportada para três distintos perfis de velocidade de caminhões. Observou-se que o custo de uma transação no pedágio vai além do valor da tarifa. O custo com combustível da transação pode variar de R\$0,52 a R\$1,52, a depender da carga transportada pelo caminhão e do tamanho da fila de espera na cabine. A cobrança da tarifa quando efetuada com o veículo em movimento ameniza os impactos inerentes. A utilização do AVI como meio de pagamento da tarifa reduz em média 60% do tempo necessário para cruzar a praça, e até 89% do custo com combustível da transação. Foi feita uma previsão anual do gasto de combustível e emissão de poluentes em função da operação da praça de pedágio em estudo. Avaliou-se em cerca de 4,1 mil toneladas o montante de CO₂ emitido em função da operação da praça. Conclui-se que a maneira mais eficiente do ponto de vista econômico e ambiental de realizar a cobrança da tarifa é através do conceito *“Open Road Tolling”*.

Palavras chave: pedágio, combustível, emissões CO₂, AVI, ORT.

ABSTRACT

The toll plaza is an intervention installed in the road that requires a lower speed of travel by the vehicles. This change in velocity profile increases the travel time, generates an extra fuel consumption and surplus the production of pollutants coming from the combustion of fuel. This research evaluates autos and trucks crossing the toll plaza of Jacarei at the President Dutra Highway km 165. It was measured how much time a vehicle takes to cross the plaza's area of influence and also the necessary delay to complete a transaction at a toll booth. A computer simulation model, developed on Matlab Simulink platform, was used to estimate the consumption of fuel by the trucks. Field data from velocity and position was collected on a test track using a GPS. It was evaluated the fuel consumption according with the load transported and the speed profile from trucks. It was observed that the cost of a transaction on the toll both goes beyond the price. The fuel cost of the transaction can vary from \$0.29 to R \$0.84, depending on the load carried by the truck and the size of the queue in the cabin. The use of electronic toll collection, which enables the payment required in motion, softens the impacts involved. The use of AVI decreases 60% of the time required to cross the toll plaza, and up to 89% of fuel cost of the transaction. An annual forecast of expenditure with fuel and emission of pollutants was made for the region under study. It was evaluated the contribution of the toll plaza in approximately 4100 tones of CO₂. It was concluded that the most efficient economically and environmentally way to pay the tax at a toll plaza is using the concept of Open Road Tolling.

Key-words: toll, fuel, CO₂ emission, AVI, ORT.

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
AVI	Identificação Automática do Veículo
BEN	Balanço Energético Nacional
BMEP	Brake Mean Effective Pressure
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption
ETC	Electronic Toll Collection
GGE	Gases do Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ITS	Sistema de Transporte Inteligente
LCV	Laboratório Computacional de Veículos
MME	Ministério de Minas e Energia
ORT	Open Road Tolling
PBT	Peso Bruto Total
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
SAE	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área frontal do veículo	$[m^2]$
A, B, X	vetores do sistema de equação $AX = B$	$[-]$
ab	distância entre a quinta-roda e o centro dos eixos traseiros do veículo 2 na direção de “x”	$[m]$
$AN5$	reação da força normal na quinta roda	$[N]$
$AR5$	reação da força tangencial na quinta roda	$[N]$
B	consumo de combustível	$[l/100km]$
B_{anual_ce}	volume de combustível anual gasto pelos caminhões que utilizaram a cabine eletrônica	$[10^6 L]$
B_{anual_cm}	volume de combustível anual gasto pelos caminhões que utilizaram a cabine manual	$[10^6 L]$
B_{anual_pl}	volume de combustível anual gasto se todos os caminhões tivessem utilizado a cabine manual	$[10^6 L]$
$B_{ce}(c)$	consumo de combustível do perfil cabine eletrônica em função da carga transportada	$[ml]$
$B_{cm}(c)$	consumo de combustível do perfil cabine manual em função da carga transportada	$[ml]$
$B_{desp.2008}$	volume de combustível desperdiçado	$[10^6 L]$
$B_{\_ml}$	consumo de combustível em marcha lenta	$[g/s]$
$BMEP$	pressão média efetiva	$[bar]$
$B_{pl}(c)$	consumo de combustível do perfil passagem livre em função da carga transportada	$[ml]$
bs	consumo de combustível específico	$[g/kWh]$
c	carga transportada	$[ton]$
CA	consumo de combustível	$[m^3]$
CC	consumo de energia	$[TJ]$
cc	volume de cada cilindro do motor	$[cm^3]$
C_D	coeficiente de arrasto aerodinâmico	$[-]$

<i>cg1x</i>	posição do centro de gravidade do veículo 1 na direção “x”	[m]
<i>cg1z</i>	posição do centro de gravidade do veículo 1 na direção “z”	[m]
<i>cg2x</i>	posição do centro de gravidade do veículo 2 na direção “x”	[m]
<i>cg2z</i>	posição do centro de gravidade do veículo 2 na direção “z”	[m]
<i>dt</i>	variação do tempo	[s]
<i>dw</i>	variação da velocidade angular	[rad/s]
<i>f, f(v)</i>	coeficiente de resistência ao rolamento	[-]
<i>Fconv</i>	Fator de Conversão (tEP/Unidade Física) da Unidade Física para tEP médio em PCS	[-]
<i>Fcorr</i>	fator de correção de Poder Calorífico Superior (PCS), para Poder Calorífico Inferior (PCI)	[-]
<i>Femiss</i>	fator de emissão de carbono	[tC/TJ]
<i>Ftot, Ftot(v)</i>	força de tração total do motor	[N]
<i>Fttot, Fttot(v)</i>	força de tração total disponível na roda	[N]
<i>Fxed1</i>	força de tração disponível no eixo dianteiro do veículo 1	[N]
<i>Fxet 1</i>	força de tração disponível no eixo traseiro do veículo 1	[N]
<i>g</i>	gravidade	[m/s ²]
<i>h</i>	altitude da rodovia	[m]
<i>I</i>	momento de inércia da massa rolante	[kg.m ²]
<i>i</i>	índice: cm – cabine manual; ce – cabine eletrônica; e pl – passagem livre	[-]
<i>ite</i>	massa equivalente relativa às inércias das partes rotativas do sistema de transmissão	[kg]
<i>iwed1</i>	massa equivalente relativa às inércias das rodas dianteiras do veículo 1	[kg]

iwet1	massa equivalente relativa às inércias das rodas traseiras do veículo 1	[kg]
iwet2	massa equivalente relativa às inércias das rodas traseiras do veículo 2	[kg]
ka, Kb	coeficientes relativos ao tipo de pneumático	[-]
L	distância entre eixos do veículo	[N]
Lf	distância do CG em relação ao eixo dianteiro	[m]
Lr	distância do CG em relação ao eixo traseiro	[m]
m	massa do veículo	[kg]
n	rotação do motor	[rpm]
N5	força normal na quinta roda	[N]
Ned1	força normal no eixo dianteiro do veículo 1	[N]
Net1	força normal no eixo traseiro do veículo 1	[N]
Net2	força normal no eixo traseiro do veículo 2	[N]
Nºcil	número de cilindros do motor	[-]
Ntot	força normal total do veículo	[N]
p	pressão do pneumático	[psi]
Pt	potência efetiva do motor	[kW]
QC	conteúdo de carbono expresso giga gramas de carbono	[GgC]
r	raio dinâmico do pneumático	[m]
R5	força tangencial na quinta roda	[N]
Ra, Rax(v)	força de resistência aerodinâmica	[N]
Red	redução total do sistema de transmissão	[-]
Ren	rendimento total do sistema de transmissão	[-]
$R_g, R_{gx}(W, \emptyset)$	força de resistência devido à inclinação da pista	[N]
Rg1	força de resistência devido à inclinação da pista no veículo 1	[N]
Rg2	força de resistência devido à inclinação da pista no veículo 2	[N]
Ri	força de inércia	[N]
Ri1	força de inércia no veículo 1	[N]

R_{i2}	força de inércia no veículo 2	[N]
R_{ired1}	força de inércia das partes rotativas no eixo dianteiro do veículo 1	[N]
R_{irem}	força de inércia total das partes rotativas motoras	[N]
$R_{iren m}$	força de inércia total das partes rotativas não motoras	[N]
R_{iret1}	força de inércia das partes rotativas no eixo traseiro do veículo 1	[N]
R_{iret2}	força de inércia das partes rotativas nos eixos traseiros do veículo 2	[N]
r_m	raio da massa rolante	[m]
R_r	força de resistência ao rolamento	[N]
R_{red1}	força de resistência ao rolamento no eixo dianteiro do veículo 1	[N]
R_{ret1}	força de resistência ao rolamento no eixo traseiro do veículo 1	[N]
R_{ret2}	força de resistência ao rolamento no eixo traseiro do veículo 2	[N]
T	torque	[N.m]
TC	tempo de atendimento na cabine manual de cobrança	[s]
T_{ed1}	força de tração do motor no eixo dianteiro do veículo 1	[N]
T_{et1}	força de tração do motor no eixo traseiro do veículo 1	[N]
T_m	Torque no motor	[N.m]
T_{ms}	torque na saída do motor	[kgf.m]
TP	tempo médio para cruzar a praça de pedágio	[s]
TP_e	tempo médio necessário para cruzar a praça de pedágio passando pela cabine eletrônica	[s]
TP_m	tempo médio necessário para cruzar a praça de pedágio passando pela cabine manual	[s]

TP_{ort}	tempo necessário para cruzar a praça de pedágio sem desaceleração da velocidade	[s]
V	velocidade relativa do ar	[m/s]
W	peso do veículo	[kg]
$W1$	peso total do veículo 1	[N]
$W2$	peso total do veículo 2	[N]
Wf	peso no eixo dianteiro do veículo	[N]
Wr	peso no eixo traseiro do veículo	[N]
X, Y, Z	parâmetros da equação de consumo em função da carga transportada	
$x5$	distância em “x” da quinta roda em relação ao eixo traseiro do veículo 1	[m]
$z5$	distância em “z” da quinta roda em relação ao pavimento	[m]
$\%Fed1$	distribuição da força de tração do motor no eixo dianteiro do veículo 1,	[%]
$\%Fet1$	distribuição da força de tração no eixo traseiro do veículo 1,	[%]
$\%Fet2$	distribuição da força de tração no eixo traseiro do veículo 2,	[%]
$\%Ned1$	distribuição da força normal no eixo dianteiro do veículo 1,	[%]
$\%Net1$	distribuição da força normal no eixo traseiro do veículo 1,	[%]
$\%Net2$	distribuição da força normal no eixo traseiro do veículo 2,	[%]
$\ddot{x}$	aceleração do veículo	[m/s ²]
$\varnothing, \theta$	inclinação da pista	[°]
α	coeficiente relativo às partes rotativas do sistema de transmissão	[-]
ΔTP_{l_m}	diferença entre o tempo médio obtido para cobrança eletrônica e manual	[s]

$\Delta T_{P_{ort\_m}}$	diferença entre o tempo ORT e o tempo médio cabine manual	[s]
γ_b	coeficiente das inércias rolantes	[-]
ξ	relação de transmissão até roda	[-]
ρ	densidade do ar	[kg/m ³]
ΣMA	somatório de momento com relação ao ponto A	[N.m]
ΣMB	somatório de momento com relação ao ponto B	[N.m]
ΣMC	somatório de momento com relação ao ponto C	[N.m]
γ	coeficiente que expressa o efeito das inércias das partes rotativas do veículo para determinada marcha engrenada	[-]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Convenção de eixos SAE.	30
Figura 2– Posição do CG na longitudinal (CANALE, 1989).....	31
Figura 3– Passeio longitudinal do CG (CANALE, 2004)	33
Figura 4 – Escoamento do ar no veículo (HEISLER, 2002).	36
Figura 5 – Arrasto aerodinâmico (GILLESPIE, 1992).	38
Figura 6 – Escoamento de ar otimizado pela utilização do defletor (HEISLER, 2002). ..	39
Figura 7 – Força de resistência devido à inclinação da pista (CANALE, 1989).	40
Figura 8 - Forças atuantes num cavalo + semireboque (NAVARRO, 1997).....	44
Figura 9 – Mapa de consumo de combustível do motor de um caminhão.	48
Figura 10 – Mapa de consumo de combustível do motor de uma caminhonete.	49
Figura 11 – Tela Principal do programa simulador.....	53
Figura 12– Sistemas considerados no simulador (CANALE, 2009).	54
Figura 13 – Motor mapeado relacionando carga, rotação e torque (CANALE, 2009). ..	55
Figura 14 – Motor mapeado relacionando carga, rotação e consumo específico (CANALE, 2009).....	55
Figura 15 – Bloco “logica_marchas” e controlador PID.	56
Figura 16 – Troca de marchas efetuadas pelo bloco lógico.	57
Figura 17 - Acionamento percentual do acelerador controlado pelo PID durante a simulação.....	58
Figura 18 - Pressão no freio dianteiro com o veículo vazio controlada pelo PID.....	58
Figura 19 – Mapa da rodovia Presidente Dutra.	65
Figura 20 - Distância Mapeada x Altitude.	66
Figura 21 - Foto aérea da Praça de Pedágio Jacareí, Rodovia Presidente Dutra, Km – 165.	67
Figura 22 – Velocity Box – VBOX.	71
Figura 23 - Foto dos caminhões utilizados nos testes em pista.	72
Figura 24 - Distância x Velocidade – Comparação – CAT 05.	73
Figura 25 - Tempo x Velocidade – Comparação – CAT 05.....	73
Figura 26 – Testes em pista – Cabine Manual.	74

Figura 27 – Testes em pista – Cabine Eletrônica.	75
Figura 28 – Perfil Médio.	76
Figura 29 – Velocidade x Tempo em função do tempo de espera na cabine.	78
Figura 30 - Comparação do “TP – Tempo na Praça” para automóveis.	89
Figura 31 - Comparação do “TP – Tempo na Praça” para caminhões.....	90
Figura 32 – Comparação entre distâncias mapeada e simulada em função do tempo.	92
Figura 33 – Comparação entre distâncias mapeada e simulada para outros perfis de velocidade em função do tempo para caminhão CAT 03.	92
Figura 34 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 03.	93
Figura 35 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 05.	94
Figura 36 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 07.	94
Figura 37 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 09.	95
Figura 38 – Número de acionamentos no freio em função da distância – Cabine Manual.....	96
Figura 39 – Número de acionamentos no freio em função da distância – Cabine Eletrônica.....	96
Figura 40 – Número de acionamentos no freio em função da distancia – Passagem Livre.	97
Figura 41 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 03.	98
Figura 42 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 05.	98
Figura 43 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 07.	99
Figura 44 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 09.	99
Figura 45 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 03.	100
Figura 46 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 05.	101
Figura 47 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 07.	101
Figura 48 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 09.	102
Figura 49 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 03	103
Figura 50 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 05.	103
Figura 51 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 07.	104
Figura 52 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 09.	104
Figura 53 – Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 03.....	106
Figura 54 - Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 05.....	106

Figura 55 - Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 07.....	107
Figura 56 – Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 09.....	107
Figura 57 - Consumo de combustível x Distância mapeada – Cabine Manual.	108
Figura 58 - Consumo de combustível x Distância mapeada – Cabine Eletrônica.....	108
Figura 59 - Consumo de combustível x Distância mapeada – Passagem Livre.	109
Figura 60 - Consumo x PBT.	111
Figura 61 – Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 03.....	118
Figura 62 - Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 05.....	120
Figura 63 - Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 07.....	121
Figura 64 - Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 09.....	122

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de resistência do ar (CANALE, 1989).	38
Tabela 2– Valores normais de “ γ_b ” para veículos (CANALE, 1989).....	41
Tabela 3 – Contribuição relativa de fontes de poluição do ar (CETESB, 2008).	60
Tabela 4 – Valores do fator de conversão (MATTOS, 2001).	62
Tabela 5 – Valores do fator de emissão (MATTOS, 2001).	63
Tabela 6 – Fluxo na praça de pedágio Jacareí no ano de 2008.	66
Tabela 7 – Tempo de atendimento em segundos para diferentes praças de pedágio (ARAÚJO, 2001).	69
Tabela 8 – Capacidade de atendimento para diversos tipos de cobrança em veic/h (ARAÚJO, 2001).	69
Tabela 9 - Informações dos caminhões utilizados nos testes.	72
Tabela 10 – Valores de PBT e classes veiculares por categoria.....	79
Tabela 11 – Parâmetros da simulação do caminhão CAT 03.	80
Tabela 12 – Parâmetros da simulação do caminhão CAT 05.	80
Tabela 13– Parâmetros da simulação do caminhão CAT 07.	81
Tabela 14 – Parâmetros da simulação do caminhão CAT 09.	81
Tabela 15 – Fluxo de veículos por categoria – Ano de 2008.	83
Tabela 16 – Carga média transportada por categoria.....	84
Tabela 17 – Tempo de atendimento na cabine (segundos) – Praça de Jacareí.	86
Tabela 18 – Resultados do tempo na praça “TP” – Automóveis.....	88
Tabela 19 - Resultados do tempo na praça “TP” – Caminhões.	88
Tabela 20 – Acréscimo do tempo devido à cobrança do pedágio na cabine manual....	91
Tabela 21 – Resultados da simulação – CAT 03.....	109
Tabela 22 - Resultados da simulação – CAT 05	110
Tabela 23 - Resultados da simulação – CAT 07	110
Tabela 24 - Resultados da simulação – CAT 09	110
Tabela 25 – Consumo em marcha lenta e consumo gasto na cabine em função do tempo de espera.....	112

Tabela 26 – Custo com combustível da transação por tipo de passagem e por categoria.	113
Tabela 27 – Custo com combustível da transação por tipo de passagem e por categoria.	114
Tabela 28 – Porcentagem de redução no custo da transação pela utilização da cobrança eletrônica.	115
Tabela 29 – Consumo anual por tipo de passagem e consumo anual desperdiçado. .	116
Tabela 30 – Cenário do Estudo de Caso – CAT 03.	118
Tabela 31 – Resultados do estudo de caso – CAT 03.	119
Tabela 32 - Cenário do Estudo de Caso – CAT 05.	120
Tabela 33 - Resultados do estudo de caso – CAT 05.	120
Tabela 34 - Cenário do Estudo de Caso – CAT 07.	121
Tabela 35 - Resultados do estudo de caso – CAT 07.	121
Tabela 36 - Cenário do Estudo de Caso – CAT 09.	122
Tabela 37 - Resultados do estudo de caso – CAT 09.	122
Tabela 38 – Número mínimo de passagens mensais.	123

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Objetivos	22
1.2	Organização da Dissertação	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Breve Visão Histórica do Transporte Brasileiro	25
2.2	O Pedágio Rodoviário.....	27
2.2.1	Cobrança Eletrônica do Pedágio	28
2.3	Dinâmica Veicular	30
2.3.1	Introdução.....	30
2.3.2	Determinação do CG	30
2.3.3	Forças de Resistência ao Movimento do Veículo	33
2.3.4	Força Propulsora do Veículo	42
2.3.5	Análise das Forças	43
2.4	Consumo de Combustível	47
2.4.1	Consumo de Combustível à Velocidade Constante	49
2.5	O Modelo Computacional	52
2.6	Emissão de Poluentes	59
2.6.1	Método <i>Top Down</i>	61
3	METODOLOGIA	65
3.1	Praça de Pedágio.....	65
3.2	Estudo do Tempo na Praça	67
3.3	Testes em Pista	71
3.4	Simulações Computacionais	78
3.5	Análise Ambiental	82
4	RESULTADOS.....	86
4.1	Resultados do Estudo do Tempo	86
4.2	Resultados das Simulações	91
4.3	Consumo de Combustível	105
4.4	O Custo com Combustível de uma Transação no Pedágio	111
4.5	Emissões de CO ₂	115
4.6	Estudos de Caso	117
4.7	Análise de Resultados e Observações.....	123
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	125
5.1	Conclusões	125
5.2	Recomendações	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
	ANEXO A : CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS	132

1 INTRODUÇÃO

No curso do processo de evolução do sistema de transporte brasileiro ocorrido no século passado, houve um conjunto de ações político econômicas que favoreceram a absoluta primazia do transporte rodoviário perante os demais modais de transporte. Entretanto, a partir da década de 80, as rodovias brasileiras passaram por um processo de deterioração causado pela redução dos recursos destinados a estes fins, que culminou na Lei nº 8987/95, que regulamenta a concessão de serviços públicos às empresas privadas.

Nos termos da lei, que vincula remuneração e tarifação, a privatização implica numa intervenção física da rodovia, envolvendo a instalação de cabines de cobrança, que restringem o direito de passagem mediante pagamento do tributo do pedágio.

Do ponto de vista energético, o pedágio pode ser considerado um obstáculo, pois provoca uma alteração no perfil de velocidade de curso dos veículos. Primeiramente, ocorre a absorção da energia cinética do movimento, transformando-a em calor dissipado nos sistemas de freios, e em seguida, ocorre a transformação de energia química, proveniente da queima do combustível, novamente em energia cinética, necessária para recolocar o veículo na velocidade de curso. Nessa perspectiva, o pedágio pode ser comparado a uma lombada, um semáforo, ou até uma rodovia mal conservada, que exige que o motorista reduza a velocidade para enfrentar os obstáculos, implicando num aumento dos impactos econômicos e ambientais gerados pelo transporte rodoviário.

Para os usuários, então, o custo total associado ao pedágio vai além do valor da tarifa. Deve-se levar em conta também o custo adicional do tempo gasto na espera das filas, acarretando aumento do tempo de viagem, e ainda o gasto excedente com combustível proveniente do aumento de energia necessário para cruzar a região de interferência no perfil de velocidade dos veículos.

A utilização de sistemas de transportes inteligentes – ITS, na identificação automática dos veículos – AVI, tem se mostrado um interessante meio de pagamento da tarifa de pedágio. No Brasil, o uso dessa tecnologia, aplicada na forma de cobrança

eletrônica do pedágio – ETC, permite que o usuário realize o pagamento da tarifa em movimento, a uma velocidade recomendada de 40 km/h, não sendo necessária a parada para que seja efetuada a cobrança.

Em alguns outros países essa tecnologia tem sido empregada na forma de “Passagem Livre”, ou, no inglês “Open Road Tolling” – ORT, na qual a identificação é realizada com o veículo na velocidade normal de tráfego. De acordo com Klodzinski *et al.* (2007), o próximo passo evolutivo a ser enfrentado na integração de sistemas ITS e cobrança de pedágio é a utilização do conceito de ORT.

Sabe-se que a não alteração do perfil de velocidade, ou a passagem livre pelo pedágio, gera ganhos consideráveis para toda a cadeia de envolvidos nesse sistema. Os usuários são beneficiados diretamente pela redução do tempo de espera para pagamento da tarifa e pela redução do consumo de combustível (AL_DEEK *et al.*, 1996; LI *et al.*, 1999). As concessionárias são beneficiadas pela redução dos custos operacionais e administrativos envolvidos na manutenção da praça (DANDO, 1997). Além disso, os índices de acidentes na região da praça de pedágio e o número de emissões de poluentes provenientes da queima do combustível também são menores (KLODZINSKI *et al.*, 2007; BARTIN *et al.*, 2006).

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa então podem ser definidos por meio de dois vieses.

Do ponto de vista do usuário busca-se:

- quantificar o aumento do tempo necessário para cruzar a praça de pedágio em estudo em função da instalação das cabines de cobrança;
- quantificar o custo com combustível envolvido em uma transação no pedágio;
- avaliar através da análise de custo/benefício quais os ganhos inerentes do pagamento eletrônico da tarifa através da utilização do sistema AVI;

e do ponto de vista ambiental:

- quantificar o impacto da operação da praça de pedágio Jacareí no ano de 2008, no que diz respeito ao aumento no consumo de combustível e na geração de dióxido de carbono, e

- comparar e avaliar qual a maneira mais eficiente de realizar a cobrança no pedágio.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está organizada em cinco capítulos contados a partir da introdução.

- **Capítulo 2:**

No capítulo dois é feita uma revisão da literatura, iniciando numa visão da história do transporte brasileiro e nas características do pedágio rodoviário; passando pela discussão técnica dos conceitos de dinâmica veicular importantes para o conhecimento do consumo de combustível dos veículos e apresentando o modelo computacional utilizado nas simulações; e finalizando, mostrando a forte relação existente entre o setor de transporte e as emissões de gases do efeito estufa, e quais os métodos científicos utilizados no cálculo desses gases.

- **Capítulo 3:**

O capítulo três faz a descrição da metodologia utilizada para aquisição e manipulação dos dados referentes ao estudo do tempo na praça e os testes em pistas. Em seguida, apresenta os parâmetros utilizados nas simulações computacionais para obter o consumo de combustível dos caminhões, e encerra a seção mostrando as considerações feitas para o cálculo das emissões de CO₂.

- **Capítulo 4:**

O capítulo quatro inicia-se discutindo os resultados do estudo do tempo e das simulações computacionais. Em seguida, faz-se a manipulação desses dados para mostrar o consumo de combustível e os valores do custo envolvido na transação do pedágio. A seção seguinte apresenta as curvas de consumo de combustível obtidas e faz a avaliação do impacto ambiental. Por fim, são apresentados os estudos de caso, onde se faz uma análise de custo/benefício da utilização do sistema eletrônico de pagamento da tarifa utilizando o AVI.

- **Capítulo 5:**

Inicia-se o capítulo cinco fazendo algumas considerações gerais sobre esta dissertação. Em seguida são apresentadas as principais conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE VISÃO HISTÓRICA DO TRANSPORTE BRASILEIRO

O transporte rodoviário de cargas brasileiro teve início nos anos 30, quando da construção das primeiras rodovias, mas foi a partir das décadas de 40 e 50 que o Brasil viveu um conjunto de ações políticas, somadas ao contexto econômico mundial, que determinaram a absoluta primazia do transporte rodoviário sobre os demais modais de transporte.

No curso desse desenvolvimento, destaca-se que a justificativa para escolha do modo rodoviário como principal meio de transporte de mercadorias e pessoas tem íntima relação com o processo de industrialização da economia brasileira. A partir do governo de Juscelino Kubitschek as rodovias contaram com o apoio determinante do Estado.

Da opção pelo modo rodoviário, destaca-se que do ponto de vista econômico, a ampliação da infra-estrutura rodoviária significava menores custos de implantação por quilômetro, menores prazos de maturação e retorno de investimentos, bem como a adaptação gradual das condições das vias às exigências da demanda, mas, sobretudo, atendia aos interesses da modernização do Brasil, e de expansão da crescente indústria automobilística internacional (ARAÚJO, 2009).

No âmbito político da administração rodoviária federal, dois fatores foram fundamentais para consolidação e execução de uma política rodoviária nacional.

Em primeiro lugar, a criação do Departamento Nacional de Transportes – DNER, uma Autarquia Federal, técnica e administrativamente bem estruturada em todo território nacional, com personalidade jurídica distinta da União, recursos financeiros próprios e autonomia administrativa.

Em segundo lugar, a criação do Fundo Rodoviário Nacional – FRN, formado pela arrecadação do Imposto Único sobre Combustíveis e Lubrificantes. Ao Fundo, agregaram-se ainda mecanismos de vinculação de recursos provenientes da Taxa

Rodoviária Única e dos impostos sobre o transporte rodoviário de passageiros e cargas.

Pode-se dizer que a criação do DNER e do FRN, pelo Decreto-Lei nº 8463, de 27 de dezembro de 1945, constituiu um dos marcos mais significativos na história do transporte brasileiro. O processo de destinação de recursos através do mecanismo de vinculação de receita ao FRN garantia de forma contínua e ininterrupta, as verbas necessárias para viabilizar a execução da política rodoviária nacional traçada (DUARTE, 2009).

Havia, assim, um contexto político econômico que favorecia uma forte articulação entre transporte, energia e indústria automobilística. O desenvolvimento da indústria do petróleo servia não só como combustível, mas também como matéria prima para pavimentação das rodovias; a indústria automobilística fornecia os veículos e impulsionava o crescimento da indústria; e o FRN garantia as verbas necessárias para o DNER construir, pavimentar e conservar as rodovias (ARAÚJO, 2009; DUARTE, 2009).

No período entre 1945 e 1980, a infra-estrutura rodoviária teve um crescimento extraordinário, tanto em extensão como em qualidade, reiterando assim a supremacia do transporte rodoviário sobre o modo ferroviário e marítimo que enfrentavam forte declínio. Pode-se destacar desse período a construção de rodovias como: Presidente Dutra, Fernão Dias, Rio – Bahia, BR-050 (Brasília/São Paulo), Porto Alegre – Osório, Rio – Santos, BR-040 (Brasília/Belo Horizonte), entre outras.

Curiosamente, segundo Duarte (2009), especulava-se na época, que o crescimento em proporções geométricas do binômio: estradas x veículos automotores, que implicava numa maior arrecadação de impostos através do consumo de combustíveis e lubrificantes líquidos, proporcionariam ao DNER uma fonte inexaurível de recursos, tal que ao cabo de algum tempo, este teria mais dinheiro do que o consignado em todo o orçamento geral da república.

Entretanto, em 1974, o governo federal criou o Fundo Nacional de Desenvolvimento – FND, cuja legislação previa a desvinculação progressiva de outros fundos, inclusive o FRN, fazendo com que parte deles fosse gradualmente liberada para uso livre do governo federal. Em detrimento dos planos de trabalho do DNER, se beneficiam a Petrobras S/A, o Ministério de Minas e Energia, o Fundo de Pesquisas

Minerais e Nucleares, o Departamento Nacional de Energia Nuclear, entre outros (BARAT, 1991).

Por fim, a supremacia do transporte rodoviário aleijou o desenvolvimento dos outros modos, e contribuiu para a inoperância de nosso sistema de transporte, diante de uma nova lógica nascente no transporte internacional. A partir dos anos 70, em decorrência de profundas mudanças nos processos produtivos e, da incorporação das tecnologias de comunicação e informática, os grandes mercados já buscavam reduções de custo enfatizando as especializações funcionais e a intermodalidade. Ao que se sucedeu, a escassez de recursos de todo o processo de alterações no suporte financeiro do DNER promoveu a degradação física das infra-estruturas, a queda significativa na qualidade dos serviços prestados, o elevado número de acidentes, além dos altos custos com manutenção dos caminhões (BARAT, 2007).

Dessa maneira, dá-se início, a partir do ano de 1995, regulamentado pela Lei nº 8987/95, ao Programa de Concessão de Rodovias Federais – PCRF, que trata da concessão de serviços públicos à iniciativa privada.

2.2 O PEDÁGIO RODOVIÁRIO

O Programa de Concessão de Rodovias Federais – PCRF transfere para empresas privadas os custos de conservação, operação e ampliação das rodovias. Nos termos da lei, que vincula remuneração e tarifação, a privatização das rodovias envolve a instalação de praças de arrecadação de pedágio, já que a receita das empresas responsáveis pela administração da rodovia é oriunda da cobrança de tarifa aos usuários.

O mecanismo básico de recolhimento da taxa do pedágio é o mesmo em diversos países: os usuários da rodovia devem desacelerar os veículos para efetuar o pagamento, e posteriormente, retomar sua velocidade de curso.

Do ponto de vista energético, o pedágio pode ser considerado um obstáculo, pois exige uma alteração no perfil de velocidade de curso dos veículos. Nessa perspectiva, o pedágio pode ser comparado à uma rodovia mal conservada, que acarreta impactos econômicos e ambientais, como mostra Bartholomeu (2008), ou

comparado com um semáforo, ou uma lombada, como mostra Freitas (2003), podendo acarretar na qualidade local do ar.

Para os usuários, então, o custo total associado ao pedágio vai além do valor da tarifa. Deve-se levar em conta também o custo adicional do tempo gasto na espera das filas, acarretando um aumento do tempo de viagem, e ainda o gasto excedente com combustível proveniente do aumento de energia necessário para cruzar a região de interferência no perfil de velocidade dos veículos, que compreende basicamente os limites físicos da praça de pedágio (ARAÚJO, 2001; NETO, 2007).

A incorporação de novas tecnologias e a utilização de Sistemas de Transporte Inteligente – ITS têm sido largamente utilizados para monitoramento e melhoria do tráfego. Diversos autores estudam a aplicação desses sistemas através da avaliação de custo/benefício.

Uma dessas tecnologias, como a cobrança eletrônica de tarifa, ou no inglês, “*Electronic Toll Collection - ETC*”, permite que os usuários paguem as tarifas do pedágio com o veículo em movimento, através do registro automático de sua passagem.

A cobrança eletrônica é feita através da identificação automática dos veículos – AVI, do inglês, “*Automatic Vehicle Identification*”. Essa tecnologia tem capacidade de identificar os veículos ao passarem por pontos específicos da rodovia sem a necessidade de interação com o motorista.

2.2.1 Cobrança eletrônica do pedágio

A utilização da cobrança eletrônica do pedágio feita através da identificação automática de veículos – AVI teve início nos Estados Unidos em torno do ano de 1986.

No Brasil, o Estado de São Paulo iniciou a fase de testes em junho de 2000, quando deu-se início à fase de operação comercial controlada. Durante essa fase, veículos comerciais previamente selecionados foram equipados com *tags* a fim de testar a tecnologia escolhida, e com isso ajustar alguns parâmetros técnicos operacionais necessários para torná-la disponível para outras praças de pedágio.

Segundo Lu et. al (1997), quatro tecnologias AVI foram desenvolvidas e implementadas: óptica/infravermelho (código de barras), loop indutivo, de rádio frequência (RF) e por onda acústica de superfície (SAW).

A utilizada no Brasil opera através da emissão/interceptação de uma rádio frequência de 5,8 GHz emitida por uma antena localizada próximo à faixa dedicada a esse tipo de cobrança na praça de pedágio. Um *transponder* instalado no para-brisa do veículo é ativado e retorna para antena um sinal com a informação básica do número de identificação do veículo, que é transferido da antena da pista para uma base de dados central.

A transação completa ocorre quando os veículos percorrem a área de cobertura do sistema e passam pela abertura da cancela. O comprimento dessa área e a distância de comunicação são determinados pela sensibilidade do receptor, pelo tipo de antena, pelo local e pela potência transmitida. Usualmente essa distância não é maior que 40 m (SPASOVIC et al., 1995).

A velocidade de cobrança recomendada para operação de cobrança eletrônica no Brasil é de 40 km/h. Isso se dá pela localização próxima entre as faixas AVI e as cabines de cobrança manual, o que envolve o risco de acidentes, pois essa tecnologia possibilita o reconhecimento de veículos a velocidades superiores a 200 km/h.

Em diversos países, entre eles, Noruega, Portugal, Suécia, Inglaterra, Austrália, Chile, essa tecnologia tem sido empregada no conceito de *Passagem Livre*, ou no inglês, *Open Road Tolling* – ORT, na qual a identificação é feita com o veículo na velocidade normal de tráfego, ou seja, sem obstrução do fluxo de veículos, mais comumente chamado, *Free Flow*.

O sistema de *Passagem Livre* pelo pedágio, ou seja, sem interferência na velocidade de fluxo dos veículos, se apresenta como a forma mais eficiente do ponto de vista econômico e ambiental para a cobrança da tarifa. De acordo com Klodzinski et al. (2007), o próximo passo evolutivo a ser enfrentado na integração de sistemas ITS e cobrança de pedágio, é a utilização do conceito de ORT.

2.3 DINÂMICA VEICULAR

2.3.1 Introdução

A dinâmica veicular é a ciência que estuda a origem e os efeitos das forças que atuam no movimento dos veículos. Didaticamente, ela é dividida em três grandes áreas: dinâmica vertical, dinâmica lateral e dinâmica longitudinal.

Nesta dissertação, trataremos da dinâmica longitudinal, que estuda o desempenho do veículo na aceleração e frenagem, o que implica diretamente no consumo de combustível, e conseqüentemente nas emissões de poluentes.

Para análise do movimento dos veículos é utilizado um sistema de coordenadas ortogonal fixo no centro de gravidade, conforme convenção de eixos da SAE (GILLESPIE, 1992).

Figura 1 – Convenção de eixos SAE.

2.3.2 Determinação do CG

O posicionamento do centro de gravidade de um veículo é de grande importância para a caracterização de diversos parâmetros, tais como, limite de desempenho, condições operacionais, estabilidade, frenagem, etc.

Existem diversas maneiras de calcular a posição do centro de gravidade. Isso irá depender da necessidade da precisão do resultado e da fase em que se encontra o projeto do veículo.

Nas fases iniciais, quando as características fundamentais e as prioridades que justificam o projeto do veículo foram definidas, pode-se estimar a posição do centro de gravidade baseado na revisão da literatura especializada, ou seja, comparando com a posição de outros veículos semelhantes.

Já nesta primeira estimativa, na condição do veículo em “peso em ordem de marcha¹”, podem ser realizados estudos preliminares de desempenho, algumas condições operacionais, aspectos de estabilidade e frenagem, a fim de verificar o cumprimento das prioridades estabelecidas na carta de requisitos do projeto do veículo.

Numa fase mais adiantada do projeto, quando já se conhecem os principais componentes mecânicos do veículo e suas posições relativas, pode-se determinar a posição do centro de gravidade com uma maior expectativa de acerto. Canale (1991) faz esse demonstrativo para o veículo exemplo, um Jeep VTNE ¼ ton.

Num segundo momento, quando se tem o protótipo do veículo projetado, ou quando se está analisando um veículo existente, pode-se calcular o centro de gravidade através da pesagem do veículo em um plano horizontal e com um dos seus eixos levantados, como mostra Canale (1989).

O posicionamento do C.G. na longitudinal é calculado da seguinte maneira:

Figura 2– Posição do CG na longitudinal (CANALE, 1989).

¹ Peso do veículo completo com todos os equipamentos e fluidos necessários para o funcionamento normal.

Como W e L são conhecidos, W_r e W_f são medidos na balança, pode-se calcular L_f e L_r através fazendo somatório de momentos em torno dos pontos A e B:

$$L_f = (W_r * L) / W \quad (1)$$

$$L_r = (W_f * L) / W \quad (2)$$

Onde:

W = peso do veículo [N]

L = distância entre eixos do veículo [N]

W_f = peso no eixo dianteiro do veículo [N]

W_r = peso no eixo traseiro do veículo [N]

L_f = distância do CG em relação ao eixo dianteiro [m]

L_r = distância do CG em relação ao eixo traseiro [m]

De forma análoga é feito o cálculo para encontrar a posicionamento do CG na transversal. No caso de veículos combinados, pode-se também adotar estes procedimentos. Contudo, faz-se separadamente os cálculos para o cavalo mecânico e o semi reboque (POLITO, 2005).

A posição vertical do C.G pode ser calculada de diversas maneiras como mostra Polito (2005) e Canale (1989). Basicamente faz-se o levantamento de um dos eixos do veículo à uma altura conhecida, trava-se a suspensão e faz-se a medição do peso em balança.

Dessa maneira demonstrada, o veículo é considerado como uma massa concentrada nessa posição, o que é suficiente para análise de desempenho na aceleração e frenagem (GILLESPIE, 1992).

Entretanto, quando se trata da determinação do centro de gravidade de um veículo, a complexidade não reside somente em erros experimentais ou de estimativas de cálculo computacionais. A posição do centro de gravidade varia em função das inúmeras possibilidades de carregamento do veículo, podendo mudar significativamente os seus limites de desempenho, estabilidade, dirigibilidade, etc.

Para prever todas as possíveis localizações do CG, Canale (1991) utiliza a técnica do “passeio do centro de gravidade”, a fim de garantir a utilização segura do veículo dentro de quaisquer condições previstas pelo fabricante.

A Figura 3 ilustra o passeio do CG para o veículo Kadett GS 2.0. A região delimitada na figura pelas curvas apresenta as diversas possibilidades de localização do CG em função do carregamento. Os valores foram calculados observando as dimensões geométricas do veículo, os limites de carregamento de eixos e rodas e o limite de carga do veículo.

Figura 3— Passeio longitudinal do CG (CANALE, 2004)

O ponto destacado sobre a curva III é chamado de peso operacional, que é o peso em ordem de marcha mais um motorista de 75kgf.

2.3.3 Forças de Resistência ao Movimento do Veículo

As forças de resistência ao movimento do veículo descritas nesse trabalho são as que atuam no movimento do veículo em trajetória retilínea sem inclinação lateral. Segundo Schroeder (1962), essas forças podem ser classificadas em dois grupos: no primeiro, as forças que são funções da velocidade e, no segundo, as que são em função do traçado da estrada, podendo também variar com a velocidade.

O primeiro grupo engloba as forças de resistência ao rolamento, o arrasto do ar ou resistência aerodinâmica, as forças de inércia dos elementos girantes do sistema de transmissão. O segundo grupo engloba as forças devido à inclinação da pista, resistência dos túneis, resistência devido à força centrífuga nas curvas horizontais e verticais e ainda a resistência das ações giroscópicas devido à precessão das peças girantes nas curvas.

Força de Resistência ao Rolamento

A força de resistência ao rolamento tem origem nas deformações cíclicas sofridas pelo pneumático, provenientes das cargas que atuam nas rodas e do próprio movimento de rolamento. Essas deformações, por efeito de histerese do material e do atrito de escorregamento, fazem a transformação de parte da energia do movimento em energia térmica dissipada no pneumático. Essa energia perdida na forma de calor pode ser traduzida como uma força contrária ao movimento do veículo e recebe o nome de “força de resistência ao rolamento”.

Segundo Canale (1989), as principais fontes de resistência ao rolamento têm origem na deformação elástica do pneumático na região de contato com o solo e no escorregamento parcial entre pneu e pavimento

A força de resistência ao rolamento R_r pode ser determinada como:

$$R_r = f * W * \cos \emptyset \quad (3)$$

Onde $W * \cos \emptyset$ representa o peso do veículo na direção perpendicular ao pavimento e “ f ” é o coeficiente de resistência ao rolamento adimensional, que expressa o complexo fenômeno físico da interação entre pneumático e pavimento. Considerar todas as variáveis na determinação de “ f ” é tarefa bastante difícil. Navarro (1997) propõe uma metodologia prática para determinação desse coeficiente através de testes em pista.

Canale (1989) e Gillespie (1992) destacam alguns fatores que influenciam no coeficiente “ f ” e podem ser determinados:

- i. Temperatura do pneumático: o aumento da temperatura da borracha da banda de rodagem do pneumático faz com que ele se torne mais elástico, aumentando assim a aderência. Dessa maneira f decresce pois a diminuição do escorregamento parcial aumenta o rolamento do pneumático.
- ii. Pressão interna do pneumático: para solos moles, como areia, o aumento da pressão do pneumático resulta numa maior penetração no solo e numa área de contato de menor, portanto o coeficiente aumenta. Para solos duros, como o asfalto e o concreto, o aumento da pressão não recalca o pavimento, gerando uma diminuição no coeficiente, pois as deformações no pneumático são menores.
- iii. Raio do pneumático: o aumento do raio dos pneumáticos, principalmente em solos moles, reduz o coeficiente f .
- iv. Velocidade: o coeficiente f aumenta com o aumento da velocidade devido ao acréscimo do trabalho de flexão e vibração do pneumático. A influência da velocidade torna-se mais evidente quando combinada com uma baixa pressão interna do pneumático.
- v. Pavimento: para solos duros, lisos e secos observa-se um valor menor de f . O mau estado de conservação da rodovia, juntamente com a superfície molhada aumenta o valor de f .
- vi. Força de tração: maiores forças de tração ou frenagem aumentam o valor de f devido às maiores deformações e escorregamentos parciais nos pneumáticos.
- vii. Carga radial: as cargas radiais nos pneumáticos provocam maiores deformações ocasionando o aumento de f .

De acordo com Limpert (1992), o coeficiente de resistência ao rolamento adimensional “ f ” pode ser calculado da seguinte forma:

$$f = ka + \frac{0,15}{p} + \left(\frac{kb}{p}\right) + (v[mph]/100)^2 \quad (4)$$

Onde os valores ka e Kb dependem do tipo do pneumático.

$ka = 0,005$, $Kb = 0,67$, para pneus radiais;

$k_a = 0,009$, $K_b = 1$, para pneus diagonais; e
 p = pressão do pneumático [psi].

De acordo com Limpert (1989), pneus de caminhões geralmente têm um coeficiente de resistências ao rolamento aproximadamente 25% menor do que pneus de carros de passageiros.

Forças Aerodinâmicas

A força aerodinâmica ou arrasto aerodinâmico é a força exercida pelo ar quando o veículo está em movimento e sujeito a ventos laterais, frontais, que interferem na direção de seu movimento.

As forças aerodinâmicas dependem da velocidade do veículo, da direção e velocidade do vento local, do tamanho e da forma do veículo, da massa específica do ar, de detalhes da superfície do veículo como estado de conservação, espelhos, carenagem, entre outros.

O escoamento de ar num veículo pode ser visualizado na figura seguinte:

Figura 4 – Escoamento do ar no veículo (HEISLER, 2002).

A força devido à resistência do ar, ou arrasto aerodinâmico, R_a , é expressa pela equação:

$$Ra = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * C_D * A \quad (5)$$

Onde:

ρ = densidade do ar [kg/m³];

V = velocidade relativa do ar [m/s];

C_D = coeficiente de arrasto aerodinâmico [-]; e

A = Área frontal do veículo [m²]

Segundo Watanatada et al. (1987), a densidade do ar " ρ " em função da altitude " h " da rodovia, em comparação com o nível do mar pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 1,225 * (1 - 2,26 * 10^{-5} * h *)^{4,225} \quad (6)$$

De acordo com Canale (1989), a influência da densidade do ar deve ser considerada em cálculos de desempenho apurados. Nas simulações deste trabalho, adotou-se o valor de $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

O coeficiente de arrasto aerodinâmico depende da forma do veículo, da superfície de contato com o ar, da refrigeração e da circulação interna do ar. No quesito "eficiência aerodinâmica", freqüentemente utiliza-se o produto $A * C_D$, uma vez que em alguns casos aumenta-se a área frontal e a resistência Ra diminui, pois o valor de C_D foi reduzido.

A figura a seguir mostra algumas formas e os respectivos valores de C_D :

Figura 5 – Arrasto aerodinâmico (GILLESPIE, 1992).

Canale (1989) também apresenta alguns valores comumente utilizados na literatura:

Tabela 1 – Coeficiente de resistência do ar (CANALE, 1989).

Veículo	Valor de C_D
Carros passageiros	0,25 – 0,45
Conversíveis	0,60 – 0,70
Carros de corrida	0,20 – 0,30
Ônibus	0,60 – 0,70
Caminhão	0,80 – 1,00
Motocicleta	1,3

Usualmente se utiliza um defletor de ar no teto de caminhões comerciais. Essa prática reduz o valor da força de resistência aerodinâmica, aumenta a estabilidade e a dirigibilidade do veículo e diminui o consumo de combustível.

A figura a seguir ilustra a otimização do escoamento de ar causada pela utilização do defletor:

Figura 6 – Escoamento de ar otimizado pela utilização do defletor (HEISLER, 2002).

Forças devido à inclinação da pista

A força devido à inclinação da pista é a componente do peso que atua na direção do movimento do veículo e pode ser calculada como:

$$R_g = -W * \sin \theta \quad (7)$$

Com o veículo subindo a rampa, a força é negativa, portanto $0 < \theta < 90$; quando o veículo está descendo, a força é positiva, $-90 < \theta < 0$.

Usualmente a inclinação da pista é expressa em porcentagem. A equação faz essa relação é:

$$G = \frac{a}{b} * 100 = 100 * \tan(\theta) \quad (8)$$

Figura 7 – Força de resistência devido à inclinação da pista (CANALE, 1989).

Forças de inércias

O movimento de translação do veículo é resultado do movimento de rotação do sistema de geração e transmissão de torque ao solo. Isso inclui o motor, todo o sistema de transmissão e as rodas. Uma mudança na velocidade desses elementos rotativos gera o que é chamado de forças de inércias, ou, força de inércia dos elementos de rotação.

A partir do motor do veículo é gerado um torque que é decrescido da inércia rotacional de cada elemento rotativo do sistema de transmissão.

O torque decrescido para mudanças de rotação é:

$$T = I * \frac{dw}{dt} = I * \alpha \quad (9)$$

O modelo computacional utilizado nessa pesquisa leva em consideração os seguintes elementos rotativos:

- i. Inércia rotacional no motor
- ii. Inércia do câmbio
- iii. Inércia do eixo cardam
- iv. Inércia do diferencial
- v. Inércia rotativa das rodas

O equacionamento completo pode ser encontrado em Navarro (1997).

Freqüentemente essa força é expressa em termos de uma massa equivalente que considera o efeito das partes rotativas. Canale (1989) mostra como é definido o fator γ_b , que multiplicado pela massa do veículo expressa esse efeito de inércia das partes rotativas.

A força total de inércia de um veículo com aceleração “ α ” pode ser descrita como:

$$Ri = a * m * \gamma_b \quad (10)$$

O fator γ_b pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\gamma_b = 1 + \frac{1}{m} * \frac{I * \xi^2}{rm^2} \quad (11)$$

Onde:

γ_b = coeficiente das inércias rolantes [-];

m = massa do veículo [kg];

I = momento de inércia da massa rolante [kg.m²];

rm = raio da massa rolante [m]; e

ξ = relação de transmissão até roda [-].

A tabela a seguir ilustra alguns valores de γ_b para diferentes relações de redução e diferentes veículos:

Tabela 2– Valores normais de “ γ_b ” para veículos (CANALE, 1989).

Veículos	3ª Marcha	2ª Marcha	1ª Marcha
Carro passageiro (grande)	1,10	1,15	1,30
Carro passageiro (pequeno)	1,11	1,20	1,50
Caminhões	1,10	1,20	1,60

Forças de resistência do sistema de transmissão.

A resistência da transmissão representa a parcela de energia perdida no processo de transmissão do torque do eixo do motor até o eixo da roda. Cada elemento do sistema de transmissão, engrenagens, mancais, eixos, contribui com uma parcela para redução da eficiência.

Usualmente a resistência total do sistema é medida em termos dessa eficiência “ η ” total, frequentemente medida experimentalmente.

2.3.4 Força Propulsora do Veículo

Nos veículos automotores comerciais com câmbio manual e pneumáticos iguais nos eixos de tração, a força propulsora total F_{tot} é expressa segundo a equação:

$$F_{tot} = T_m * Red * Ren / r \quad (12)$$

Onde:

T_m = Torque no motor [N.m];

Red = Redução total do sistema de transmissão [];

Ren = Rendimento total do sistema de transmissão []; e

r = raio dinâmico do pneumático [m].

Os valores da potência efetiva do motor e do torque se relacionam através da rotação segundo a expressão:

$$P_t = T_m * n * 2 * \pi / (60 * 1000) \quad (13)$$

Os dados referentes ao torque e consumo específico são obtidos através de ensaios do motor do veículo em dinamômetro. Estes dados devem ser obtidos para várias cargas do motor em função da rotação. Dessa maneira constrói-se o que é chamado de “diagrama do motor mapeado”, onde temos uma tabela que expressa o torque e consumo específico em função da rotação e da posição do pedal do acelerador.

Usualmente se utiliza o BMEP – *Brake Mean Effective Pressure*, como padrão comparativo de desempenho entre os motores. O BMEP é a pressão média aplicada no

pistão, do ponto morto superior ao inferior, e se relaciona com o torque na saída do motor da seguinte forma:

$$Tms = \left(\frac{BMEP * N^o cil * cc}{882,599} \right) * 0,71264 \quad (14)$$

Onde:

Tms = torque na saída do motor [kgf.m];

BMEP = pressão média efetiva [bar];

$N^o cil$ = número de cilindros do motor []; e

cc = volume de cada cilindro do motor [cm³]

2.3.5 Análise das Forças

O modelo computacional utilizado nas simulações apresenta uma interface direta para aplicação de simulações de consumo de combustível para rotas definidas. Dessa maneira, a fim de compreensão da dinâmica longitudinal do veículo, e da metodologia de equacionamento do modelo, faz-se a descrição analítica da modelagem ideal da dinâmica do movimento acelerado em movimento retilíneo de um veículo comercial combinado 4x2 no cavalo mecânico e com três eixos no semi reboque.

Considera-se uma situação ideal no projeto do sistema de transmissão, aquela onde se consegue obter o máximo aproveitamento da força de tração propulsora proveniente do motor, ou seja, que todos os eixos tracionados utilizam o mesmo coeficiente de aderência entre pneumático e pavimento.

A análise das forças atuantes no veículo aqui realizada leva em conta as forças de resistência ao movimento, e tem o propósito de obter as forças normais atuantes nas rodas, a fim de avaliar se a força que o motor deve fornecer, é capaz de vencer as forças de resistência ao movimento e manter o veículo em movimento sem escorregar.

A Figura 8 mostra o veículo combinado analisado:

Figura 8 - Forças atuantes num cavalo + semireboque (NAVARRO, 1997).

No equacionamento divide-se o cavalo do semi reboque, faz-se o equilíbrio das forças em determinados pontos e obtêm-se as forças normais, os coeficientes de adesão utilizados e as forças de tração.

No caso ideal, o coeficiente de adesão utilizado é único (μ) por ser igual para todos os eixos, enquanto que para o caso real, em função do sistema de transmissão, os eixos podem utilizar coeficientes de adesão diferentes.

Para o semi-reboque:

$$\sum MB = 0, \quad Rret2 = fNet2 \quad (15)$$

$$Net2(ab + f * z5) - W2 * g * \cos \phi * cg2x - Ri2(cg2z - z5) - Rg2(cg2z - z5) + Riret2 * z5 = 0$$

$$\sum Fz = 0, \quad Net2 - W2 * g * \cos \phi + N5 = 0 \quad (16)$$

$$\sum MA = 0, \quad R5 * z5 - N5 * ab + W2 * g * \cos \phi (ab - cg2x) - Ri2 * cg2z - Rg2 * cg2z \quad (17)$$

Para o cavalo:

$$\sum MB = 0, \text{ e } AN5 = N5 \text{ e } AR5 = R5. \text{ Ra aplicado na posição do cg vertical} \quad (18)$$

$$W1 * g * \cos \emptyset (cd - cg1x) - Rg1 * cg1z - Ri1 * cg1z - Ra * cg1z - R5 * z5 + N5 * x5 - Ned1 * cd = 0$$

$$\sum MC = 0, \text{ e } AN5 = N5 \text{ e } AR5 = R5. \text{ Ra aplicado na posição do cg vertical} \quad (19)$$

$$Net1 * cd - N5(cd - x5) - R5 * z5 - Ri1 * cg1z - Rg1 * cg1z - W1 * g * \cos \emptyset * cg1z - Ra * cg1z = 0$$

$$\sum Fx = 0, \quad Rred1 = fNed1, \quad Rret1 = fNet1 \quad (20)$$

$$Fxed1 - fNed1 + Fxet1 - fNet1 - R5 - Rg1 - Ri1 - Ra = 0 ; \text{ onde:}$$

$$Fxed1 = Ted1 - Rired1 \text{ e } Fxet = Tet1 - Riret1$$

A equação 18 depende do caso de tração analisado. Como nosso veículo tem tração apenas no eixo traseiro, 4x2, temos que $Ted1 = 0$. Então a resultante que atua nas rodas dianteiras é relativa às inércias das rodas não motoras do eixo dianteiro do veículo.

Dessa maneira a força que atua no eixo traseiro do cavalo mecânico é:

$$Fxet1 = Tet1 - Riet1 = \mu * Net1 \quad (21)$$

Os valores das inércias das partes rotativas para o exemplo de um cavalo 4x2 é:

$$Rirem = Riret = (iwet1 + ite) * a \quad (22)$$

e:

$$Rirenm = Rired1 + Riret2 = (iwed1 + iwet2) * a \quad (23)$$

Os cálculos das forças de inércias das partes rotativas, das forças de inércia $Ri1$, $Ri2$, da força devido à inclinação da pista, da força de resistência aerodinâmica Ra e da força de resistência ao rolamento foram descritas na seção anterior.

A partir das equações acima, constrói-se um sistema de equação $AX = B$, em que a solução pode ser aproximada numericamente pelo método de eliminação de

Gauss com pivotamento parcial. Entretanto, podem ocorrer grandes erros de arredondamento quando os elementos da diagonal principal da matriz A são pequenos em relação aos elementos abaixo do pivô. Para evitar isso, pode-se realizar o pivotamento parcial fazendo com que cada elemento da diagonal principal seja maior em valor absoluto ou igual aos elementos abaixo do pivô.

Para o caso de um caminhão 4x2, o sistema $AX = B$ fica:

$$X = \begin{pmatrix} \text{Net2} \\ \text{N5} \\ \text{R5} \\ \text{Ned1} \\ \text{Net1} \\ \text{Fxet1} \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} ab + f \cdot z5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -ab & z5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x5 & -z5 & -cd & 0 & 0 \\ 0 & -cd + x5 & -z5 & 0 & cd & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -f & -f & 1 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} W2 \cdot g \cdot \cos \Theta \cdot cg2x + Ri2(cg2z - z5) + (-1)Rg2x(cg2z - z5) - Riret2 \cdot z5 \\ W2 \cdot g \cdot \cos \Theta \\ -W2 \cdot g \cdot \cos \Theta (ab - cg2x) + Ri2 \cdot cg2z + (-1)Rg2x \cdot cg2z \\ -W1 \cdot g \cdot \cos \Theta (cd - cg1x) + (-1)Rg1x \cdot cg1z + Ri1 \cdot cg1z + (-1)Rax \cdot cg1z \\ Ri1 \cdot cg1z + (-1)Rg1x \cdot cg1z + W1 \cdot g \cdot \cos \Theta \cdot cg1x + (-1)Rax \cdot cg1z \\ Rired1 + (-1)Rg1x + Ri1 + (-1)Rax \end{pmatrix}$$

As incógnitas do vetor X são:

Net2 = Força normal total nos eixos traseiros do veículo 2 [N];

N5 = Força normal na quinta roda [N];

R5 = Força tangencial na quinta roda [N];

Ned1 = Força normal no eixo dianteiro do veículo 1 [N];

Net1 = Força normal no eixo traseiro do veículo 1 [N]; e

Fxet1 = Força de tração disponível no eixo traseiro do veículo 1 [N].

Com as incógnitas do vetor X, calculam-se o coeficiente de adesão utilizado através da expressão: $\mu = F_{xet1}/Net1$, a força normal total através da expressão: $N_{tot} = N_{ed1} + Net1 + Net2$ e a força de tração total $F_{tot} = T_{et1} = F_{xet1} + R_{iret}$, a qual corresponde à força que o motor deve fornecer, isto é, a força de tração disponível no solo adicionada à energia necessária para vencer as inércias das partes rotativas do sistema de transmissão.

As forças de tração serão iguais a zero para os eixos sem tração e iguais a força de tração disponível no solo para os eixos tracionados. Dessa maneira, $F_{ed1} = 0$, $F_{et1} = F_{xet1}$, $F_{et2} = 0$ e $F_{ttot} = F_{ed1} + F_{et1} + F_{et2}$.

A porcentagem de distribuição das forças de tração fica: $\%F_{ed1} = 0$, $\%F_{et1} = 100$ e $\%F_{et2} = 0$; e a distribuição das forças normais fica: $\%N_{ed1} = N_{ed1} * 100 / N_{tot}$, $\%Net1 = Net1 * 100 / N_{tot}$ e $\%Net2 = Net2 * 100 / N_{tot}$.

Os calculos de F_{xet1} e $Net1$ são de extrema importância para avaliar se existe ou não escorregamento do pneumático. Para cálculos de desempenho, deve-se utilizar sempre o menor valor entre os coeficientes de atrito calculado e o permitido para cada tipo de pavimento.

2.4 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A discussão, no que tange à questão do consumo de combustível, pode ser analisada por dois vieses de extrema importância. Do ponto de vista econômico, o alto custo do petróleo e seus derivados tem impactado diversos desequilíbrios na economia mundial, com reflexos que extrapolam os custos com fins comerciais dos veículos e com o transporte de mercadorias e pessoas, sendo este o motivo de recentes guerras entre as grandes potências mundiais. Do ponto de vista ambiental, o consumo de combustível acarreta uma degradação do meio ambiente, tanto devido às emissões lançadas na atmosfera devido à combustão, quanto a necessidade crescente de encontrar fontes alternativas, visto que o petróleo é finito.

Ou seja, racionalizar e reduzir o consumo, através de melhorias de projetos de engenharia e otimização do tráfego, e também através de atitudes pessoais, se mostram como medidas de caráter indubitável (IPEA, 1998).

Para tanto, as simulações envolvendo consumo de combustível veicular devem fornecer boa acuracidade nos cálculos. Para isso é essencial utilizar a potência do motor com as diversas cargas.

Dessa maneira o cálculo do consumo de combustível do veículo é determinado através do mapa de consumo específico de combustível do motor, ou “diagrama do motor mapeado”, onde se tem uma tabela que expressa consumo específico em função da rotação e da posição do pedal do acelerador.

As figuras a seguir ilustram o mapa de consumo de combustível de dois motores:

Figura 9 – Mapa de consumo de combustível do motor de um caminhão.

Figura 10 – Mapa de consumo de combustível do motor de uma caminhonete.

A seção seguinte demonstra como é feito o cálculo do consumo de combustível de um veículo à velocidade constante.

2.4.1 Consumo de Combustível à Velocidade Constante

Na determinação do consumo de combustível feita nesta seção, como a utilizada pelo programa de simulação desta dissertação, são consideradas tanto características operacionais dos veículos, como tipo de pavimento, carga transportada, quanto características construtivas como: motor, transmissão, aerodinâmica, pneumático, etc.

O estado de “velocidade constante” de um corpo ou sistema é dito quando este se encontra em equilíbrio mecânico, ou seja, quando a resultante das forças atuantes nesse corpo é nula. Neste caso, a força necessária para manter o veículo em velocidade constante é igual às forças dissipadas na resistência ao movimento (CANALE et al. 1997).

Dessa maneira podemos escrever a seguinte equação:

$$F_{tot}(v) - F_{rtot}(v) = (\gamma * m * \ddot{x}) \quad (24)$$

Onde o termo representado por $(\gamma * m * \ddot{x}) = 0$, pois a aceleração é zero:

γ = coeficiente que expressa o efeito das inércias das partes rotativas do veículo para determinada marcha engrenada [];

m = massa do veículo [kg]; e

$\ddot{x}$ = aceleração do veículo [m/s^2].

$F_{tot}(v)$ é a força propulsora total do veículo expressa por:

$$F_{tot}(v) = T_m * Red * Ren / r \quad (25)$$

Onde:

T_m = Torque no motor [N.m];

Red = Redução total do sistema de transmissão [];

Ren = Rendimento total do sistema de transmissão []; e

r = raio dinâmico [m].

$F_{rtot}(v)$ expressa a força de resistência ao movimento total atuante no veículo e pode ser expressa como:

$$F_{rtot}(v) = R_{ax}(v) + f(v) * W * g * \cos \phi + R_{gx}(W, \phi) \quad (26)$$

Onde:

$R_{ax}(v)$ = força de resistência aerodinâmica [N];

$f(v)$ = coeficiente de resistência ao rolamento []

W = peso do veículo [kg];

g = gravidade [m/s^2];

ϕ = inclinação da pista [$^\circ$]; e

$R_{gx}(W, \phi)$ = força de resistência devido à inclinação da pista [N].

As forças de resistência do ar e devido à inclinação da pista podem ser calculadas como mostrado nas seções anteriores.

A velocidade do veículo pode ser expressa segundo equação:

$$v = \frac{n * r * 3,6 * 2 * \pi}{60 * Red} \quad (27)$$

Onde:

n = rotação do motor [rpm];

r = raio dinâmico [m]; e

Red = redução total do sistema de transmissão [].

Com o veículo trafegando em velocidade constante temos que $F_{tot}(v) = F_{rtot}(v)$, ou seja, tanto a potência disponível, quanto a gasta, são iguais, pois a potência fornecida pelo motor é dissipada nas perdas do sistema de transmissão e para vencer as forças resistivas.

Utilizando as equações (13), (25), e (27) podemos expressar a potência do motor em função da força de tração total e da velocidade:

$$P_t = P_t(v) = \left(\frac{F_{tot}(v) * v}{3,6 * 1000 * Ren} \right) \quad (28)$$

Com o valor da potência gasta, faz-se a interpolação no diagrama do motor mapeado, determinando o consumo específico.

Para cada velocidade “ v ” e rotação “ n ”, deve existir um valor de P_t no mapa de consumo específico de combustível tal que mantenha o veículo nessa respectiva velocidade. Do contrário, se o valor de P_t for maior que a carga máxima (100% de utilização do pedal do acelerador), o veículo será desacelerado.

Pode-se então determinar curvas de consumo de consumo específico de combustível bs [g/kWh] constante em função da velocidade, expressos pela equação:

$$B \left(\frac{l}{100km} \right) = bs * P_t(v) * 100 / (\rho * v) \quad (29)$$

2.5 O MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional utilizado para prever o consumo de combustível desta dissertação foi construído na plataforma Matlab/Simulink, desenvolvido no Laboratório Computacional de Veículos – LCV do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos.

Diversas pesquisas ao longo dos anos se utilizaram e contribuíram para o aperfeiçoamento do modelo. Podem ser citados alguns autores como: Canale (1991), Navarro (1997), Gutiérrez (2005), Polito (2005), Gardinalli (2005), Depetris (2005) e Gioria (2008).

Recentemente, Diniz (2009) fez a validação do modelo em sua tese: *“Desenvolvimento e Validação de um Software para Simulação de Consumo de Combustível Veicular”*, onde conseguiu reproduzir no software o consumo de combustível de um veículo numa rota conhecida.

O modelo simulador leva em conta os seguintes sistemas do veículo: motor mapeado, histograma de torque, transmissão, freio + ALB (válvula sensível à carga), G (inclinação da pista), direção, pneus e retardador.

As duas figuras seguintes mostram respectivamente, a tela principal do programa, Figura 11, onde pode ser visto algumas entradas e saídas de uma simulação preliminar, e em seguida, Figura 12, o bloco denominado *“Sistemas”*, aberto, mostrando os sistemas considerados no programa de simulação.

Figura 11 – Tela Principal do programa simulador

Figura 12– Sistemas considerados no simulador (CANALE, 2009).

Além da dinâmica veicular longitudinal destacada nas seções anteriores, consta nessa dissertação a descrição dos sistemas “motor mapeado” e “transmissão”, que merecem maior destaque nas simulações de consumo de combustível.

O bloco “*motor mapeado*” da Figura 12 contém as curvas de desempenho do motor obtidas em dinamômetro e fornecidas pelo fabricante. O motor foi mapeado em torque (BMEP) e em consumo específico para várias cargas, como destacado anteriormente.

Para representar o motor na simulação utiliza-se a ferramenta do Matlab/Simulink chamada “*Lookup Table (n-D)*”, que faz uma interpolação linear durante a simulação para os valores de torque e consumo específico quando estes se encontram em pontos intermediários aos obtidos no ensaio do motor em dinamômetro.

As figuras seguintes mostram respectivamente o “*torque x rpm*”, e o “*consumo específico x rpm*”, introduzidos nas tabelas do Lookup Table.

Figura 13 – Motor mapeado relacionando carga, rotação e torque (CANALE, 2009).

Figura 14 – Motor mapeado relacionando carga, rotação e consumo específico (CANALE, 2009).

O sistema “*Transmissão*” contém a caixa de mudanças de marcha e o diferencial do veículo utilizado nas simulações. Aqui são consideradas as inércias dos elementos rotativos da transmissão e do motor, que tem efeitos significativos na aceleração e consumo de combustível. Um desses elementos mais significativos é o volante do motor.

Dentro do sistema foi desenvolvido um bloco lógico para troca automática de marchas durante a simulação. A lógica situa durante a simulação a rotação do motor dentro de limites indicados por variáveis controladas externamente, denominadas no “*workspace*” (área de trabalho) do Matlab como: “*max_rpm*” e “*mim_rpm*”.

As relações de transmissão das marchas e do diferencial, bem como suas respectivas eficiências também são parâmetros especificados no sistema “*Transmissão*”. Dessa maneira, pode-se simular o veículo trafegando em um percurso conhecido, se utilizando de diferentes caixas de transmissões, diferenciais, e estratégias de mudança de marcha, o que como mostra Diniz (2009), afeta diretamente o desempenho e o consumo de combustível dos veículos.

A Figura 15 a seguir mostra a posição do bloco lógico dentro do sistema “*Transmissão*”, e em seguida, a Figura 16 mostra as trocas de marchas controladas pelo bloco “*lógica_marchas*” durante a simulação de um caminhão de três eixos percorrendo a praça de pedágio.

Figura 15 – Bloco “*logica_marchas*” e controlador PID.

Figura 16 – Troca de marchas efetuadas pelo bloco lógico.

Além do bloco lógico de marchas mostrado na Figura 15, podemos ver o bloco PID. O controlador proporcional, integral e derivativo, atua controlando o acelerador e o freio do veículo. O PID ativa o acelerador ou o freio do veículo para que a velocidade e a posição do veículo simulado sejam as mesmas da condição real, obtida através de um GPS instalado no veículo em pista.

A Figura 17 e a Figura 18 mostram respectivamente a ação do controlador PID na aceleração e na frenagem durante a simulação, a fim de convergir à velocidade simulada com a velocidade real.

Dessa maneira, pode-se assim dizer, que o bloco “*lógica_marchas*”, junto com o controlador PID, representam o papel do motorista no programa de simulação.

Figura 17 - Acionamento percentual do acelerador controlado pelo PID durante a simulação.

Figura 18 - Pressão no freio dianteiro com o veículo vazio controlada pelo PID.

2.6 EMISSÃO DE POLUENTES

As questões ambientais são um dos principais assuntos em pauta hoje nas discussões mundiais. A comunidade científica, junto a órgãos governamentais, tem promovido diversos debates acerca das consequências das atividades humanas nas mudanças climáticas do planeta. Esta discussão envolve, entre outras questões, o estudo do comportamento do sistema climático e as variáveis que o influenciam, e ainda, discussões das incertezas e dúvidas a respeito do aquecimento global devido às emissões antrópicas de gases de efeito estufa.

A importância da questão extrapola os limites dos problemas ambientais e tangem questões que discutem o modo de vida da sociedade atual como argumenta Mattos (2001)

Como a escala do problema é global, e, dessa discussão fazem parte tanto os países industrializados quanto os em desenvolvimento, essa tem sido uma oportunidade ímpar para os países colocarem em debate os atuais padrões de consumo e desenvolvimento, os possíveis caminhos para atingir-se o desenvolvimento sustentável e as diferenças econômicas e sociais existentes entre as nações e até mesmo dentro das próprias nações. Como resultado desse debate procura-se, então, atribuir responsabilidades aos países e metas de redução nas emissões de gases de efeito estufa as quais os mesmos devem atingir e novos padrões de consumo que devem ser adotados.²

O aquecimento global pode ser definido como o aumento potencial na temperatura média global resultante do aumento da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera. O aumento da concentração dos gases de efeito estufa é relacionado à emissão antropogênica³, por exemplo, à queima dos combustíveis

---

² MATTOS, L.B.R. (2001). A importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa – O Caso do Município do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001, p. 1.

³ A emissão antropogênica ou antrópica de gases de efeito estufa é definida como a emissão resultante das atividades humanas que aumentam a concentração destes gases na atmosfera terrestre.

fósseis como o carvão, o gás natural e o petróleo, à combustão da biomassa das florestas, o desmatamento, entre outras causas.

O principal gás do efeito estufa, o dióxido de carbono, CO₂, tem como sua principal origem a queima de combustíveis fósseis. Dentre os setores que consomem esses combustíveis, o setor de transportes foi responsável pelo consumo de 50,7% do total de derivados do petróleo, sendo o modo rodoviário responsável por 91% do consumo total (BRASIL, 2007).

Mais grave se mostra a situação do setor de transporte quando se analisa a qualidade do ar em escala local, como numa cidade por exemplo. Como mostra a tabela de contribuição relativa das fontes de poluição do ar da Região Metropolitana de São Paulo, a contribuição de poluentes provinda de emissões veiculares corresponde por 97% das emissões de CO, 97% de HC, 96% de NO_x, 40% de Material Particulado e 32% de SO_x.

Tabela 3 – Contribuição relativa de fontes de poluição do ar (CETESB, 2008).

FONTE DE EMISSÃO		POLUENTES				
		CO	HC	NO _x	SO _x	MP
Tubo de Escapamento de Veículos	Gasolina C	42,69	17,87	12,40	15,48	9,49
	Álcool	12,68	5,89	3,82	-	-
	Diesel	24,97	15,83	78,45	15,08	28,48
	Táxi	0,12	0,27	0,59	-	-
	Motocicleta e Similares	17,03	9,28	0,76	1,59	2,02
Cárter e Evaporativa	Gasolina C	-	31,32	-	-	-
	Álcool	-	4,59	-	-	-
	Motocicleta e Similares	-	7,61	-	-	-
Operações de Transferência de Combustível	Gasolina C	-	3,63	-	-	-
	Álcool	-	0,53	-	-	-
Operação de Processo Industrial		2,51	3,18	3,96	7,86	10,00
Suspensão de Partículas		-	-	-	-	25,00
Aerossóis Secundários		-	-	-	-	25,00
Total		100%	100%	100%	100%	100%

De acordo com a tabela, pode-se concluir que as principais fontes de poluição do ar na Região Metropolitana de São Paulo são os veículos automotores, seguido pelos processos industriais, movimentação e estocagem de combustíveis, etc.

A poluição atmosférica acarreta problemas de saúde em um grande número de pessoas, principalmente crianças, idosos e doentes com problemas pulmonares e cardíacos, causando um prejuízo imensurável para o mercado de trabalho e à vida, já que poucas vezes consegue-se estabelecer a relação direta entre poluição veicular e saúde/economia da cidade (MATTOS, 2001).

A situação tende ainda a agravar-se, já que o setor é, entre as fontes de emissão de gases de efeito estufa, a que cresce mais rapidamente, muitas vezes em uma taxa superior à do produto interno bruto dos países em desenvolvimento (SCHIPPER; MARIE-LILLIU, 1999).

Esta pesquisa faz uma avaliação das emissões veiculares oriundas da necessidade da desaceleração causada pela instalação das cabines de pedágio. O método utilizado, “*Top Down*”, proposto pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC e recomendada pelo Ministério de Minas e Energia – MME, se restringe em analisar as emissões de CO₂, uma vez que este é responsável por 97% das emissões totais de GEE, e a maior parte dos outros gases da combustão (CO, HC) sofre oxidação. Foram desconsideradas também as emissões referentes ao NO_x e CH₄, tal como adotado por Álvares e Linke (2003).

A seguir é apresentada a metodologia padronizada *Top Down* utilizada para cálculo das emissões de GEE (ÁLVARES e LINKE, 2003; MATTOS, 2001).

2.6.1 Método *Top Down*

Primeiramente o método prevê a conversão de todas as medidas de consumo de combustível para uma unidade comum de energia:

$$CC = CA * Fconv * 45,2 * 10^{-3} * Fcorr \quad (30)$$

Onde:

CC = consumo de energia [TJ];

CA = consumo de combustível [m³]

$$45,2 \times 10^{-3} \text{ TJ} = 1 \text{ tEP(Brasil)}$$

F_{conv} = Fator de Conversão (tEP/Unidade Física) da Unidade Física para tEP médio em PCS; e

F_{corr} = fator de correção de Poder Calorífico Superior (PCS), para Poder Calorífico Inferior (PCI).

Os valores do fator de conversão “ F_{conv} ” podem variar de ano para ano, de acordo com a publicação anual do BEN. A tabela abaixo informa os valores para o ano 2000.

Tabela 4 – Valores do fator de conversão (MATTOS, 2001).

COMBUSTÍVEL	F_{conv} (tEP/m ³)
Gasolina	0,771
Álcool Anidro	0,520
Álcool Hidratado	0,496
Diesel	0,848
Gás Natural Seco	0,857

No BEN, o conteúdo energético tem como base o PCS, mas para o IPCC, a conversão para unidade comum de energia deve ser feita pela multiplicação do consumo pelo PCI. Por isso deve-se utilizar o fator de correção F_{corr} que vale 0,95 para combustíveis sólidos e líquidos e 0,90 para combustíveis gasosos.

Em seguida, faz-se a conversão do valor de energia consumido em quantidade de carbono emitida na queima do combustível:

$$QC = CC * Femiss * 10^{-3} \quad (31)$$

Onde:

QC = conteúdo de carbono expresso em giga gramas de carbono [GgC];

CC = consumo de energia [TJ];

$Femiss$ = fator de emissão de carbono [tC/TJ]; e

$$10^{-3} = \text{tC/GgC}$$

Os valores do fator de emissão “*Femiss*” emitidos pelo IPCC, 1996 e MCT, 1999 se encontram na tabela seguinte:

Tabela 5 – Valores do fator de emissão (MATTOS, 2001).

COMBUSTÍVEL	Femiss (tC/TJ)
Gasolina	18,90
Álcool Anidro	14,81
Álcool Hidratado	14,81
Diesel	20,20
Gás Natural Seco	15,30

Por fim as emissões de CO₂ podem ser calculadas levando em consideração os respectivos pesos moleculares através da expressão:

$$ECO_2 = EC * 44/12 \quad (32)$$

Onde:

ECO₂ = emissão de CO₂ [GgCO₂];

EC = emissão de C [GgC];

Peso molecular CO₂ = 44 kg/mol; e

Peso molecular C = 12 kg/mol

A seguir é mostrado a equação estequiométrica para combustão completa do diesel, bem como as relações de CO₂ e H₂O produzidas para cada kg ou litro de combustível queimado:

Massa de diesel queimada = 13*MM_C + 28*MM_H = 13*12 + 28*1 = 184 kg.

Massa de CO₂ produzida = 13*(MM_C + MM_{O₂}) = 13*44 = 572 kg.

Massa de H₂O produzida = 14*(MM_{H₂} + MM_O) = 14*18 = 252 kg.

Considerando a densidade do diesel igual a 0,85 g/ml, temos:

$$\frac{\text{Massa de CO}_2}{\text{kg de diesel}} = \frac{572}{184} = 3,10 \quad ; \quad \frac{\text{Massa de CO}_2}{\text{litro de diesel}} = 3,1 * 0,85 = 2,64$$
$$\frac{\text{Massa de H}_2\text{O}}{\text{kg de diesel}} = \frac{252}{184} = 1,37 \quad ; \quad \frac{\text{Massa de H}_2\text{O}}{\text{litro de diesel}} = 1,37 * 0,85 = 1,16$$

3 METODOLOGIA

Esse capítulo consiste na descrição da metodologia utilizada para aquisição de dados para o estudo do impacto do pedágio. Inicia-se com uma descrição da praça de pedágio escolhida para realização dos testes. Em seguida mostra-se como foi realizado o estudo estatístico e os testes em pistas, que são as fontes de dados essenciais para alcançar os objetivos do estudo. Por fim, descreve-se a metodologia utilizada nas simulações computacionais para obter o consumo de combustível dos caminhões, e as considerações para cálculo das emissões de CO₂.

3.1 PRAÇA DE PEDÁGIO

A praça de pedágio escolhida para estudo foi o Pedágio Jacareí, localizado na Rodovia Presidente Dutra – Km 165, operada pela concessionária NovaDutra. A escolha da praça de pedágio de Jacareí se deu em função de sua localização e importância no cenário do transporte rodoviário brasileiro. A Rodovia Presidente Dutra cruza uma das regiões mais ricas do país e liga duas das principais metrópoles, Rio de Janeiro e São Paulo.

O mapa da Figura 19 a seguir ilustra a localização da praça de pedágio na rodovia.

Figura 19 – Mapa da rodovia Presidente Dutra.

O pedágio Jacareí é caracterizado por intensa movimentação durante todo o dia, com destaque para o elevado número de caminhões que fazem a distribuição de mercadorias produzidas nessas metrópoles e distribuídas por todo o país. O fluxo é intenso principalmente nos períodos do início da manhã e no final da tarde. A cobrança da tarifa do pedágio é realizada em duplo sentido.

A tabela seguinte mostra o fluxo total de veículos na região dividido pelo tipo de cobrança.

Tabela 6 – Fluxo na praça de pedágio Jacareí no ano de 2008.

TIPO DE COBRANÇA	FLUXO DE VEÍCULOS
Manual	11.462.080
Eletrônica	6.793.790
Total	18.255.870

A praça de pedágio, sitiada a 165 km de São Paulo, apresenta variação topográfica relevante com inclinação média $G = 2,5\%$ e comprimento aproximado de 640m.

A figura seguinte representa a variação da altitude em função da distância mapeada em GPS de uma parte da Rodovia Presidente Dutra. Nele estão indicadas as posições de início e fim da praça de pedágio.

Figura 20 - Distância Mapeada x Altitude.

Entende-se por “praça de pedágio” nessa pesquisa toda a região de interferência no fluxo dos veículos causada pela instalação das cabines de cobrança. Essa região foi definida pelos pontos de alargamento e estreitamento da pista, como pode ser visto na foto aérea do Pedágio Jacareí mostrada abaixo.

Figura 21 - Foto aérea da Praça de Pedágio Jacareí, Rodovia Presidente Dutra, Km – 165.

Considerou-se que a velocidade de fluxo dos veículos fora dos limites da praça de pedágio é a velocidade limite estabelecida.

3.2 ESTUDO DO TEMPO NA PRAÇA

Foram realizados dois estudos de campo envolvendo coleta de dados na praça de pedágio. O primeiro, denominado “TC – Tempo de Atendimento na Cabine”, corresponde ao tempo médio necessário para que os veículos efetuem o pagamento da tarifa na cabine manual de cobrança. Esse tempo “TC” corresponde ao consumo de combustível em marcha lenta dos veículos enquanto efetuam o pagamento da tarifa. O segundo estudo, denominado “TP – Tempo na Praça”, avalia o tempo médio necessário para os veículos cruzarem a região da praça de pedágio com interferência no fluxo de velocidade dos veículos definida nesta pesquisa. Neste grupo, foram coletadas amostras para os veículos cruzando a praça ora passando pela cabine manual, ora pela cabine eletrônica, onde a cobrança é feita pela identificação automática do veículo – AVI.

A coleta de dados foi realizada entre os dias de 14 e 17 de abril de 2008, no período das 08:00h às 17:00h. Foram adquiridas um total de 1028 amostras. Acredita-se que o período de coleta de dados representou bem o fluxo na região no que diz respeito à maior parte do ano, já que não houve qualquer incidente do tipo: acidentes de trânsito próximo a praça, eventos sazonais e ou esporádicos, etc., que descaracterizassem o fluxo na região.

Para obtenção dos dados referentes ao tempo de atendimento na cabine foi utilizado um cronômetro. Definiu-se como tempo de atendimento na cabine “TC” o período de tempo que o veículo ficava parado em frente à cabine de cobrança para realização do pagamento da tarifa. Os resultados foram obtidos calculando-se a média simples e então comparados com valores de Araújo (2001).

A revisão da literatura nos mostra a influência de diversos parâmetros utilizados na caracterização das praças de pedágio que interferem diretamente na qualidade do nível de serviço prestado, e conseqüentemente, no tempo de espera do usuário. Araújo (2001) mostra que existe variação do tempo de atendimento na cabine em função dos seguintes parâmetros:

- I. EFEITO DAS CLASSES VEICULARES: automóveis tem tempo de atendimento menor que caminhões e ônibus em função do baixo poder de aceleração desses veículos e da dificuldade na transação gerada devido à altura dos caminhões e ônibus;
- II. EFEITO DO VALOR DA TARIFA: a cobrança da tarifa inteira, por exemplo, R\$ 5,00, leva a redução do tempo de cobrança devido ao fato de agilizar o atendimento e a verificação do troco;
- III. EFEITO DO FLUXO DE TRÁFEGO: o aumento do fluxo de tráfego reduz o tempo de atendimento, pois os operadores das cabines se sentem pressionados pela fila crescente e executam a transação com maior rapidez. Além disso, os usuários dispõem de mais tempo para disponibilizar uma quantia tal que minimize seu tempo de atendimento;
- IV. EFEITO DO TIPO DE USUÁRIO: os usuários que viajam diariamente, chamados de “*commuters*”, procuram reduzir o seu tempo de viagem, e apresentam tempos de atendimentos inferiores do que aqueles que viajam esporadicamente, popularmente chamados de “*domingueiros*”;

- V. EFEITO DA FORMA DE PAGAMENTO: a utilização de diferentes formas de pagamento, dinheiro, cupom, cartão de crédito, ou ainda outras específicas de cada concessionária, interfere no tempo de atendimento.

Os valores médios do tempo de atendimento para diferentes praças de pedágio estudadas por Araújo (2001) são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 7 – Tempo de atendimento em segundos para diferentes praças de pedágio (ARAÚJO, 2001).

PRAÇA	CLASSE VEICULAR		
	Automóveis	Caminhões	Ônibus
Araraquara	22,28	34,66	25,74
Campo Limpo	18,81	25,82	25,65
Limeira	18,61	31,41	26,14
Nova Odessa	18,61	32,14	24,76
Sertãozinho	13,29	22,64	15,69

A tabela seguinte mostra valores encontrados em diversos estudos sobre a capacidade de atendimento das cabines de pedágio em função dos diversos tipos de cobrança:

Tabela 8 – Capacidade de atendimento para diversos tipos de cobrança em veic/h (ARAÚJO, 2001).

ESTUDOS	TIPO DE CABINE				
	Manual	Automática	Mista	Eletrônica Exclusiva	Eletrônica Expressa
Woo e Hoel [1991]	-	665 – 745	-	-	-
Pietrzyk e Mierzejewski [1993]	350	500	700	1200	1800
Lin e Su [1994]	360	775	-	-	-
Pesquera et al. [1997]	225	475	-	-	-
Pollus e Reshetnik [1997]	250 - 450	550 - 850	-	1200	-

Foi efetuada a coleta de dados de usuários que efetuaram o pagamento em dinheiro, e desconsiderados as outras formas de pagamento. Durante a análise dos dados foram descartados valores encontrados com tempos superiores a 60 segundos, já que essas amostras, menos de 1% do total, representam casos excepcionais como por exemplo a ocorrência de falhas mecânicas que impediam a partida do veículo. Os resultados encontrados e alguns parâmetros estatísticos do tempo de atendimento na cabine “TC” são mostrados no capítulo dos resultados na Tabela 17.

O segundo estudo, referente ao tempo na praça “TP” dos veículos, tem por objetivo comparar o tempo médio gasto para cruzar a praça de pedágio em estudo utilizando-se dos dois tipos de cobranças possíveis: manual e eletrônica.

Para isso foram coletadas amostras do tempo necessário para cruzar a região de interferência no fluxo de veículos demonstrada na Figura 21. Utilizou-se um par de cronômetros e um par de rádios para comunicação entre os observadores. As coordenadas dos pontos fixados como início e fim da área de interferência, estabelecidas por um GPS, se localizavam no início do alargamento da pista e no fim do estreitamento, após as cabines de cobrança. Quando um veículo entrava no garrafão do pedágio, eram disparados os dois cronômetros. A identificação do veículo, bem como o tipo de cobrança, manual ou eletrônica, era feita por rádio. Quando o veículo deixava a praça de pedágio os cronômetros dos dois observadores eram finalizados. Foram utilizados os valores médios obtidos entre as marcações dos dois observadores, que se diferiram muito pouco, da ordem de 2%. As amostras foram coletadas igualmente nas duas direções, norte e sul, a fim de sanar os efeitos de variação da altitude da praça.

Para verificação do efeito do tipo de cobrança, manual ou eletrônica, no tempo necessário para cruzar a praça foi utilizado o software estatístico Minitab 15 (versão gratuita). A diferença foi obtida aplicando o teste de hipóteses pareado. No caso, buscou-se testar (rejeitar) a hipótese nula de que o tempo médio de passagem na praça é igual nos dois casos. A hipótese alternativa testada foi de que os valores médios observados para aqueles que utilizam a cabine manual é superior àqueles que utilizam da cabine eletrônica.

3.3 TESTES EM PISTA

Os testes em pista são as fontes de dados necessárias para se compreender como é o perfil de velocidade dos veículos cruzando a praça de pedágio. Esses dados são utilizados pelo programa computacional para simular o veículo fazendo este percurso.

O objetivo da pesquisa é avaliar o consumo de combustível de caminhões, já que estes transportam cargas pesadas e apresentam maior consumo de combustível quando comparados com automóveis. Dessa maneira, o procedimento do teste consistiu no monitoramento da velocidade e posição de diferentes caminhões durante o percurso do pagamento da tarifa, ora passando pela cabine manual de atendimento, ora passando pela automática.

Para isso foi utilizado um GPS da marca Racelogic, que forneceu vetores de posição e velocidade dos caminhões, entre outras informações. A precisão do equipamento é de 0,1 km/h na velocidade medida e menor do que 50 cm/km na distância percorrida. A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 20 Hz.

A figura a seguir mostra uma foto do equipamento utilizado.

Figura 22 – Velocity Box – VBOX.

Foram monitorados caminhões de três diferentes categorias. A Figura 23 mostra a fotos de dois desses caminhões e a Tabela 9 indica a categoria pertencida e a o peso bruto total – PBT dos veículos durante os testes:

Figura 23 - Foto dos caminhões utilizados nos testes em pista.

Tabela 9 - Informações dos caminhões utilizados nos testes.

MODELO	CATEGORIA	PBT (ton)
Mercedes 1721	CAT 03	23,0
Mercedes 2035	CAT 05	41,0
Volvo FH	CAT 09	74,0

A praça de pedágio Jacareí opera com cobrança em sentido duplo. Os testes foram realizados no sentido sul, Rio => São Paulo. A título de exemplificação, mostra-se a seguir os gráficos da Figura 24 e da Figura 25 construídos a partir de teste:

O gráfico da Figura 24 mostra o perfil de velocidade em função da distância percorrida do teste realizado com o caminhão CAT 05. A curva referente à “Cabine Manual” mostra o caminhão partindo da velocidade de 76,5 km/h, reduzindo à velocidade até zero, quando efetua o pagamento da tarifa nas cabines manuais de atendimento, e em seguida, retomando sua velocidade de curso. A curva “Cabine Eletrônica” mostra o caminhão partindo da velocidade de 80 km/h, reduzindo até aproximadamente 34 km/h, quando a cobrança da tarifa é feita através da identificação eletrônica – AVI, e por fim, acelerando num processo de retomada da velocidade de curso.

Figura 24 - Distância x Velocidade – Comparação – CAT 05.

Figura 25 - Tempo x Velocidade – Comparação – CAT 05.

A região delimitada pelo retângulo verde contém a área da praça de pedágio. Este gráfico evidencia as mudanças de marcha efetuadas pelo motorista durante a aceleração do caminhão, representadas pelos pequenos “dentes”. Observe que o veículo alcançou a 8ª marcha próximo da velocidade de 60 km/h.

A Figura 25 ilustra o mesmo teste, porém apresentado num gráfico de “Velocidade x Tempo”. A curva “Cabine Manual” então mostra o tempo necessário para o caminhão efetuar o pagamento da tarifa nas cabines de cobrança. A diferença dos tempos finais de cada uma das curvas mostra a redução do tempo na praça, “ ΔTP ”, para o caminhão do teste.

Os gráficos a seguir mostram os outros testes em pistas, sobrepostos, a fim de analisar a semelhança entre os perfis de velocidade separados por categorias de caminhões. O gráfico da Figura 26 mostra a cobrança da tarifa na cabine manual, e o gráfico da Figura 27 mostra a cobrança efetuada na cabine eletrônica.

Figura 26 – Testes em pista – Cabine Manual.

Figura 27 – Testes em pista – Cabine Eletrônica.

A revisão da literatura indica algumas pesquisas que têm sido feitas sobre a modelagem do comportamento da desaceleração e aceleração dos motoristas. Essas pesquisas se dividem em quatro áreas distintas: modelos constantes, modelos linearmente decrescentes, modelos polinomiais e modelos baseados nas potências dos veículos (BENNETT e DUNN, 1995).

Entretanto, devido à complexidade da construção desses modelos, principalmente devido à carência de dados, e o elevado custo dos testes, já que os caminhões eram emprestados por transportadoras, optou-se por construir um “Perfil Médio” a partir dos dados empíricos, que representasse a aceleração e desaceleração de caminhões cruzando a praça de pedágio Jacareí.

Ao que se sobrepõe ao relativo baixo número de testes realizado, pode-se destacar a semelhança entre os perfis de desaceleração e aceleração vistas no gráfico da Figura 26, para todas as categorias de caminhões, inclusive na curva “CAT 05 – descartado”, quando uma intervenção da polícia rodoviária local fez com que o motorista freasse o caminhão, causando uma queda na velocidade e um retardo (defasagem) no perfil de aceleração. Além disso, observa-se que a taxa de desaceleração é um pouco maior que a de aceleração, como mostrado por Araujo (2001).

Mas de fato ainda o que mais valida a hipótese proposta, é a de que a precisão do resultado do consumo de combustível não se encontra no valor bruto do resultado da simulação computacional, mas sim na diferença de consumo de combustível entre os diferentes perfis de velocidade possíveis para cruzar a praça de pedágio.

No perfil médio adotado, os caminhões partem da mesma velocidade, percorrem a mesma distância, e alcançam a mesma velocidade de cruzeiro. Isso garante que a diferença no consumo de combustível se dá exclusivamente pela redução da velocidade proporcionada por cada tipo de passagem: manual, eletrônica ou livre.

O gráfico da Figura 28 mostra o perfil médio adotado.

Figura 28 – Perfil Médio.

Os três perfis de velocidade construídos referem-se a: “Cabine Manual” – quando o veículo desloca-se até a cabine manual de atendimento para efetuar o pagamento da tarifa, reduzindo sua velocidade a zero; “Cabine Eletrônica” – quando o veículo passa pelas pistas dedicadas à cobrança eletrônica da tarifa, realizada através do AVI, desacelerando até a velocidade de 40 km/h, recomendada pela empresa que opera a utilização do sistema; e “Passagem Livre” – onde é simulado o consumo de combustível à velocidade constante de 80 km/h, máxima permitida para caminhões no local de instalação da praça de pedágio Jacareí localizada na Rodovia Presidente Dutra.

O perfil “Passagem Livre” simula a cobrança da tarifa sem interferência na velocidade dos veículos, simulando a utilização do conceito Open Road Tolling, já utilizada em alguns países, ou ainda, simulando a inexistência da praça de pedágio.

A diferença de consumo de combustível entre os diferentes perfis de velocidade pode ser entendida se analisarmos a ação do motorista atrelada ao sistema de injeção de combustível no motor e à dinâmica veicular.

No perfil “Cabine Manual”, temos primeiramente o consumo de combustível na desaceleração do veículo até a cabine de pagamento, que é pequeno, pois na maior parte do tempo o pedal do acelerador não está sendo acionado, o que inibe a injeção de combustível. A energia cinética do movimento é então dissipada pelo sistema de freios e pelas forças de resistência ao movimento. O segundo momento corresponde ao consumo em marcha lenta do caminhão, referente ao tempo necessário para efetuar o pagamento da tarifa. E por fim, a mais relevante das etapas, quando o motorista acelera o caminhão para retomar sua velocidade de cruzeiro, fornecendo energia para que toda a massa vença as resistências ao movimento e ainda adquira energia cinética.

No perfil “Cabine Eletrônica”, a diferença basicamente consiste no fato do veículo não entrar em estado de marcha lenta, e principalmente por retomar a velocidade de cruzeiro a partir de uma velocidade diferente de zero, a partir de 40 km/h, como recomendado.

O consumo do perfil “Passagem Livre” refere-se ao consumo de combustível à velocidade constante como mostrada na revisão bibliográfica.

Assim sendo, se desconsiderarmos a parcela de combustível gasta durante a movimentação na fila, podemos simular o consumo de combustível para o caso “Cabine Manual” quando o caminhão não encontra a cabine de cobrança livre. Nesse caso, calculamos proporcionalmente o consumo em marcha lenta referente ao número de veículos que se encontram na frente do caminhão.

O gráfico da Figura 29 mostra a simulação de um caminhão que tenha encontrado respectivamente zero, dois, e quatro outros veículos em sua frente no momento de chegada à cabine.

Figura 29 – Velocidade x Tempo em função do tempo de espera na cabine.

3.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Para realização das simulações foi utilizado o modelo computacional desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink descrito na revisão bibliográfica. O objetivo das simulações é fazer com que o veículo no computador reproduza exatamente as condições reais medidas nos testes em pista e definidas no perfil médio adotado.

O simulador utiliza os dados do motor mapeado do veículo para várias posições de carga e realiza o cálculo do consumo instantâneo de combustível inúmeras vezes por segundo, definido pelo “*step*” do Matlab. Ao final da simulação temos o valor de consumo acumulado e a média de combustível gasta em função da distância percorrida.

Foram realizadas simulações para os três perfis de velocidade definidos nos testes em pista para diferentes categorias de caminhões. No caso do perfil “Cabine Manual”, o consumo de combustível em marcha lenta do motor foi calculado separadamente. Isso se deveu ao fato de que quando a velocidade do caminhão se aproximava de zero, o simulador levava muito tempo para calcular cada “*step*”, possivelmente devido à presença de frações que se aproximavam de zero. Diante disso

estabeleceu-se uma velocidade limite mínima para os caminhões, a fim de contribuir com o processamento das simulações.

As simulações foram realizadas para caminhões leves, médios e pesados. Foram definidas quatro categorias de caminhões: categoria três eixos, “CAT 03”, categoria cinco eixos, “CAT 05”, categoria sete eixos, “CAT 07”, e categoria nove eixos, “CAT 09”. A Tabela 10 mostra o Peso Bruto Total – PBT e as classes veiculares que foram adotadas para cada categoria de caminhão simulada nessa dissertação. Os valores de do PBT, bem como a silhueta do caminhão e a classe pertencente constam no ANEXO A dessa dissertação (BRASIL, 2006).

Tabela 10 – Valores de PBT e classes veiculares por categoria.

CATEGORIA	PBT (ton)	CLASSES
CAT 03	23,0	3C e 2S1
CAT 05	41,5	2S3, 3S2, 2I3, 2I1, 3I2, 2C3 e 3C2
CAT 07	54,0	3D4 e 3Q4
CAT 09	74,0	3T6

As informações técnicas utilizadas nas simulações foram obtidas junto aos fabricantes e fazem parte do banco de dados do Laboratório Computacional de Veículos da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC. As tabelas seguintes apresentam: o peso bruto total (PBT) do caminhão; a redução do diferencial; o escalonamento das caixas de câmbio utilizadas; o torque e a potência máxima dos motores; a estratégia de marcha adotada nas simulações, representadas por “rpm_min” e “rpm_max”; e o consumo específico do motor em marcha lenta (B_ml):

Tabela 11 – Parâmetros da simulação do caminhão CAT 03.

PARÂMETROS	CAT 03
PBT	23,0 ton
Diferencial	4,3
Câmbio	(8,81; 6,55; 4,77; 3,55; 2,48; 1,34; 1,0)
Torque	942,7 N.m a 1300 rpm
Potência	264 cv a 2300 rpm
rpm_min	1200
rpm_max	2500
B_ml	0,67 g/s

Tabela 12 – Parâmetros da simulação do caminhão CAT 05.

PARÂMETROS	CAT 05
PBT	41,5 ton
Diferencial	4,0
Câmbio	Grupo Lento: (11,72; 7,92; 5,29; 3,64; 2,66; 1,80; 1,20; 0,83) Grupo rápido: (9,75; 6,58; 4,40; 3,02; 2,21; 1,48; 1,00; 0,69)
Torque	1600 N.m a 1100~1500 rpm
Potência	360 cv a 2000 rpm
rpm_min	1200
rpm_max	1800
B_ml	0,95 g/s

Tabela 13– Parâmetros da simulação do caminhão CAT 07.

PARÂMETROS	CAT 07
PBT	54 ton
Diferencial	4,0
Câmbio	Grupo Lento: (11,72; 7,92; 5,29; 3,64; 2,66; 1,80; 1,20; 0,83) Grupo rápido: (9,75; 6,58; 4,40; 3,02; 2,21; 1,48; 1,00; 0,69)
Torque	1900 N.m a 1300 rpm
Potência	430 cv a 2200 rpm
rpm_min	1200
rpm_max	1800
B_ml	1,09 g/s

Tabela 14 – Parâmetros da simulação do caminhão CAT 09.

PARÂMETROS	CAT 09
PBT	74 ton
Diferencial	7,0
Câmbio	Grupo Lento: (11,72; 7,92; 5,29; 3,64; 2,66; 1,80; 1,20; 0,83) Grupo rápido: (9,75; 6,58; 4,40; 3,02; 2,21; 1,48; 1,00; 0,69)
Torque	1900 N.m a 1300 rpm
Potência	430 cv a 2200 rpm
rpm_min	1400
rpm_max	2200
B_ml	1,09 g/s

A partir dos resultados obtidos com as simulações podemos então primeiramente avaliar qual o custo com combustível inerente a uma transação no pedágio, ou seja, qual o valor gasto além do preço da tarifa, o qual está embutido no custo do transporte, que o usuário tem que pagar sendo obrigado a reduzir sua velocidade para efetuar o pagamento. Assim sendo, podemos fazer uma comparação com os outros tipos de cobrança, eletrônica utilizando o AVI, ou o conceito ORT.

Com esse resultado, faz-se uma avaliação custo/benefício para o usuário do sistema AVI no Brasil, a fim de calcular qual o retorno financeiro para diversos cenários e períodos de tempo, e número mínimo de passagens mensais no pedágio que se faz necessário para arcar com os custos da utilização do sistema.

Ainda com os resultados do consumo de combustível, é possível fazer uma previsão do volume anual de combustível gasto em função da desaceleração dos veículos causada pela instalação da praça de pedágio. Assim, na próxima seção, faz-se um demonstrativo de como foi feita a análise do impacto da operação da praça de pedágio Jacareí.

3.5 ANÁLISE AMBIENTAL

A alteração no perfil de velocidade imposta pela instalação das cabines cobrança implica num aumento no consumo de combustível dos veículos. O aumento no consumo de combustível resulta num aumento no número de emissões de poluentes resultante da combustão nos motores. Dessa maneira, a análise ambiental se propõe a avaliar qual o volume de combustível gasto para cruzar a região da praça de pedágio, e assim avaliar as emissões de CO₂ provenientes da queima do óleo diesel nos motores dos caminhões.

A metodologia da análise de CO₂ primeiramente se propõe a estipular uma equação do consumo de combustível em função da carga transportada. Com os resultados das simulações computacionais foi possível desenvolver um polinômio do segundo grau que representasse esse consumo para cada tipo de passagem, “Cabine Manual”, “Cabine Eletrônica” e “Passagem livre”. A equação que descreve o consumo é do tipo:

$$B(i) = X * c^2 + Y * c + Z \quad (34)$$

Onde:

B(i) = consumo em função da carga transportada [ml/diesel];

i = índice, cm – cabine manual; ce – cabine eletrônica; e pl – passagem livre;

c = carga transportada [ton]; e

X, Y, Z = parâmetros a serem calculados.

Com as equações de consumo e os dados do fluxo de veículos na praça de pedágio, é possível estimar o volume anual de combustível necessário para cruzar a região em estudo. Os dados apresentados na Tabela 15 foram fornecidos pela concessionária e estão especificados pelo tipo de passagem e pela categoria do veículo.

Tabela 15 – Fluxo de veículos por categoria – Ano de 2008.

CATEGORIA	TIPO DE PASSAGEM	
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica
CAT 03	1.361.119	1.053.575
CAT 04	261.546	380.072
CAT 05	863.595	987.073
CAT 06	278.551	351.798
CAT 07	66.891	82.816
CAT 09	4.474	13.190
Total	2.836.176	2.868.524

Considerou-se no consumo de combustível que os caminhões estavam carregados com os seguintes pesos por categoria, mostrados na Tabela 16, de acordo com os valores médios obtidos junto a Balança Guararema, localizada próxima ao pedágio Jacareí, na Rodovia Presidente Dutra, trecho: Caçapava - São Paulo (RJ - SP) – km: 179.

Tabela 16 – Carga média transportada por categoria.

CATEGORIA	CARGA MÉDIA TRANSPORTADA (ton)
CAT 03	20,5
CAT 04	27,1
CAT 05	41,2
CAT 06	47,7
CAT 07	57,7
CAT 09	73,4

Assim temos o volume anual de combustível gasto referente a todos os veículos que efetuaram o pagamento pela cabine manual – “ B_{anual_cm} ”, e o volume anual dos que efetuaram o pagamento pela cabine eletrônica – “ B_{anual_ce} ”. Podemos então calcular o volume anual de combustível como se todos os caminhões que cruzaram a região não tivessem sido afetados pela instalação das cabines de cobrança utilizando equação de consumo de passagem livre, “ $B_{pl}(c)$ ”.

Dessa maneira podemos prever então através da equação 35 qual o volume de combustível “desperdiçado” devido à desaceleração dos veículos causada pela instalação da praça de pedágio Jacareí:

$$B_{desp.2008} = (B_{anual\_cm} + B_{anual\_ce}) - B_{anual\_pl} \quad (35)$$

Onde:

$B_{desp.2008}$ = volume de combustível desperdiçado no ano de 2008;

B_{anual_cm} = volume de combustível dos caminhões que utilizaram a cabine manual;

B_{anual_ce} = volume de combustível dos caminhões que utilizaram a cabine eletrônica; e

B_{anual_pl} = volume de combustível sem interferência na velocidade.

O volume total de combustível desperdiçado no ano de 2008 é então convertido em CO₂ utilizando o método “*Top Down*” descrito na revisão bibliográfica desta dissertação.

4 RESULTADOS

Este capítulo consiste na apresentação dos resultados do estudo do tempo, das simulações computacionais, e nas relações que se pode estabelecer com o consumo de combustível e a análise ambiental. Primeiramente são apresentados os resultados do estudo do tempo na praça. Em seguida, os resultados das simulações, onde são mostrados os gráficos de algumas variáveis de saída do programa computacional. Nas duas seções seguintes apresenta-se o resultado do consumo de combustível e do custo referente à uma transação na cabine de pedágio. A seção seguinte mostra as equações de consumo de combustível e os cálculos das emissões de CO₂ para avaliação do impacto ambiental. Por fim, são apresentados os estudos de caso, onde se faz uma avaliação de custo/benefício da utilização do sistema eletrônico de pagamento da tarifa utilizando o AVI.

4.1 RESULTADOS DO ESTUDO DO TEMPO

A tabela seguinte mostra os resultados e alguns parâmetros estatísticos do tempo de atendimento na cabine “TC” para automóveis e caminhões.

Tabela 17 – Tempo de atendimento na cabine (segundos) – Praça de Jacareí.

PARÂMETROS	CLASSE VEICULAR	
	Automóveis	Caminhões
Média	12,8	19,1
Desvio-Padrão	6,2	8,7
Mínimo	4,6	4,4
Máximo	42,0	45,7
Moda	9,4	10,4
Tamanho da amostra	276	341

A análise dos dados mostra que os valores encontrados se encontram um pouco abaixo dos encontrados para maioria das praças estudadas por Araújo (2001). Isso possivelmente pode ser explicado pela diferença de metodologia adotada na coleta do tempo de atendimento, já que Araújo 2001 tomou o tempo existente entre dois fechamentos sucessivos da cancela. Além disso, a administração da praça de pedágio Jacareí é concedida à CCR – NovaDutra, estabelece outros padrões de características físicas e operacionais, não analisadas por Araujo (2001). Por fim, o tipo de usuário predominante nas praças também pode ser diferente, o que contribuiria para diferença entre os resultados. Verificou-se a influência da classe veicular no tempo de atendimento, já que a média obtida para automóveis foi 33% inferior à média de caminhões. Também pode ser verificado o cumprimento da capacidade de nível de serviço sugerida pelos autores Pesquera et al. (1997) e Pollus e Reshetnik (1997).

Os resultados do teste de hipóteses para avaliação do tempo necessário para cruzar a praça de pedágio – “TP” são apresentados a seguir conforme originados pelo software Minitab.

I. Tempo na Praça – Automóveis:

Paired T for C7 - C9

	N	Mean	StDev	SE Mean
C7	100	35,75	5,01	0,50
C9	100	88,36	26,70	2,67
Difference	100	-52,62	26,90	2,69

95% CI for mean difference: (-57,96; -47,28)

II. Tempo na Praça – Caminhões:

Paired T for C1 - C3

	N	Mean	StDev	SE Mean
C1	102	41,54	4,65	0,46
C3	102	107,81	26,34	2,60
Difference	102	-66,27	26,96	2,66

95% CI for mean difference: (-71,54; -61,00)

A Tabela 18 e a Tabela 19 resumem esses resultados e apresentam a diferença do tempo entre os dois tipos de cobranças, manual e eletrônica.

Tabela 18 – Resultados do tempo na praça “TP” – Automóveis.

PARÂMETROS	TIPO DE COBRANCA		
	Manual (TP_m)	Eletrônica (TP_e)	ΔTP_{l_m}
Média	88,4	35,7	52,6
Desvio-Padrão	26,7	5,0	26,9
95% CI	-	-	(47,3 ; 58,0)
Tamanho da amostra	50	50	-

Tabela 19 - Resultados do tempo na praça “TP” – Caminhões.

PARÂMETROS	TIPO DE COBRANCA		
	Manual (TP_m)	Eletrônica (TP_e)	ΔTP_{l_m}
Média	107,8	41,5	66,3
Desvio-Padrão	26,3	4,6	27,0
95% CI	-	-	(61,0 ; 71,5)
Tamanho da amostra	51	51	-

Onde:

TP_m : tempo médio necessário para cruzar a praça de pedágio passando pela cabine manual [s];

TP_e : tempo médio necessário para cruzar a praça de pedágio passando pela cabine eletrônica [s];

$\Delta TP_{l_m} = TP_m - TP_e$, diferença entre o tempo médio obtido para cobrança eletrônica e manual[s].

O índice “95% CI” indica o nível de confiança com que os testes foram aplicados, e seu valor, indica o intervalo que contém o conjunto das médias das diferenças de tempo entre os dois tipos de passagens.

Essa comparação pode ser mais bem visualizada quando apresentada na forma de histogramas, como visto nas figuras seguintes.

Os histogramas das figuras seguintes comparam a distribuição de freqüências em função do tempo de automóveis e caminhões cruzando o pedágio Jacareí. Pode-se perceber um deslocamento da distribuição entre as amostras manuais, em vermelho, e das amostras eletrônicas, em azul. Entretanto, a Figura 30 revela uma intersecção entre as amostras coletadas, representada em amarelo. Isso implica que tanto automóveis que passaram pela cabine manual, quanto aqueles que passaram pela cabine eletrônica para pagamento da tarifa cruzaram a praça de Jacareí dentro da faixa correspondente àquele intervalo de bloco, de 50 a 55 segundos.

Figura 30 - Comparação do “TP – Tempo na Praça” para automóveis.

Figura 31 - Comparação do “TP – Tempo na Praça” para caminhões.

Como era esperado, o tempo necessário para cruzar a praça optando pelo pagamento eletrônico da tarifa é inferior. Para automóveis, a diferença média dos tempos foi de 52,6 segundos, enquanto que para caminhões a diferença foi superior, de 66,3 segundos. Isso se deve ao fato do pagamento da tarifa eletrônica ser realizado com o veículo em movimento. A velocidade recomendada pela empresa que opera o serviço é de 40 km/h, mas alguns usuários, cerca de 25%, segundo Araujo (2001), desenvolvem velocidades superiores, pois tem conhecimento prático da capacidade de leitura da tecnologia AVI em velocidades superiores.

Se considerarmos que a extensão da praça é de 640m, podemos calcular o tempo necessário para percorrer essa distância em velocidade constante. Adotando a velocidade de 100 km/h para automóveis e 80 km/h para caminhões, velocidade limite da rodovia nessa região, podemos calcular o tempo necessário para cruzar a região se a cobrança fosse realizada mediante ORT, ou seja, calculamos TP_{ort} .

Assim sendo, podemos calcular qual o acréscimo de tempo necessário para cruzar a praça de pedágio em estudo em função da operação das cabines de cobrança, como mostra a Tabela 20:

Tabela 20 – Acréscimo do tempo devido à cobrança do pedágio na cabine manual.

TIPO DE VEÍCULO	TIPO DE COBRANCA		
	Manual (TP_m)	ORT (TP_{ort})	ΔTP_{ort_m}
Automóveis (s)	88,4	23,0	65,4
Caminhões (s)	107,8	28,8	79,0

Onde:

TP_{ort} : Tempo necessário para cruzar a praça de pedágio sem desaceleração da velocidade [s];

ΔTP_{ort_m} : diferença entre o tempo ORT e o tempo médio cabine manual [s].

Em resumo, vê-se que, a cobrança quando efetuada pelo sistema eletrônico reduz o tempo necessário para cruzar a praça de pedágio. A redução proporcionada pela utilização do AVI foi de 61% para caminhões e 60% para automóveis. Se a cobrança pudesse ser feita através do conceito ORT, ou ainda, se não houvesse o pedágio, essa redução seria ainda maior, de 74% para automóveis e de 73% para caminhões.

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os gráficos aqui apresentados nesta seção são variáveis de saída do programa computacional e nos mostram algumas características do comportamento do veículo ao longo da simulação. As variáveis analisadas são: comparação entre a distância mapeada e a distância simulada; comparação entre a velocidade mapeada e a velocidade simulada; a utilização dos pedais de freio e acelerador; a lógica de marchas utilizada pelo simulador; a rotação do motor e o consumo de combustível.

O gráfico da Figura 32 mostra a comparação entre a distância mapeada – “*x map*” nos testes em pista versus a distância simulada – “*x sim*” pelo veículo do programa simulador. Observe que as curvas estão praticamente sobrepostas, o que indica que o simulador percorreu a distância desejada. O gráfico da Figura 33 mostra essa comparação para os outros perfis de velocidade, “Cabine Eletrônica” e “Passagem Livre” para o mesmo caminhão, pertencente à categoria três eixos. Percebe-se nesse

gráfico que o simulador percorre a mesma distância nas três curvas, entretanto, em tempos diferentes. A curva “Passagem Livre” corresponde a uma reta indicando que o simulador manteve-se em velocidade constante. A curva “Cabine Manual” apresenta uma porção quase horizontal, que indica que o veículo reduziu sua velocidade muito próxima à zero km/h, como veremos a seguir. Além disso, podemos perceber, como destacado anteriormente, que a aceleração média na retomada da velocidade é inferior à desaceleração média.

Figura 32 – Comparação entre distâncias mapeada e simulada em função do tempo.

Figura 33 – Comparação entre distâncias mapeada e simulada para outros perfis de velocidade em função do tempo para caminhão CAT 03.

Para outras categorias de caminhões, CAT 05, CAT 07 e CAT 09, os gráficos são semelhantes e por isso foram omitidos, já que o perfil médio de velocidade x distância adotado foi utilizado para todas as simulações.

Os gráficos da Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37 mostram a comparação entre a velocidade simulada – “*vel sim*” e a velocidade mapeada – “*vel map*” em função da distância percorrida. Podemos ver que a velocidade mínima simulada para o perfil “*Cabine Manual*”, foi de 3 km/h, devido ao elevado tempo de simulação gasto para simular as velocidades próximas de zero. As velocidades simuladas e mapeadas se encontram muito próximas, o que mostra que o controlador PID seguiu fielmente a velocidade mapeada. Houve apenas um distanciamento pequeno que pode ser notado na simulação do caminhão CAT 09, em função do alto PBT transportado, de 74 ton, que o controlador teve dificuldade de acompanhar, mesmo utilizando um diferencial ainda mais reduzido.

Figura 34 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 03.

Figura 35 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 05.

Figura 36 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 07.

Figura 37 – Comparação entre velocidade mapeada e simulada – CAT 09.

Os gráficos da Figura 38, Figura 39 e Figura 40 seguintes mostram a ação do freio do simulador para os diferentes tipos de passagem no pedágio em função da distância percorrida. No perfil “Cabine Manual” podemos observar um elevado número de acionamentos devido à necessidade de reduzir a velocidade até zero para que o veículo efetue o pagamento da tarifa na cabine manual. Como já mencionado, nesta etapa, o consumo de combustível é muito pequeno, pois quando o freio está sendo acionado, o simulador inibe a injeção de combustível no motor. No perfil “Cabine Eletrônica” podemos observar uma menor concentração do número acionamentos do freio, já que a necessidade de reduzir a velocidade é menor, para 40 km/h. Por fim, o perfil “Passagem Livre” não mostra nenhum acionamento do freio, já que o motorista deve pisar no acelerador para manter o veículo em velocidade constante.

Figura 38 – Número de acionamentos no freio em função da distância – Cabine Manual.

Figura 39 – Número de acionamentos no freio em função da distância – Cabine Eletrônica.

Figura 40 – Número de acionamentos no freio em função da distancia – Passagem Livre.

Os gráficos da Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44 mostram o acionamento do acelerador para os diferentes perfis de velocidade simulados para as quatro categorias.

O acionamento do acelerador é o oposto ao acionamento do freio. Dessa maneira, a distribuição do numero de acionamentos do acelerador é maior na segunda metade da distância percorrida, ou seja, quando o caminhão está retomando sua velocidade de cruzeiro, para os casos dos perfis “Cabine Manual” e “Cabine Eletrônica”. Comparando esses dois perfis, ainda percebe-se, que, tanto em número, quanto na intensidade dos acionamentos, o perfil “Cabine Manual” é maior, o que é coerente, pois, a retomada da velocidade desse perfil é maior. No caso do perfil “Passagem Livre”, o acionamento do pedal do acelerador se dá de forma constante, o que é conveniente com a necessidade de manter o veículo em velocidade constante. Destaque para comparação entre as categorias CAT 07 e CAT 09, que utilizam o mesmo motor, entretanto a carga transportada é diferente. Vê-se um acionamento maior na CAT 09, que alcança o valor 100% (utilização do pedal do acelerador) na retomada de velocidade para os perfis “Cabine Manual” e “Cabine Eletrônica”, e se mantém constante a 17,7 % acionado no perfil “Passagem Livre”, contra 14,6 % da CAT 07.

Figura 41 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 03.

Figura 42 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 05.

Figura 43 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 07.

Figura 44 – Acionamento do acelerador para diferentes perfis – CAT 09.

Os gráficos a seguir mostram a marcha engrenada x distância mapeada para as quatro categorias de caminhões para os diferentes perfis de velocidade. De um modo geral pode-se observar que no perfil “Cabine Manual”, para todas as categorias, o simulador alcançou a primeira marcha quando se aproximava da cabine de cobrança manual. A caixa de mudanças de marcha utilizada para a categoria CAT 03 era simples e possuía sete reduções. Observa-se que no perfil “Passagem livre”, para essa categoria, o veículo encontra-se em 7ª marcha e não houve a necessidade de redução. A curva azul neste caso está atrás da curva verde, e não aparece no gráfico. Nas outras três categorias, a caixa de mudanças utilizada contava com a opção reduzida. Daí a utilização da 14ª marcha no perfil “Passagem Livre” para as categorias CAT 05 e CAT 07, e da 16ª marcha para a categoria CAT 09, quando os caminhões viajam em velocidade constante a 80 km/h. A diferença dos gráficos das categorias CAT 07 e CAT 09 se encontram na estratégia de mudanças de marcha adotadas, que são diferentes, e do diferencial utilizado no caminhão CAT 09, que eleva a taxa de rotação do motor fazendo com que o simulador alcance a próxima marcha mais rapidamente.

Figura 45 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 03.

Figura 46 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 05.

Figura 47 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 07.

Figura 48 – Marcha engrenada x Distância para diferentes perfis – CAT 09.

Os gráficos da Figura 49, Figura 50, Figura 51 e Figura 52 a seguir mostram a rotação do motor em função da distância mapeada para as quatro categorias de caminhões para os diferentes perfis de velocidade. A análise do comportamento da rotação do motor nos dá indícios de como foi o consumo de combustível dos caminhões. De um modo geral, todas as categorias simuladas apresentaram taxas mais elevadas de rotação para o perfil “Cabine Manual” quando comparado com o perfil “Cabine Eletrônica”, principalmente a partir da distância de 900 metros, próximo do local onde é feita a cobrança da tarifa. Dessa maneira, já se prevê que o consumo de combustível para esse perfil será maior. Ainda no perfil “Cabine Manual”, observamos a partir da retomada de velocidade, o aparecimento de uma curva semelhante ao diagrama dente de serra, que fica mais evidente no gráfico da categoria CAT 09, pois esse desenvolve acelerações mais constantes como mostrado anteriormente. Na categoria CAT 03, vemos que a curva de rotação do perfil “Cabine Eletrônica” é análoga à curva de velocidade, pois o simulador não efetuou mudanças de marcha, houve apenas um decréscimo da rotação em função do decréscimo da velocidade.

Figura 49 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 03

Figura 50 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 05.

Figura 51 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 07.

Figura 52 – Rotação do motor x Distância mapeada – CAT 09.

4.3 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Segundo Diniz (2009), o resultado da simulação de consumo de combustível apresenta um erro pequeno, de aproximadamente 5 %, com relação às medições feitas na prática. Entretanto, como o objetivo do trabalho é avaliar o consumo de combustível mediante comparação com outras possíveis maneiras de cruzar a praça de pedágio em estudo, acredita-se que esse valor possa ser ainda menor. Além disso, todas as variáveis externas que venham a interferir diretamente no consumo, como a densidade do combustível, temperatura, motorista, etc., estão de certa forma controladas mediante a comparação dos resultados.

Os gráficos das Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 56 a seguir apresentam a média de consumo de combustível acumulado das diferentes categorias de caminhões para os diferentes perfis de velocidade. Como era esperado, vê-se que o menor consumo refere-se ao perfil “Passagem Livre”, que apresenta uma linha reta na maior parte do tempo, indicando que o acelerador manteve-se constante, requerendo uma injeção de combustível necessária para gerar energia o suficiente para dissipar as forças de resistência ao movimento e manter o veículo em velocidade constante. Nos casos “Cabine Manual” e “Cabine Eletrônica”, percebe-se um crescimento na curva até a distância aproximada de 900 metros, quando esta atinge seu valor máximo, o que na unidade do gráfico de consumo, em “*km/l*”, representa o menor gasto de combustível. Como dito, até essa distância, o veículo encontra-se em processo de desaceleração, o que representa um baixo consumo de combustível, já que na maior parte do tempo o acelerador não está sendo acionado. O consumo do perfil “Cabine Eletrônica” é maior no início da simulação quando comparado com o perfil “Cabine Manual”. Isso pode ser explicado pelo maior tempo de utilização do acelerador, como se vê nos gráficos da Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 56. Entretanto, depois da metade da simulação, essas curvas se cruzam, e o consumo referente à “Cabine Manual”, como esperado, em função da necessidade de se retomar a velocidade de cruzeiro partindo do repouso, torna-se maior.

Figura 53 – Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 03.

Figura 54 - Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 05.

Figura 55 - Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 07.

Figura 56 – Consumo de combustível x Distância mapeada – CAT 09.

Os gráficos da Figura 57, Figura 58 e Figura 59 comparam o consumo de combustível das quatro categorias de caminhões em função do tipo de perfil de velocidade. Podemos concluir que o consumo de combustível aumenta na medida em que aumenta a carga transportada pelo caminhão.

Figura 57 - Consumo de combustível x Distância mapeada – Cabine Manual.

Figura 58 - Consumo de combustível x Distância mapeada – Cabine Eletrônica.

Figura 59 - Consumo de combustível x Distância mapeada – Passagem Livre.

As tabelas a seguir mostram o valor do consumo médio - $B_{médio}$, a distância percorrida pelo simulador - $Distância$, e o volume de combustível acumulado para cada tipo de perfil de velocidade - B_{acum} .

Tabela 21 – Resultados da simulação – CAT 03

PARÂMETROS	TIPO DE PERFIL		
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica	Passagem Livre
$B_{médio}$ [km/l]	3,19	4,02	5,32
Distância [km]	2,037	2,037	2,037
B_{acum} [ml]	638,4	507,3	382,7

Tabela 22 - Resultados da simulação – CAT 05

PARÂMETROS	TIPO DE PERFIL		
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica	Passagem Livre
$B_{\text{médio}}$ [km/l]	1,71	2,02	2,56
Distância [km]	2,037	2,037	2,037
B_{acum} [ml]	1191,2	1010,9	794,1

Tabela 23 - Resultados da simulação – CAT 07

PARÂMETROS	TIPO DE PERFIL		
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica	Passagem Livre
$B_{\text{médio}}$ [km/l]	1,22	1,45	1,97
Distância [km]	2,037	2,037	2,037
B_{acum} [ml]	1675,2	1407,7	1032,0

Tabela 24 - Resultados da simulação – CAT 09

PARÂMETROS	TIPO DE PERFIL		
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica	Passagem Livre
$B_{\text{médio}}$ [km/l]	1,12	1,39	1,45
Distância [km]	2,037	2,037	2,037
B_{acum} [ml]	1812,3	1461,3	1401,9

Podemos então construir um gráfico que expresse a relação entre o consumo de combustível gasto para cruzar a praça de pedágio em função do peso bruto total do caminhão.

Figura 60 - Consumo x PBT.

4.4 O CUSTO COM COMBUSTÍVEL DE UMA TRANSAÇÃO NO PEDÁGIO

Como já mencionado nessa dissertação, o custo do pedágio vai além do pagamento da tarifa. Há que se medir também o custo do tempo perdido nas filas, que está relacionado com a capacidade de uma pessoa de produzir algum valor para sociedade, ou na sua capacidade de gerar renda; o custo com o combustível, como vimos, a redução do perfil de velocidade aumenta o consumo de combustível dos veículos que aumenta os custos do transporte; e por fim, o custo com a emissão de poluentes, que acarreta em sérios males à saúde.

Esta seção faz a avaliação do custo com combustível para uma transação na cabine de pedágio mediante a comparação entre os valores médios de consumo de combustível obtidos para os diferentes perfis de velocidade simulados.

Na Tabela 25 são apresentados os consumos em marcha lenta para cada categoria, bem como o consumo gasto na cabine em função do tempo de espera do usuário na fila de cobrança.

Tabela 25 – Consumo em marcha lenta e consumo gasto na cabine em função do tempo de espera.

PARÂMETROS	CATEGORIA			
	CAT 03	CAT 05	CAT 07	CAT 09
<i>B_{ml}</i> [g/s]	0,67	0,95	1,09	1,09
B_cabine x 1 TC [ml]	15,3	21,6	24,9	24,9
B_cabine x 2 TC [ml]	30,6	43,3	49,8	49,8
B_cabine x 3 TC [ml]	45,9	64,9	74,6	74,6
B_cabine x 4 TC [ml]	61,2	86,5	99,5	99,5
B_cabine x 5 TC [ml]	76,5	108,2	124,4	124,4
B_cabine x 6 TC [ml]	91,8	129,8	149,3	149,3
B_cabine x 7 TC [ml]	107,1	151,5	174,2	174,2
B_cabine x 8 TC [ml]	122,4	173,1	199,1	199,1
B_cabine x 9 TC [ml]	137,7	194,7	223,9	223,9
B_cabine x 10 TC [ml]	153,0	216,4	248,8	248,8

Onde:

TC = tempo de atendimento na cabine [s].

O custo com combustível da transação no pedágio é então calculado fazendo-se a diferença entre os valores obtidos para os perfis “Cabine Manual” e “Cabine Eletrônica” e o valor obtido para o perfil “Passagem Livre”, somados ao custo de combustível referente ao tempo de espera na cabine de atendimento. A Tabela 26 e a Tabela 27 a seguir apresentam esses valores comparando os dois perfis para as diferentes categorias de caminhões simuladas. O valor da densidade do diesel utilizado foi de 838,6 g/l, e o valor médio de preço para o estado de São Paulo foi de R\$ 1,977, segundo ANP (2009).

Tabela 26 – Custo com combustível da transação por tipo de passagem e por categoria.

TEMPO DE ESPERA	CATEGORIA			
	CAT 03		CAT 05	
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica	Cabine Manual	Cabine Eletrônica
1 x TC	R\$ 0,52	R\$ 0,25	R\$ 0,81	R\$ 0,43
2 x TC	R\$ 0,54	R\$ 0,25	R\$ 0,83	R\$ 0,43
3 x TC	R\$ 0,55	R\$ 0,25	R\$ 0,85	R\$ 0,43
4 x TC	R\$ 0,57	R\$ 0,25	R\$ 0,87	R\$ 0,43
5 x TC	R\$ 0,58	R\$ 0,25	R\$ 0,89	R\$ 0,43
6 x TC	R\$ 0,60	R\$ 0,25	R\$ 0,91	R\$ 0,43
7 x TC	R\$ 0,61	R\$ 0,25	R\$ 0,94	R\$ 0,43
8 x TC	R\$ 0,63	R\$ 0,25	R\$ 0,96	R\$ 0,43
9 x TC	R\$ 0,64	R\$ 0,25	R\$ 0,98	R\$ 0,43
10 x TC	R\$ 0,66	R\$ 0,25	R\$ 1,00	R\$ 0,43

Tabela 27 – Custo com combustível da transação por tipo de passagem e por categoria.

TEMPO DE ESPERA	CATEGORIA			
	CAT 07		CAT 09	
	Cabine Manual	Cabine Eletrônica	Cabine Manual	Cabine Eletrônica
1 x TC	R\$ 1,29	R\$ 0,74	R\$ 0,84	R\$ 0,12
2 x TC	R\$ 1,32	R\$ 0,74	R\$ 0,86	R\$ 0,12
3 x TC	R\$ 1,34	R\$ 0,74	R\$ 0,89	R\$ 0,12
4 x TC	R\$ 1,37	R\$ 0,74	R\$ 0,91	R\$ 0,12
5 x TC	R\$ 1,39	R\$ 0,74	R\$ 0,94	R\$ 0,12
6 x TC	R\$ 1,42	R\$ 0,74	R\$ 0,96	R\$ 0,12
7 x TC	R\$ 1,44	R\$ 0,74	R\$ 0,99	R\$ 0,12
8 x TC	R\$ 1,47	R\$ 0,74	R\$ 1,01	R\$ 0,12
9 x TC	R\$ 1,49	R\$ 0,74	R\$ 1,04	R\$ 0,12
10 x TC	R\$ 1,52	R\$ 0,74	R\$ 1,06	R\$ 0,12

É importante ressaltar que o custo da transação na cabine manual de cobrança está em tese subestimado. O programa computacional não leva em conta o modelo de comportamento do caminhão na fila. Acredita-se que o custo deva ser ainda maior, pois o consumo referente à movimentação do caminhão na fila não foi computado.

Percebe-se que o custo de transação quando efetuada na cabine eletrônica, com a utilização do AVI, apresenta custos bem menores. Mais adiante faz-se uma avaliação custo/benefício para utilização do sistema. A Tabela 28 mostra a porcentagem de redução do custo da transação se o usuário optar por realizar o pagamento pelo sistema eletrônico.

Tabela 28 – Porcentagem de redução no custo da transação pela utilização da cobrança eletrônica.

TEMPO DE ESPERA	CATEGORIA			
	CAT 03	CAT 05	CAT 07	CAT 09
1 x TC	53%	47%	43%	86%
2 x TC	54%	48%	44%	86%
3 x TC	55%	50%	45%	87%
4 x TC	57%	51%	46%	87%
5 x TC	58%	52%	47%	87%
6 x TC	59%	53%	48%	88%
7 x TC	60%	54%	49%	88%
8 x TC	61%	55%	50%	88%
9 x TC	62%	56%	50%	89%
10 x TC	63%	57%	51%	89%

4.5 EMISSÕES DE CO₂

A alteração no perfil de velocidade causada pela instalação das cabines de cobrança numa praça de pedágio acarreta num aumento no consumo de combustível dos veículos. O aumento no consumo de combustível, por consequência, aumenta o número de emissão de poluentes proveniente da combustão nos motores. Dessa maneira, podemos afirmar que a praça de pedágio contribui para o aumento da emissão de poluentes.

A avaliação das emissões de CO₂ desta seção foi feita da seguinte maneira. Primeiro avaliou-se quanto CO₂ foi emitido no ano de 2008 em função do fluxo de veículos na praça divididos pelo tipo de passagem, manual ou eletrônica. Em seguida, faz-se a suposição se todos esses veículos tivessem percorrido a região sem alteração da velocidade, ou seja, como se a passagem fosse livre.

Para isso, inicialmente foi necessário avaliar qual o consumo total de combustível de todos os caminhões que cruzaram a praça de pedágio nesse período. De acordo com os resultados da Figura 60 foi desenvolvido um polinômio do 2º grau que representa o consumo de combustível em função da carga transportada para os diferentes tipos de passagem no pedágio.

Para o perfil “Cabine Manual” temos:

$$B_{cm(c)} = -0,38c^2 + 60,90c - 570,27 \quad (36)$$

Para o perfil “Cabine Eletrônica”:

$$B_{ce(c)} = -0,40c^2 + 57,83c - 632,32 \quad (37)$$

E para o perfil “Passagem Livre”:

$$B_{pl(c)} = -0,06c^2 + 25,65c - 174,44 \quad (38)$$

Onde:

$B_{(c)}$ = Consumo em função da carga para cada tipo de passagem [ml]; e

c = carga transportada [ton].

Com os dados Tabela 15 e da Tabela 16, utilizando as equações (36), (37) e podemos calcular o volume anual de combustível gasto para cada perfil de passagem, e com a equação 35, calculamos o combustível desperdiçado no ano de 2008. Os resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 29 – Consumo anual por tipo de passagem e consumo anual desperdiçado.

PARÂMETRO	CONSUMO (Milhões de litros)
B_{anual_cm}	2,57
B_{anual_ce}	2,28
B_{anual_pl}	3,31
$B_{desp.2008}$	1,54

Assim temos que o consumo de combustível dos caminhões que cruzaram a praça de pedágio Jacareí, no ano de 2008 foi de aproximadamente 4,85 milhões de litros. Se todo esse volume de tráfego não tivesse desacelerado, ou seja, se a cobrança pudesse ter sido feita segundo conceito *Open Road Tolling – ORT*, com o caminhão a 80 km/h, ou ainda, se não houvesse pedágio, o consumo seria próximo de 3,31 milhões.

Portanto, cerca de 1,54 milhões de litros de diesel foram consumidos a mais em função da operação da praça de pedágio Jacareí no ano de 2008. Convertendo esse volume de combustível pelo método “*Top Down*” utilizando as equações (30), (31) e (32,) encontramos o valor para emissões de CO₂ aproximado em 4,1 mil toneladas.

4.6 ESTUDOS DE CASO

Os estudos de caso fazem uma avaliação do custo/benefício de efetuar o pagamento da tarifa do pedágio pela cobrança eletrônica através da utilização do AVI. Primeiramente faz-se aqui uma análise de retorno financeiro referente à aquisição do aparelho e o custeio das mensalidades. Para isso é calculado o valor presente líquido – VPL, e a taxa interna de retorno – TIR, para o custo de oportunidade de compra e utilização do sistema.

A empresa prestadora do serviço no Brasil cobra uma taxa de aquisição do aparelho que faz o reconhecimento eletrônico no valor de R\$58,32 e uma mensalidade pela administração do pagamento, no valor de R\$11,61.

A rota escolhida para análise abrange toda a Rodovia Presidente Dutra, que compreende a praça de pedágio em estudo. De São Paulo ao Rio de Janeiro (ida e volta), o caminhão passa por dez cabines de cobrança de pedágio. Admite-se a hipótese de que o caminhão faz o percurso carregado nos dois sentidos e que o consumo de combustível é o mesmo para as outras praças de pedágio.

A tabela seguinte mostra os parâmetros utilizados no estudo de caso do caminhão CAT 03.

Tabela 30 – Cenário do Estudo de Caso – CAT 03.

PARÂMETRO	VALOR
PBT [ton]	23
Nº pedágio/viagem	10
Nº viagens/mês	15
Fila média encontrada na cabine	2
Preço do Diesel [L]	R\$ 1,977
Taxa de juros aplicada	0,6% a.m.

O gráfico da Figura 61 apresenta as curvas do custo acumulado, que corresponde ao valor da aquisição do aparelho e das taxas mensais cobradas pela administração, e a curva do benefício acumulado, que se refere à economia de combustível proveniente da utilização do sistema AVI, segundo os parâmetros estabelecidos na Tabela 30. O custo acumulado foi entendido como custo de oportunidade e corrigido à uma taxa de juros mensal de 0,6%.

O ponto de equilíbrio da curva, que representa quando o dinheiro investido foi recuperado, é alcançado logo no terceiro mês, indicando que o valor presente líquido é maior que zero.

Figura 61 – Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 03.

A tabela seguinte apresenta o valor presente líquido para cinco períodos de tempo, 12, 24, 36, 48 e 60 meses, a respectiva taxa de retorno interno, e o tempo e o montante de CO₂ deixado de emitir para utilização do sistema AVI.

Tabela 31 – Resultados do estudo de caso – CAT 03.

TEMPO	V.P.L	T.I.R	ΔT (horas)	ΔCO_2 (ton.)
12 meses	R\$ 326,89	13,84%	33,15	0,78
24 meses	R\$ 760,24	23,36%	66,30	1,57
36 meses	R\$ 1.194,58	29,39%	99,45	2,35
48 meses	R\$ 1.629,90	33,62%	132,60	3,14
60 meses	R\$ 2.066,20	36,90%	165,75	3,92

As tabelas e as figuras seguintes apresentam os resultados do estudo de caso para as outras categorias de caminhões simuladas. Observa-se que como o consumo de combustível é maior, os resultados são ainda mais vantajosos.

Tabela 32 - Cenário do Estudo de Caso – CAT 05.

PARÂMETRO	VALOR
PBT [ton]	41,5
Nº pedágio/viagem	10
Nº viagens/mês	20
Fila média encontrada na cabine	3
Preço do Diesel [L]	R\$ 1,977
Taxa de juros aplicada	0,6% a.m.

Figura 62 - Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 05.**Tabela 33** - Resultados do estudo de caso – CAT 05.

TEMPO	V.P.L	T.I.R	ΔT (horas)	ΔCO_2 (ton.)
12 meses	R\$ 862,51	23,44%	44,2	1,59
24 meses	R\$ 1.880,18	33,48%	88,4	3,17
36 meses	R\$ 2.898,84	39,55%	132,6	4,76
48 meses	R\$ 3.918,48	43,88%	176,8	6,35
60 meses	R\$ 4.939,10	47,28%	221,0	7,94

Tabela 34 - Cenário do Estudo de Caso – CAT 07.

PARÂMETRO	VALOR
PBT [ton]	54,0
Nº pedágio/viagem	10
Nº viagens/mês	12
Fila média encontrada na cabine	1
Preço do Diesel [L]	R\$ 1,977
Taxa de juros aplicada	0,6% a.m.

Figura 63 - Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 07.**Tabela 35** - Resultados do estudo de caso – CAT 07.

TEMPO	V.P.L	T.I.R	ΔT (horas)	ΔCO_2 (ton.)
12 meses	R\$ 552,46	18,72%	26,52	1,12
24 meses	R\$ 1.231,89	28,52%	53,04	2,24
36 meses	R\$ 1.912,31	34,53%	79,56	3,37
48 meses	R\$ 2.593,71	38,80%	106,08	4,49
60 meses	R\$ 3.276,08	42,13%	132,60	5,61

Tabela 36 - Cenário do Estudo de Caso – CAT 09.

PARÂMETRO	VALOR
PBT [ton]	74
Nº pedágio/viagem	10
Nº viagens/mês	10
Fila média encontrada na cabine	4
Preço do Diesel [L]	R\$ 1,977
Taxa de juros aplicada	0,6% a.m.

Figura 64 - Gráfico de custo e benefício acumulado no ano – CAT 09.**Tabela 37** - Resultados do estudo de caso – CAT 09.

TEMPO	V.P.L	T.I.R	ΔT (horas)	ΔCO_2 (ton.)
12 meses	R\$ 748,31	21,88%	22,1	1,42
24 meses	R\$ 1.641,40	31,84%	44,2	2,83
36 meses	R\$ 2.535,48	37,89%	66,3	4,25
48 meses	R\$ 3.430,54	42,20%	88,4	5,66
60 meses	R\$ 4.326,57	45,57%	110,5	7,08

Agora, faz-se uma avaliação do número mínimo de passagens no pedágio necessárias para que a economia com combustível seja suficiente para o usuário arcar com o custo mensal do sistema.

A Tabela 38 mostra o número mínimo de passagens no período de um mês em função do tempo espera na fila para as diferentes categorias de caminhões.

Tabela 38 – Número mínimo de passagens mensais.

TEMPO DE ESPERA	Nº MÍNIMO DE PASSAGENS			
	CAT 03	CAT 05	CAT 07	CAT 09
1 x TC	38	29	21	16
2 x TC	33	26	19	15
3 x TC	29	24	18	14
4 x TC	26	21	16	14
5 x TC	23	20	15	13
6 x TC	21	18	15	12
7 x TC	20	17	14	12
8 x TC	18	16	13	11
9 x TC	17	15	12	11
10 x TC	16	14	12	10

4.7 ANÁLISE DE RESULTADOS E OBSERVAÇÕES

O objetivo da pesquisa relatado nesta dissertação foi avaliar quais as influências negativas da operação de uma praça de pedágio. Entretanto, uma análise holística da questão, leva-nos à outra reflexão. É do conhecimento de todos, que as concessões rodoviárias, que têm como consequência a tarifação e a instalação de cabines de cobrança, melhoram a qualidade das rodovias. Logo mais, a revisão da literatura

mostra que o mau estado de conservação das rodovias também apresenta impactos econômicos e ambientais. Cabe então, num trabalho futuro, confrontar esses dois aspectos.

No que diz respeito ao aumento do tempo de viagem, há que se considerar algumas limitações deste estudo. Para se obter um resultado consistente nesse quesito, deve-se analisar outras praças de pedágio, e principalmente elaborar um modelo de simulação que articule os diversos parâmetros que influenciam no tempo de atendimento.

Na questão do consumo de combustível podem ser destacados dois aspectos. Para obtenção do perfil de velocidade dos caminhões, deve-se realizar um estudo mais detalhado para determinar a desaceleração e aceleração ao longo da praça. A metodologia do teste é boa, mas em função do tempo e dos custos envolvidos, não foi possível levantar um banco de dados considerável. O programa simulador deve ser aprimorado no módulo troca de marchas, a fim de contabilizar a variável do comportamento do motorista na direção.

Tentou-se durante a realização desta pesquisa, analisar a qualidade do ar na região de operação da praça de pedágio. Para isso, foram coletadas amostras de ar próximas à região das cabines de cobrança a fim de avaliá-las em um analisador. Entretanto, a metodologia utilizada não deu certo. Acredita-se que o monóxido de carbono oxidou-se durante o tempo utilizado no transporte das amostras. Ainda, assim, a experiência durante a realização da coleta de dados, junto dos resultados de emissão de poluentes, mostrou que a qualidade do ar na região é comprometida devido ao elevado número de acelerações ocorrentes na área e ao mal estado de conservação da frota brasileira, o que pode acarretar danos à saúde dos funcionários.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam a hipótese de que a instalação da praça de pedágio contribui para o aumento do tempo de viagem, do consumo de combustível e da emissão de poluentes. Isso se dá pela alteração no perfil de velocidade, necessário para que o pagamento da tarifa seja efetuado.

Para a praça de pedágio Jacareí, o pagamento da tarifa na cabine manual de cobrança aumenta o tempo de viagem em 65,4 segundos para automóveis e 79,0 segundos para caminhões. O custo com combustível para efetuar uma transação na praça de pedágio varia em função da categoria do caminhão e do tempo de espera na cabine de atendimento. Os valores mínimos iniciam em R\$ 0,52, para um caminhão leve, encontrando a cabine vazia, podendo chegar até R\$ 1,52 no caso de um caminhão pesado encontrar uma fila com nove veículos na sua frente.

A possibilidade do pagamento da tarifa com o veículo em movimento se apresenta como uma boa solução econômico ambiental para esta questão. A utilização do conceito *Open Road Tolling* - *ORT* é a maneira mais eficiente de se cobrar a tarifa, já que simula a condição de não existência do pedágio, ou seja, não altera o perfil de velocidade dos veículos.

A utilização do sistema de cobrança eletrônica através da identificação automática de veículos – AVI apresenta grandes vantagens aos usuários. No que diz respeito aos benefícios com relação à economia de tempo, pode-se observar uma redução de aproximadamente 60% do tempo necessário para cruzar a praça de pedágio em estudo. Em se tratando de benefícios econômicos, a depender da categoria do caminhão e do tamanho da fila de espera no atendimento, a utilização do sistema possibilitou uma redução de até 89% do consumo combustível necessário para cruzar a praça de pedágio em estudo. Além disso, o estudo de caso mostra que o investimento gasto com a aquisição do aparelho que faz o reconhecimento eletrônico

é facilmente recuperado ao longo do ano, gerando economia ao usuário a partir de então.

Com relação ao impacto ambiental, a pesquisa se mostra como uma importante fonte de informações para tomada de decisões, tanto por parte das concessionárias de rodovias no que diz respeito às melhorias na elaboração de projetos e construção de novas praças de pedágio, tanto por parte do governo, no que diz respeito à utilização do pedágio como regulador de trânsito nas rodovias e grandes cidades.

Nesse sentido, o estudo apresentou interesses relevantes dentro do pensar melhores condições e possibilidades para o cenário rodoviário brasileiro, além de versar sobre questões que abrigam discussões importantes tanto para a economia do usuário em si, quanto para a questão ambiental como um todo.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista as possibilidades de aprimoramento deste estudo já destacadas, e a necessidade crescente de se realizar pesquisas que abriguem aspectos econômicos e ambientais, faz-se a seguir uma série de recomendações e sugestões para trabalhos futuros:

- Fazer a integração de modelos de simulação de tráfego com o modelo de consumo de combustível utilizado a fim de obter resultados mais precisos e realísticos.
- Realizar um estudo da qualidade do ar nas praças de pedágio de modo a contemplar a dispersão dos poluentes na região.
- Implementar no programa simulador o mapa de emissão de poluentes dos motores, afim de se obter valores representativos de todas as emissões resultantes da combustão.
- Confrontar os impactos econômicos ambientais da instalação das cabines de cobrança com as melhorias no estado de conservação das rodovias.
- Estudar outras praças de pedágio a fim de comparação de resultados e de caracterização das praças de pedágio em função do custo de transação.

- Avaliar o consumo de combustível de automóveis e motocicletas cruzando a praça de pedágio.
- Avaliar a utilização do pedágio como regulador de tráfego em grandes cidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-DEEK, H. M. et al. (1996). **Improvements in Traffic Operations at Electronic Toll Collection Plazas in Orlando**. Third Annual Meeting of the ITS World Congress, Orlando, Florida, Outubro 14-18.

ÁLVARES, O.M.; LINKE, R.R.A. (2003). **Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**. 2003. Disponível em: <<http://www.cetesb.gov.br>>. Acesso em: 21 abril 2010.

ANP (2009). **Agência Nacional do Petróleo**. Disponível em http://www.anp.gov.br/doc/petroleo/relatorios_precos/2009/Diesel_032009.pdf, Acesso em: 21 abril de 2010.

ARAÚJO, J. J. (2001). **Características operacionais de praças de arrecadação de pedágio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

ARAÚJO, P. H. (2009). **As complexas relações sociais dos caminhoneiros do Porto de Santos**. Revista da RET, Ano III, Número 4.

BARAT, J. (1991). **Transporte e energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil S.A.

BARAT, J. et al. (2007). **Logística e transporte no processo de globalização**. São Paulo: Unesp : IEEI.

BARTHOLOMEU, D.B.; CAIXETA, J.V.F., (2008). **Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras: um estudo de caso**, RESR, Piracicaba, SP, vol. 46, nº 03, p. 703-738, jul/set 2008.

BARTIN, B.; MUDIGONDA, S.; OZBAY, K. (2006). **Estimation of the impact of electronic toll collection on air pollution levels using microscopic simulation model of a large-scale transportation network**. Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Agosto.

BENNETT, C. R.; DUNN, R. C. M. (1995). **Driver Deceleration Behaviour on a Freeway in New Zealand**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., nº 1510, pp. 70 – 75.

BRASIL (2006). Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Estudos do tráfego**. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL (2007). Ministério da Ciência e Tecnologia e Departamento Nacional de Política Energética. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2007. Disponível em: http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageld=17036 > Acesso em 20 de maio de 2009.

CANALE, A. C. (1989). **Automobilística: dinâmica e desempenho (Vol. I)**. São Paulo, Érica Editora LTDA.

CANALE, A. C. (1991). **Estudo do desempenho de autoveículos rodoviários considerando o passeio do centro de gravidade e restrições impostas pelo binômio pneumático x pavimento**. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

CANALE, A. C. (2004). **Desempenho de autoveículos rodoviários**.

CANALE, A. C. et al. (1997). **Consumo de combustível de veículos comerciais em velocidade constante**. Simpósio de Engenharia Automotiva. São Paulo: SIMEA. 1997. p. 83-89.

CANALE, A. C. (2009). **Simulação de consumo de combustível, desempenho e histogramas de carga de um veículo trafegando em trechos mapeados por GPS de rodovias com diferentes caixas de mudança de marchas e diferentes estratégias de troca de marchas**. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CETESB (2008). **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2007**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, 2008.

DANDO, M. (1997). **Electronic Toll Market**. ITS: Intelligent Transport Systems, n. 8, p.56 – 58.

DEPETRIS, A. D. (2005). **Desenvolvimento e aplicação de um programa em MatLab Simulink para a simulação do desempenho de veículos rodoviários comerciais em movimento acelerado**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DINIZ, J.B. (2009). **Desenvolvimento e validação de um software para simulação de consumo de combustível veicular**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DUARTE, F. M. R. (2009). **Concessão e administração de rodovias**. Porto Alegre: Notadez.

FREITAS, M. K. (2003). **Investigação da produção e dispersão de poluentes do ar no ambiente urbano : determinação empírica e modelagem em rede neural da concentração de CO**. Dissertação (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GARDINALLI, G. J. (2005). **Comparação do desempenho de frenagem simulada x experimental de um veículo de passeio com freios hidráulicos e ABS**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

GILLESPIE, T. D. (1992). **Fundamentals of vehicle dynamics**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers.

GIÓRIA, G. D. S. (2008). **Influência da utilização do ABS na segurança veicular baseada na eficiência de frenagem e na probabilidade de travamento de roda**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GUTIÉRREZ, J. C. H. (2005). **Estudo do desempenho da frenagem e do controle da velocidade em declive longo e acentuado no trecho da Serra do Mar da Rodovia dos**

Imigrantes de veículos comerciais representativos da frota nacional. Tese (Pós-Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

HEISLER, H. (2002). **Advanced Vehicle Technology.** 2. ed. [S.l.]: Butterworth Heinemann.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (1998). **Redução das Deseconomias Urbanas Com a Melhoria do Transporte Público.** Relatório Final, Agência Nacional Transporte Público, 1998.

KLODZINSKI, J.; GORDIN, E.; AL-DEEK, H.M. (2007). **Evaluation of Impacts of Open Road Tolling on Main-Line Toll Plaza.** Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., n° 2012, pp. 72–83.

LI, J.; GILLEN, D.; DAHLGREN, J. (1999). **Benefit-Cost evaluation of the electronic toll collection system: a comprehensive framework and application.** Transportation Research Board 78th Annual Meeting, Washington, D.C., January 10-14.

LIMPERT, R. (1989). **Motor vehicle accident reconstruction and cause analysis.** Charlottesville: USA, Michie, 443p.

LU, J.J. et al. (1997). **Automatic Vehicle Identification Technology Applications to Toll Collection Services.** Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., n° 1588, pp. 18–25.

MATTOS, L. B. R. (2001). **A Importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa – O Caso do Município do Rio de Janeiro.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

NAVARRO, H. A. (1997). **Desempenho na aceleração e consumo de combustível de veículos rodoviários comerciais.** Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

NETO, A.L.V. (2007). **Pedágios, até que ponto os benefícios compensam os custos.** Disponível em www.ntcelogistica.org.br/arquivos/tecnicos/Pedagiosfinal2008.pdf, acesso em 29 maio de 2009.

PESQUERA, C.I.; GONZÁLEZ, S. L.L CONTRERAS, C. M. (1997). **Short-Term Improvements to Increase Capacity of Highly Congested Mainline Toll Plazas in Puerto Rico.** Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 41 – 48.

POLITO, R. F. (2005). **Estudo do desempenho na frenagem de um bi-trem com suspensão em tandem e com ABS.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

POLUS, A.; RESHETNIK, I. (1997). **A new concept and a manual for toll plaza planning.** Canadian Journal of Civil Engineering, v. 24, n. 4, p. 532 – 538.

SCHIPPER, L.; MARIE-LILLIU, C. (1999). **Transportation and CO2 emissions: Flexing the Link - a path for the World Bank.** Washington, DC: The World Bank Environment Department and The Transport, Water and Urban Unit, Climate Change Series.

SCHROEDER, R. B. P. B. (1962). **Das características técnicas dos veículos rodoviários utilitários fabricados no Brasil**, Tese (Livre-Docência), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1962.

SPASOVIC, L. N. (1995). **Primer on Electronic Toll Collection Technologies**. Transportation Research, Washington, D.C., nº 1516, pp. 01-10

WATANATADA, T. et al. (1987). **Then highway design and maintenance standards model – description of the HDM-III model**, Washington, D.C., Transportation Department, World Bank.

ANEXO A : CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS

A classificação dos veículos adotada pelo DNIT apresenta as configurações básicas de cada veículo ou combinação de veículos, bem como número de eixos, seu PBT máximo e sua classe. Entende-se por configuração básica a quantidade de unidades que compõem o veículo, os números de eixos e grupos de eixos, independentemente da rodagem, apresentados sob a forma de silhueta.

A rodagem é definida pela quantidade de pneumáticos por eixo. Assim sendo, rodagem simples indica que cada eixo possui apenas 1 (um) pneumático em cada extremidade e rodagem dupla, cada eixo possui 2 (dois) pneumáticos em cada extremidade.

Os eixos equipados com pneus extra largos (single) na medida 385/65R22.5 são considerados como eixos com rodagem dupla e só podem ser utilizados em reboques e semi-reboques conforme a Resolução n.º 62, de 22 de maio de 1998, do CONTRAN.

As diversas classes são representadas por um código alfanumérico, por exemplo, 2S3. No código adotado, o primeiro algarismo representa o número de eixos do veículo simples ou da unidade tratora, enquanto que o segundo algarismo, caso exista, indica a quantidade de eixos da(s) unidade(s) rebocada(s).

As letras significam:

C = veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator + reboque;

S = veículo trator (cavalo mecânico) + semi-reboque;

I = veículo trator + semi-reboque com distância entre-eixos > 2,40 m (eixos isolados);

J = veículo trator + semi reboque com um eixo isolado e um eixo em tandem;

D = combinação dotada de 2 (duas) articulações;

T = combinação dotada de 3 (três) articulações;

Q = combinação dotada de 4 (quatro) articulações;

X = veículos especiais;

B = ônibus.

Exemplos:

3C = caminhão simples com 3 eixos

3C3 = caminhão simples com 3 eixos + 1 reboque com 3 eixos

2S3 = caminhão trator (cavalo mecânico) com 2 eixos + semi-reboque com 3 eixos

2I2 = caminhão trator com 2 eixos + semi-reboque com 2 eixos isolados

3D3 = caminhão simples com 3 eixos + reboque especial com 3 eixos

3Q4 = caminhão simples com 3 eixos + 2 reboques com 4 eixos - treminhão

3T6 = caminhão trator com 3 eixos + 2 ou 3 semi-reboques com 6 eixos - rodotrem ou tritrem

3X6 = caminhão trator com 3 eixos + reboque com 6 eixos - carga excepcional

Para os veículos simples existem as classes:

2CB – exclusiva para ônibus dotado de 2 (dois) eixos, sendo o traseiro de rodagem dupla.

3CB - exclusiva para ônibus dotados de conjunto de eixos traseiro duplo, um com 4

(quatro) e outro com 2 (dois) pneumáticos;

4CB - exclusiva para ônibus dotados de 2 (dois) eixos direcionais;

Manual de Estudos de Tráfego 49

MT/DNIT/DPP/IPR

4CD - exclusiva para caminhões dotados de 2 (dois) eixos direcionais.

A classe X é composta por combinações de veículos para carga especializada, com mais de 9 (nove) eixos, para o transporte de cargas excepcionais em peso ou dimensões, trafegando com AET.

Além dessas classes de veículos comerciais são incluídas as definições usuais para veículos leves, necessárias para estudos de tráfego e de capacidade.

P – Carro de Passeio, com dois eixos com rodagem simples, incluindo jeeps e kombis.

U – Veículo Utilitário, com dois eixos com rodagem simples, compreendendo caminhões

leves (2 eixos com rodagem simples), pick-ups, furgões, vans e microônibus.

M – Motocicletas, motonetas e bicicletas a motor.

B – Bicicletas.

Tabela A1 – Veículos adotados na classificação do DNIT.

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16(16,8)	CAMINHÃO E1 = eixo simples (ES), rodagem simples (RS), carga máxima (CM) = 6t ou capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ES, rodagem dupla (RD), CM = 10t $d12 \leq 3,50m$	2C
	3	23(24,2)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = ES, RS, CM = 6t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t $d12 > 2,40m$ $1,20m < d23 \leq 2,40m$	3C
	3	26(27,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM = 6t E2 = ED, RD, CM = 10t E3 = ED, RD, CM = 10t $d12, d23 > 2,40m$	2S1
	4	31,5(33,1)	CAMINHÃO SIMPLES E1 = ES, RS, CM 6t E2E3E4 = conjunto de eixos em tandem triplo TT; CM = 25,5t $d12 > 2,40$ $1,20m < d23, d34 \leq 2,40m$	4C
	4	29(30,5)	CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais CED, CM = 12t E3E4 = TD, CM = 17t $1,20m < d34 \leq 2,40m$	4CD
	4	33(34,7)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3E4 = TD, CM = 17t $d12, d23 > 2,40m$ $1,20m < d34 \leq 2,40m$	2S2
	4	36(37,8)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t $d12, d23, d34 > 2,40m$	2I2

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	4	33(34,7)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t d12, d34 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40	3S1
	4	36(37,8)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10m d12, d23, d34 > 2,40m	2C2
	5	41,5(43,6)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD CM10t E3E4E5 = TT, CM 25,5t d12, d23 > 2,40m 1,20m d34, d45 ≤ 2,40m	2S3
	5	40(42)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM17t E4E5 = TD, CM 17t d12, d34 > 2,40m 1,20m < d23, d45 ≤ 2,40m	3S2
	5	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d23, d34, d45 > 2,40m	2I3
	5	43(45,2)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2J3
	5	43(45,2)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3I2

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	5	43(45,2)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2C3
	5	43(45,2)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3C2
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5E6 = TT, CM 25,5t d12, d34, > 2,40m 1,20m < d23, d45, d56 ≤ 2,40m	3S3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45, d56 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3I3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3J3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3C3
	6	19,5(20,5)	CAMINHÃO TRATOR E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD(6 pneus), CM 13,5t 1,20m < d23 ≤ 2,40m A CMT do conjunto vai variar conforme a capacidade do semi-reboque, no mínimo 10 ton até, no máximo o limite legal de 4r ton.	X

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	6	50(52,5)	ROMEU E JULIETA(caminhão trucado + reboque) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3D3
	7	57(59,9)	ROMEU E JULIETA(caminhão trucado + reboque) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t d12, d34, d56 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67 ≤ 2,40m	3D4
	7	57(59,9)	BI TREM ARTICULADO(caminhão trator trucado + dois semi reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t d12, d34, d56 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67 ≤ 2,40m	3D4
	7	63(66,2)	TREMINHAO(caminhão trucado + dois reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t E7 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d56, d67 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3Q4
	9	74(77,7)	TRI TREM(caminhão trator trucado + três semi reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t E8E9 = TD, CM 17t d12, d34, d56, d78 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67, d89 ≤ 2,40m	3T6

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	9	74(77,7)	RODOTREM (caminhão trator trucado + dois semi reboques dom dolly) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t E8E9 = TD, CM 17t d12, d34, d56, d78 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67, d89 ≤ 2,40m	3T6
	2	16(16,8)	ÔNIBUS E1 = ES, RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t d12 ≤ 3,50m	2CB
	3	19,5(20,5)	ÔNIBUS TRUCADO E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t d12 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40m	3CB
	4	25,5(26,8)	ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais, carga máxima 12 ton E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t 1,20 < d34 ≤ 2,40m	4CB
	3	26(27,3)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t d12, d23 > 2,40m	2SB1
	4	36(37,8)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t d12, d23, d34 > 2,40m	2IB2