

ARTIGO

SIMULAÇÃO OPERACIONAL DA PESAGEM DE VEÍCULOS DE CARGA EM POSTOS RODOVIÁRIOS DO ESTADO DO CEARÁ

Carlos Felipe Grangeiro Loureiro
Marcos José Timbó Lima Gomes

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

Este artigo descreve o desenvolvimento e a aplicação de modelos estocásticos para simular a pesagem de veículos de carga em postos rodoviários do estado do Ceará. Numa primeira etapa, foram realizados os levantamentos de campo e as análises dos dados necessários à calibração e à validação dos modelos de simulação das operações de pesagem e autuação dos veículos de carga. Em seguida, os modelos propostos foram aplicados para as diferentes rodovias candidatas à implantação de postos fixos de pesagem, permitindo avaliar o efeito da variação do volume de tráfego pesado (caminhões carregados) e do percentual de veículos trafegando com excesso de peso, sobre as variáveis de projeto (área do pátio de estocagem dos veículos a serem pesados por número de balanças utilizadas, área do pátio de estacionamento dos veículos autuados) e as variáveis operacionais (tempo médio de espera na fila para pesagem e para autuação).

ABSTRACT

This paper describes the process of developing and applying stochastic models for simulating the operation of truck weight stations in the state of Ceará, Brazil. First, field studies and data analyses were carried out to calibrate and validate the simulation models. Secondly, the proposed models were applied to the

roadways candidate to have a weight station installed, allowing the assessment of the impact of variable traffic volumes (loaded trucks) and different percentages of overloaded vehicles on the design variables (weighing queue storage area by number of scales, parking area for non-compliant trucks) and on the operational variables (average time in the weighting and fine issuing lines).

1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária do estado do Ceará apresenta uma extensão de mais de 7.000 km de rodovias pavimentadas, dos quais 64% estão sob jurisdição estadual e 29% sob jurisdição federal. Em 1994, o Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes – DERT, órgão rodoviário estadual, adquiriu um conjunto de seis balanças móveis e, desde então, vem realizando, de forma não sistemática, operações de pesagem nas rodovias sob sua jurisdição. No segundo semestre de 2000, o DERT assinou um contrato com o Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará – DET/UFC para a realização do *Estudo de Concepção e Especificação do Sistema de Pesagem de Veículos de Carga no Estado do Ceará – Operação Conjunta DERT/SEFAZ/DNER* (ASTEF, 2001), com o objetivo de propor uma sistematização do controle de carga por eixo nas rodovias estaduais e federais do Estado, através da implantação de um conjunto de postos permanentes de controle de pesagem de veículos de carga.

Este estudo contemplou, inicialmente, um levantamento de dados compreendendo a identificação da malha rodoviária do Ceará, o levantamento dos projetos estruturantes, recuperação e tabulação dos dados de pesagem do DERT e volume de tráfego das rodovias. A partir dos dados recuperados, foi concebido, desenvolvido e implementado um sistema de informações referenciadas geograficamente (SIG) que possibilitará a análise espacial e o gerenciamento futuro do sistema de pesagem proposto. Em seguida, foram pré-selecionados 78 trechos de rodovias candidatos à monitoração de pesagem. Os trechos selecionados foram então hierarquizados e categorizados com base no indicador $FV \times VMDa$, onde FV é o fator de veículos que representa a magnitude das cargas e $VMDa$ é o volume médio anualizado de caminhões carregados no

trecho. Por fim, dimensionados os postos e definida a tecnologia de pesagem proposta, foi feito um estudo de viabilidade econômica para seis diferentes cenários de programa de controle da carga, cada um definido como função de uma estratégia de implantação que levava em consideração a questão institucional relacionada à jurisdição da rodovia, assim como um sistema de controle que fosse viável economicamente (Soares *et al.*, 2001).

1.1. Motivação para o desenvolvimento de um modelo de simulação

De modo a subsidiar o dimensionamento e a definição do *lay-out* físico dos postos selecionados, especialmente no que concernia à determinação do número de balanças em operação, ao dimensionamento da área de estocagem dos veículos a serem pesados, assim como do pátio de estacionamento dos veículos autuados, foi realizado um estudo de simulação estocástica com vistas a caracterizar o processo de chegada dos veículos no posto e as rotinas operacionais do procedimento de pesagem. Como não existiam postos permanentes de pesagem em operação no estado do Ceará, este estudo operacional foi realizado utilizando-se as balanças móveis do DERT.

Portanto, este artigo descreve as atividades desenvolvidas e os resultados obtidos neste estudo. Numa primeira etapa, foram realizados os levantamentos de campo e as análises dos dados necessários ao desenvolvimento, à calibração e à validação de um modelo de simulação da operação de pesagem e autuação de veículos de carga. Em seguida, o modelo de simulação proposto foi aplicado para as diferentes rodovias candidatas à implantação de postos fixos de pesagem, permitindo avaliar o efeito da variação do volume de tráfego pesado (caminhões carregados) e do percentual de veículos trafegando com excesso de peso, sobre as variáveis de projeto (área do pátio de estocagem dos veículos a serem pesados por número de balanças utilizadas, área do pátio de estacionamento dos veículos autuados) e as variáveis operacionais (tempo médio de espera na fila para pesagem e para autuação).

2. APLICAÇÕES DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA EM TRANSPORTES

Modelos probabilísticos de teoria clássica das filas têm sido aplicados na solução dos mais diversos problemas em Transportes (Novaes, 1975). Entretanto, quando a abordagem matemática torna-se bastante complexa para a formulação proposta, ou quando esta metodologia não se apresenta confiável, como no caso da operação de praças de pedágio (Lin e Su, 1994), recorre-se à simulação estocástica para criar um modelo que represente mais fielmente o sistema real. Há várias vantagens na aplicação desta técnica (Winston, 1994):

- Capacidade de avaliar e prever impactos em sistemas ainda inexistentes ou de custos onerosos, caso se observe diretamente no mundo real;
- Melhor compreensão do sistema existente, através da variação de parâmetros e verificação de seus efeitos;
- Coletar dados sobre o sistema e usá-los como estimadores de medidas de desempenho;
- Ajudar a definir novas políticas e diminuir riscos na tomada de decisão para a operação de sistemas, antes de experimentar no sistema real.

Com o avanço computacional observado nas últimas décadas, o uso da simulação tem-se difundido como ferramenta útil de subsídio ao processo de gerência e tomada de decisão em Transportes, especialmente em problemas relacionados à operação de terminais portuários (Cardoso e Teles, 1997), aeroportuários (Feitosa e Porto, 1998), de praças de pedágio (Araújo e Setti, 2000), como também de postos de pesagem de veículos de carga (Kamyab *et al.*, 1998).

Dentro do ambiente computacional, existem linguagens de programação, tais como FORTRAN e PASCAL, que são muito utilizadas para criação de programas de simulação. Entretanto, o desenvolvimento de modelos estocásticos com linguagens de alto

nível requer um conhecimento aprofundado da técnica de programação, dificultando seu uso. Com o surgimento de linguagens genéricas de simulação (GPSS, ARENA, SIMSCRIPT, dentre outras), esta dificuldade diminuiu, disseminando a aplicação destes modelos na abordagem dos mais diversos problemas práticos (sistemas bancários, linhas de produção, etc.).

No desenvolvimento do modelo apresentado neste trabalho, conforme detalhado mais adiante, foi utilizado o programa de simulação GPSS/H, uma versão para DOS da linguagem GPSS - *General Purpose Simulation System* (Schriber, 1974). O GPSS pode ser considerado como uma linguagem de programação altamente estruturada, com cerca de 40 comandos que representam blocos de linhas de programação escritas em FORTRAN. Portanto, para se construir um modelo, basta combinar um conjunto de blocos seguindo um fluxograma, de tal forma que este represente o trajeto a ser seguido pelas entidades (transações) dentro do sistema modelado.

Para a elaboração de um modelo de simulação bem sucedido é indispensável, além da escolha da linguagem computacional mais apropriada e do conhecimento da técnica em si, os seguintes requisitos: (i) uma correta formulação do problema; (ii) dados em quantidade suficiente e qualitativamente confiáveis; e (iii) a utilização de procedimentos estatísticos adequados para a calibração e a validação do modelo, assim como para a interpretação dos seus resultados.

3. PLANEJAMENTO E REALIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Conforme mencionado no item introdutório, o desenvolvimento do modelo de simulação aqui descrito se baseou na execução de uma experiência piloto de pesagem de veículos de carga, planejada de modo a compreender as seguintes etapas:

- Escolha de dois postos de fiscalização fazendária ou de policiamento rodoviário, um localizado em rodovia estadual e outro em rodovia federal, para servirem como pontos de apoio

para a realização da operação piloto de pesagem utilizando o equipamento móvel eletrônico do DERT, além do pessoal técnico daquele órgão, nos moldes então adotados na determinação do excesso por eixo e PBT de veículos de carga em rodovias estaduais;

- Contagens volumétricas e classificatórias do tráfego de veículos nos segmentos das rodovias onde estavam localizados os postos escolhidos para a operação piloto de pesagem;
- Definição dos parâmetros operacionais, relativos à experiência piloto de pesagem (data, período de duração, esquema de operação, equipe de pesquisadores, dentre outros), com base nas contagens de tráfego mencionadas acima e nas características físicas dos postos escolhidos;
- Instalação da balança móvel do DERT em cada posto selecionado para a consecução da operação piloto de pesagem;
- Realização da operação piloto de pesagem (pesquisa de campo), segundo padrão-DERT.

Optou-se por classificar a operação piloto de “padrão-DERT”, devido a mesma ser realizada utilizando o equipamento e a tecnologia de balanças móveis atualmente disponível no DERT. Vale salientar que todos os parâmetros operacionais obtidos a partir desta operação piloto, assim como o decorrente modelo de simulação, são inerentes não só ao tipo de equipamento utilizado, como também aos procedimentos operacionais e metodológicos adotados atualmente nas pesagens realizadas pelo DERT. Em outras palavras, caso os equipamentos e/ou procedimentos implantados nos futuros postos de pesagem sejam diferentes dos atualmente utilizados pelo DERT (recomendação do estudo realizado), espera-se encontrar discrepâncias entre os parâmetros operacionais estimados pelo modelo e os valores observados futuramente em campo. De qualquer maneira, o modelo inicialmente desenvolvido resulta em um dimensionamento mais conservador (dadas às limitações do equipamento atualmente utilizado), que poderá ser revisto após a implantação do primeiro posto operado pela nova tecnologia, com a

calibração de um novo modelo de simulação com a mesma formulação do aqui proposto. Ademais, similarmente ao modelo desenvolvido por Kamyab *et al.* (1998) para avaliar os benefícios operacionais da identificação automática dos veículos em postos de pesagem, outras alternativas tecnológicas poderão ser avaliadas futuramente, também via simulação.

3.1. Definição dos Parâmetros Operacionais da Pesquisa de Campo

Os parâmetros operacionais, considerados relevantes para a análise objeto deste estudo, compreenderam:

- a) Local, data, horário e período de duração das duas operações piloto;
- b) Esquema funcional;
- c) Equipes de pesquisadores;
- d) Variáveis operacionais:
 - intervalo de chegada dos veículos no posto;
 - tempo de espera na fila para pesagem;
 - tamanho da fila para pesagem;
 - tempo de pesagem;
 - tempo gasto no estacionamento dos veículos a serem autuados;
 - tempo de espera na fila para autuação;
 - tamanho da fila para autuação;
 - tempo de autuação;
 - tempo total de permanência no posto.
- e) Formulários de coleta dos dados referentes às variáveis operacionais.

Os dois locais escolhidos para a realização das operações piloto foram o posto fiscal da Secretaria da Fazenda Estadual – SEFAZ, localizado na BR-222 (proximidades da sede do município de Caucaia) e, para representar uma rodovia estadual, optou-se pelo

posto de fiscalização da polícia rodoviária (CPRV), localizado na CE-060 (município de Quixadá).

Definidos os postos, foram realizadas contagens volumétricas e classificatórias do tráfego geral em ambos os trechos rodoviários, num período de 7 (sete) dias consecutivos, com volumes registrados em intervalos de 15 minutos, 24 horas por dia. Os objetivos destas contagens foram: (i) a observação dos dias e períodos de pico do tráfego de caminhões carregados; (ii) a estimativa da magnitude do volume de caminhões a serem pesados por hora, caso se optasse pela pesagem de 100% do tráfego carregado; e (iii) a determinação do tamanho da amostra e do período de coleta dos dados.

Nas imediações do Posto da BR-222 (Caucaia) foram observados VMD's da ordem de 5.000 a 6.000 veículos/dia, com distribuição direcional uniforme. O volume de caminhões correspondeu a cerca de 15 a 20% do tráfego geral, com distribuição uniforme ao longo dos dias úteis e picos horários no período da manhã (8:00 às 12:00 hs), com os maiores volumes horários variando entre 50 e 70 caminhões/hora. Já o tráfego geral da CE-060, na seção do Posto de Quixadá, foi bastante inferior ao da BR-222, com VMD's variando entre 1.500 e 1.800 veíc./dia, apresentando um volume médio horário de caminhões no período de pico entre 10 e 15 caminhões/hora.

3.2. Realização da Pesquisa de Campo

Com base no comportamento do tráfego pesado de ambas as rodovias, optou-se por realizar as operações piloto no período da manhã, entre 8:00 e 11:00 horas. Definiu-se, também, que a amostra de caminhões a serem pesados neste período deveria, na medida do possível, aproximar-se de 100% dos caminhões carregados, com apenas uma balança móvel do DERT sendo suficiente para efetuar tal operação. Durante as duas operações piloto, uma equipe composta por três operadores de balança do DERT ficou responsável pela orientação dos motoristas, pesagem dos caminhões e preenchimento da guia de autuação nos casos de excesso de peso. Simultaneamente, uma outra equipe, formada por nove pesquisadores (alunos de graduação da UFC), colheu informações referentes aos intervalos de chegada dos caminhões no posto, aos tempos de espera na fila para

pesagem, aos tempos gastos na pesagem, aos tempos de espera na fila para autuação e aos tempos gastos no preenchimento da guia de autuação. Uma nova contagem do tráfego foi implementada em ambos os trechos, somente durante a realização da operação piloto, com o intuito de se determinar a porcentagem de caminhões carregados que foram pesados, bem como estabelecer uma comparação entre o tráfego no dia da operação e aquele observado durante os sete dias de contagem contínua.

Os dados levantados em campo foram digitados, tabulados e consolidados em planilhas EXCEL. Vale salientar que o número de caminhões pesados na operação piloto da BR-222 (equivalente a todos os caminhões carregados que passaram pelo posto durante a operação) foi bastante inferior ao volume indicado na contagem realizada anteriormente. A contagem havia indicado um volume de cerca de 150 caminhões (carregados e vazios) para o mesmo período e dia da semana da operação, número este aproximadamente duas vezes superior ao volume observado no horário da operação.

Um fato que pode ajudar a explicar esta diferença foi a parada de vários caminhões num posto de combustíveis, localizado a montante do Posto de Caucaia, durante a realização da operação de pesagem. Observou-se que os motoristas se comunicavam entre si, alertando sobre a existência da balança. Tal fenômeno não foi verificado na operação de Quixadá, provavelmente pelo fato do DERT já vir, embora de forma não sistemática, há vários anos realizando pesagens na malha sob jurisdição estadual (o DNER não realiza pesagens nas rodovias federais do Ceará, nem permite que o DERT o faça). Outro aspecto a ser destacado refere-se ao elevado percentual de caminhões trafegando com excesso de peso na BR-222, detectado na operação piloto de Caucaia como da ordem de 50%, quando comparado ao percentual de cerca de 10% observado na CE-060, no posto de Quixadá.

4. CALIBRAÇÃO DAS FUNÇÕES DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS

Com os parâmetros operacionais identificados nas duas operações piloto de pesagem, partiu-se para calibrar as funções de

probabilidade que melhor pudessem descrever as variáveis aleatórias do modelo de simulação operacional dos postos de pesagem, quais sejam:

- Intervalo de chegada entre caminhões;
- Tempo requerido para a operação de pesagem;
- Tempo requerido para a operação de estacionamento do veículo no pátio;
- Tempo requerido para a operação de autuação (preenchimento da guia).

A metodologia de calibração contemplou, inicialmente, a identificação dos valores médios amostrais, com seus respectivos desvios padrões, para cada uma das quatro variáveis em estudo. Em seguida, foram desenvolvidos intervalos de confiança para estimativa dos parâmetros médios populacionais. Por último, foram realizados testes de aderência (Qui-Quadrado) para distribuições de probabilidade conhecidas.

4.1. Distribuição de Probabilidade dos Intervalos de Chegada dos Caminhões

Para o Posto de Caucaia (BR-222), a amostra da variável *intervalo de chegada* continha 54 observações, apresentando um valor médio de 2'51", com desvio padrão de 3'41". Os dados amostrais foram agrupados numa distribuição de frequência com 6 classes de amplitude de 2'00". Procedeu-se, então, a um teste de aderência Qui-Quadrado (χ^2), para verificar se esta variável poderia ter seu comportamento descrito por uma Distribuição Exponencial, com um nível de significância de 5%. Conforme corroborado pela Figura 1, não se pode rejeitar a hipótese nula, com valor-p superior a 10%. Já para o Posto de Quixadá (CE-060), a amostra continha 35 observações, apresentando um valor médio de 5'05", com desvio padrão de 5'00". Novamente, não se pode rejeitar a hipótese nula de Distribuição Exponencial para os intervalos de chegada, com valor-p superior a 50% (ver Figura 1).

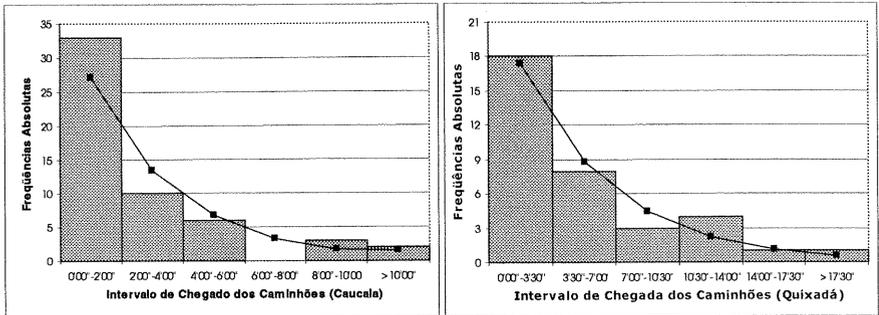


Figura 1: Distribuições de Frequências Observadas e Esperadas (Exponencial) para a Variável Intervalo de Chegada dos Caminhões

4.2. Distribuição de Probabilidade dos Tempos de Pesagem

Com relação à variável *tempo de pesagem*, foram coletadas 55 observações no Posto de Caucaia (BR-222), com uma média amostral de 1'01" e desvio padrão de 33". Foi testada e não rejeitada a hipótese nula de aderência à Distribuição Normal, com valor-p superior a 50%. Para o Posto de Quixadá (CE-060), foram coletadas 36 observações, com uma média amostral de 45" e desvio padrão de 16". Também neste caso, não se pode rejeitar a hipótese nula de aderência à Distribuição Normal, com valor-p superior a 10%. Os gráficos da Figura 2 apresentam as distribuições de frequências observadas e esperadas em ambos os postos.

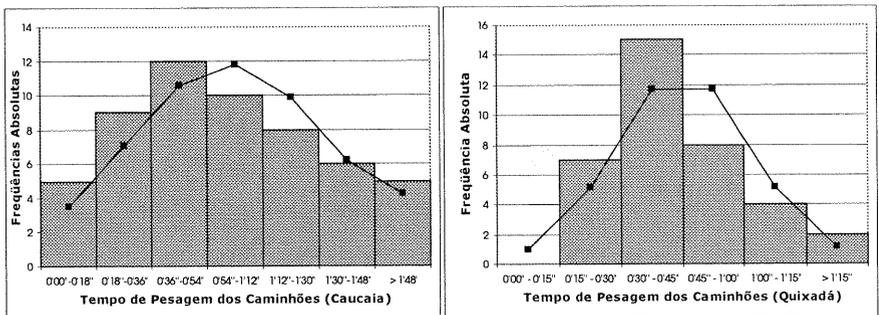


Figura 2: Distribuições de Frequências Observadas e Esperadas (Normal) para a Variável Tempo de Pesagem dos Caminhões

4.3. Distribuição de Probabilidade dos Tempos de Autuação

Com relação à variável *tempo de autuação*, foram coletadas 31 observações no Posto de Caucaia (BR-222), com uma média amostral de 3'00" e desvio padrão de 1'01". Da mesma forma que nos tempos de pesagem, foi testada e não rejeitada a hipótese nula de aderência dos tempos de autuação à Distribuição Normal, com um valor-p bastante elevado, superior a 95%. Como o número de veículos autuados no Posto de Quixadá (CE-060) foi muito pequeno, supôs-se que o tempo de autuação neste posto também poderia ser representado por uma Distribuição Normal. A Figura 3 mostra a comparação entre as distribuições observadas e esperadas para os dados do Posto de Caucaia (BR-222).

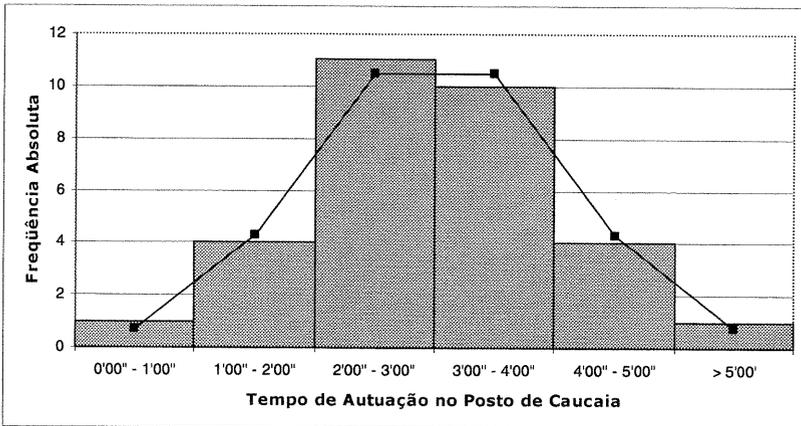


Figura 3: Distribuições de Frequências Observadas e Esperadas (Normal) para a Variável Tempo de Autuação no Posto de Caucaia (BR-222)

4.4. Distribuição de Probabilidade dos Tempos de Estacionamento

Em virtude do número reduzido de observações desta variável nos dois postos, devido à grande maioria dos veículos autuados não ter sido direcionada para o pátio de estacionamento existente em cada posto, não foi possível se proceder a um teste de aderência para a distribuição de probabilidade desta variável. Admitiu-se, portanto, que os tempos de estacionamento seguiam uma Distribuição Normal,

com média e desvio padrão obtidos por estimação pontual, respectivamente iguais a 150" e 90".

4.5. Estimativas Intervalares dos Parâmetros Médios Populacionais

Antes de se partir para o desenvolvimento do modelo de simulação, foram realizadas estimativas intervalares das médias populacionais das variáveis *tempo de pesagem* e *tempo de autuação*, com nível de significância de 5%, para se testar as hipóteses nulas de igualdade de parâmetros médios nas operações dos dois postos pesquisados. O intervalo de confiança do tempo médio de pesagem para o Posto de Caucaia foi de 52" a 70". Já para o Posto de Quixadá, os limites foram de 40" a 50". Portanto, rejeitou-se a hipótese nula de tempos médios iguais nos dois postos. A justificativa para tempos de pesagem distintos nas duas operações, realizadas pela mesma equipe e utilizando o mesmo equipamento, reside no fato dos motoristas que trafegam pelas rodovias estaduais já estarem familiarizados com o procedimento de pesagem com a balança móvel do DERT. Durante a pesagem na BR-222, observou-se que um tempo maior era necessário para a abordagem inicial do motorista, explicando-lhe os objetivos da operação e os procedimentos para passagem do caminhão sobre as placas da balança móvel. Portanto, para o sistema simulado, considerou-se um cenário similar ao hoje observado nas rodovias estaduais, com um tempo médio de pesagem igual a 45" e com desvio padrão de 15".

Com relação ao tempo de autuação, o intervalo de confiança do tempo médio no Posto de Caucaia foi de 158" a 202". Já para o Posto de Quixadá, os limites foram de 303" a 561". Portanto, rejeitou-se a hipótese nula de tempos médios iguais de autuação nos dois postos, ao nível de significância de 5%. Neste caso, a razão para esta diferença no tempo de autuação deveu-se ao fato de que, na operação de Caucaia, o procedimento de autuação se restringiu ao preenchimento e emissão do auto de infração. Enquanto que na operação de Quixadá, os motoristas infratores só tiveram seus veículos liberados após o pagamento *in loco* da multa. Conforme detalhado no item a seguir, este comportamento diferenciado motivou o desenvolvimento de dois modelos distintos de simulação,

um considerando uma operação de pesagem “somente com autuação” e outro “com pagamento *in loco*”. Para o primeiro modelo de simulação, adotou-se um tempo médio de autuação igual a 180”, com desvio padrão de 60”. Já para o segundo, adotou-se um tempo médio de autuação igual a 480”, com desvio padrão de 90”.

5. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

A idéia inicial deste trabalho era desenvolver uma aplicação clássica de Teoria das Filas para, a partir dos dados coletados em campo, dimensionar a área de serviço dos postos e o número de balanças em operação para situações diferentes de volume de caminhões carregados e percentual de veículos trafegando com excesso de peso. Cada um dos postos fixos propostos ao final do estudo seria, então, dimensionado de acordo com suas características funcionais e operacionais particulares, assumindo-se que as condições de operação (equipes e equipamentos) nas malhas rodoviárias estadual e federal seriam as mesmas observadas durante as operações piloto, realizadas na BR-222 e na CE-060, respectivamente.

No entanto, a aplicação de um modelo M/M/1 pressupunha intervalos de chegada de veículos e tempos de serviço (pesagem, estacionamento e autuação) distribuídos segundo uma curva exponencial negativa. Porém, como exposto no item anterior, esta condição só foi observada para a variável intervalo de chegada, inviabilizando, assim, a utilização deste tipo de modelo.

A saída encontrada foi, portanto, o desenvolvimento de dois *Modelos de Simulação* que representassem, exatamente, as distribuições dos tempos de serviço observados durante as duas operações realizadas nos Postos de Caucaia (modelo para pesagem “somente com autuação”) e Quixadá (modelo para pesagem “com pagamento *in loco*”). Para tanto, foram escritos dois programas computacionais na linguagem GPSS/H, que simulassem a seqüência de etapas que compõem o processo de pesagem de veículos de carga para os dois procedimentos distintos de autuação.

Uma vez definidas as funções de chegada e serviço (pesagem, estacionamento e autuação), e reproduzido o esquema operacional

da pesagem de veículos de carga nos dois tipos de posto, partiu-se para a validação dos dois modelos de simulação, tentando-se reproduzir os valores das variáveis operacionais observados no campo. Para o modelo de simulação da pesagem “somente com autuação”, o programa computacional foi executado para uma série de cinco geradores de números randômicos diferentes, assumindo-se a pesagem de 55 caminhões carregados e uma porcentagem de 56% de veículos com excesso de peso (valores obtidos na operação piloto do Posto de Caucaia). Vale destacar que estes dois parâmetros são os únicos dados de entrada a definir, quando da análise dos futuros postos fixos a serem implantados.

Da mesma forma, para o modelo de simulação da pesagem “com pagamento *in loco*”, o programa computacional foi executado também para uma série de cinco geradores de números randômicos diferentes, assumindo-se a pesagem de 36 caminhões carregados e uma porcentagem de apenas 11% de veículos com excesso de peso (valores obtidos na operação piloto do Posto de Quixadá). A Tabela 1 apresenta a média dos resultados gerados pelos modelos de simulação para cada uma das variáveis analisadas. Pode-se constatar que, com exceção dos tempos médios de espera na fila de autuação, não há diferenças significativas ($\alpha = 10\%$) entre os valores observados e os valores simulados nos dois postos.

Tabela 1: Validação dos Modelos de Simulação

	Operação- Caucaia	Simulação- Caucaia	Operação- Quixadá	Simulação- Quixadá
Tempo Médio de Espera na Fila de Pesagem (*)	77 seg.	70 seg.	44 seg.	34 seg.
Percentual dos Veículos que Pegaram Fila na Pesagem	50%	39%	28%	10%
Tamanho Máximo da Fila de Pesagem	3	3	2	1
Tempo Médio de Pesagem	61 seg.	72 seg.	54 seg.	47 seg.
Tempo Médio de Estacionamento	144 seg.	156 seg.	134 seg.	131 seg.
Tempo Médio de Espera na Fila de Autuação (*)	416 seg.	151 seg.	-	153 seg.
Percentual dos Veículos que Pegaram Fila na Autuação	33%	43%	-	25%
Tamanho Máximo da Fila de Autuação	4	2	-	1
Tempo Médio de Autuação	180 seg.	192 seg.	432 seg.	440 seg.
Duração da Operação	2,74h	2,58h	2,98h	2,83h

(*) Considerando somente os veículos/motoristas que pegaram fila.

6. APLICAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Uma vez estando com os dois modelos de simulação calibrados e validados, pôde-se partir para a etapa de aplicação dos modelos propostos para os trechos de rodovias federais e estaduais candidatos à implantação de postos de pesagem, permitindo avaliar o efeito da variação do volume de tráfego pesado (caminhões carregados) e do percentual de veículos trafegando com excesso de peso sobre as variáveis de projeto (área do pátio de estocagem dos veículos a serem pesados por número de balanças utilizadas e área do pátio de estacionamento dos veículos autuados) e variáveis operacionais (tempo médio de espera na fila para pesagem e para autuação).

6.1. Dimensionamento da Área de Estocagem dos Veículos a serem Pesados

Para que os resultados dos modelos de simulação pudessem ser utilizados no dimensionamento dos postos de pesagem, optou-se inicialmente por gerar um gráfico que indicasse o comprimento máximo da fila de pesagem para diferentes volumes horários de pico (VHP) de caminhões carregados, considerando-se a utilização de uma única balança. Com base neste gráfico, pôde-se então dimensionar a área do pátio de estocagem dos veículos a serem pesados por um único equipamento, determinando-se a necessidade ou não de instalação de uma segunda balança. O gráfico da Figura 4 apresenta os valores simulados pelo modelo. Neste gráfico, constata-se que a partir de VHP's da ordem de 80 caminhões carregados por hora, passa-se a operar com filas máximas demasiadamente longas (superiores a 10 veículos), recomendando-se, então, a instalação de uma outra balança.

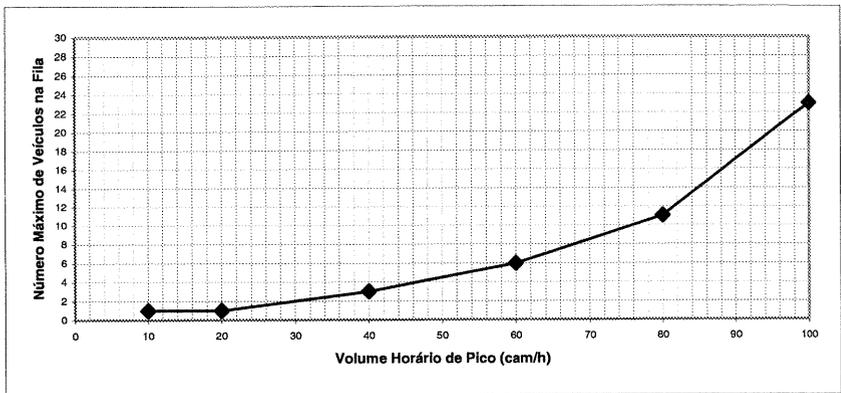
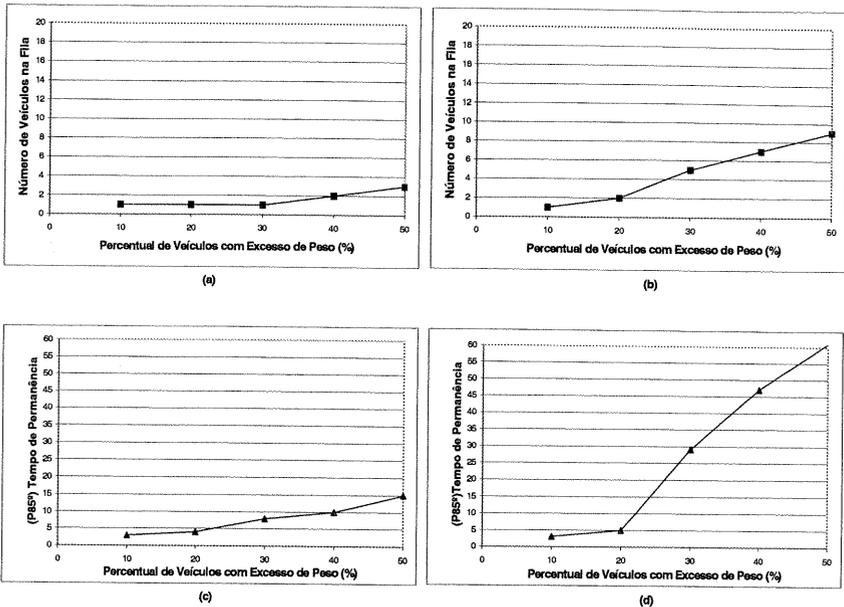


Figura 4: Simulação do Comprimento Máximo da Fila de Pesagem

6.2. Dimensionamento da Área do Pátio de Estacionamento dos Veículos Autuados

Para possibilitar o dimensionamento da área do pátio de estacionamento dos veículos autuados, foram utilizados os modelos de simulação representando os cenários de pesagem “somente com autuação” e “com pagamento *in loco*”. Nos gráficos a seguir, estão apresentados os valores de comprimento máximo da fila de autuação (ou seja, veículos que permanecerão estacionados durante o período de autuação), para diferentes VHP’s (10, 20, 40, 60, 80 e 100 caminhões carregados por hora) e diferentes percentuais de veículos com excesso de peso (10%, 20%, 30%, 40% e 50%). Foram também estimados os valores de tempo total de permanência dos veículos no posto (valor correspondente ao 85° Percentil), como forma de avaliar o impacto que o tipo de operação de pesagem especificado terá sobre o retardo provocado no tempo total de transporte da carga. A Figura 5 apresenta os gráficos referentes ao modelo “Somente com Autuação” (a, c) e ao modelo “com Pagamento *in loco*” (b, d), para um VHP de 40 cam./hora. Percebe-se, comparando os resultados dos dois modelos, que a operação com uma única balança torna-se inviável caso seja requerido o pagamento “*in loco*”, mesmo para VHP’s e percentuais de excesso relativamente baixos.



- (a) Comprimento da Fila de Autuação – Somente com Autuação;
 (b) Comprimento da Fila de Autuação – Pagamento "in loco";
 (c) Tempo de Permanência (min) – Somente com Autuação;
 (d) Tempo de Permanência (min) – Pagamento "in loco"

Figura 5: Simulação para Postos de Pesagem – Volume Horário de Pico = 40 cam/h.

6.3. Determinação do *Lay-out* dos Postos de Pesagem

Para subsidiar a posterior determinação do *lay-out* de cada posto de pesagem recomendado, foram tabulados os valores de comprimento máximo das filas de pesagem e autuação, além dos tempos totais de permanência, considerando-se volumes horários de pico projetados para um horizonte de 10 anos. O volume médio diário de caminhões, em cada trecho rodoviário candidato à implantação de um posto de pesagem, foi projetado assumindo-se uma taxa média de crescimento do tráfego pesado de 3% ao ano. Considerou-se, também, uma distribuição direcional de 50/50 e que, em média, 70% dos caminhões trafegando pela rodovia estariam carregados. Na estimativa do volume horário de pico a partir do VMDA projetado, assumiu-se, com base no histórico de contagens do DERT, que a hora

de pico concentraria 8% do tráfego diário. Por fim, os parâmetros operacionais obtidos a partir dos modelos de simulação foram gerados para um percentual de 20% dos veículos com excesso de peso. A Tabela 2 apresenta, para fins de ilustração, quatro dos 78 trechos candidatos, com seus respectivos volumes projetados e parâmetros operacionais estimados pelos modelos de simulação.

Tabela 2: Determinação do Lay-out dos Postos de Pesagem

Trecho	VMDa	VHP	Fila	Só com Autuação		Pagamento 'in loco'	
	Comercial	Futuro	Pesagem	Fila Autuação	Tempo (min)	Fila Autuação	Tempo (min)
A	683	51	5	2	6	4	12
B	477	36	3	1	4	2	5
C	1208	91	17	2	17	9	29
D	841	63	6	2	6	4	12

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento e a aplicação de modelos de simulação estocástica para caracterizar a operação de postos de pesagem de veículos de carga não só subsidiou o dimensionamento dos postos permanentes a serem implantados na malha rodoviária do Ceará, como também permitiu a avaliação dos efeitos do pagamento "in loco" das multas sobre as variáveis operacionais e de projeto. Percebeu-se que, caso exigido o pagamento da multa no momento da autuação, necessitar-se-ia de uma infra-estrutura bem maior em termos de número de fiscais e área de estacionamento dos caminhões. Embora não detalhado neste artigo, a simulação operacional serviu também para definir a necessidade de postos uni e bidirecionais. Outras análises relevantes para a tomada de decisão do DERT, como a avaliação dos benefícios advindos da implantação de balanças seletivas, poderão ser desenvolvidas efetuando-se pequenas alterações nos códigos de programação GPSS/H que representam os modelos de simulação. Conforme já destacado anteriormente, recomendou-se ao órgão rodoviário que fosse efetuada uma nova operação piloto, logo após a implantação do primeiro posto permanente, para que os modelos de simulação possam ser adaptados para retratar a operação com a nova tecnologia de pesagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, J.J. e J.R.A. Setti (2000) Análise da Operação de Praças de Pedágio por Simulação Estocástica. *Anais (Relatórios de Dissertação) XIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes-ANPET*, Gramado, RS.
- ASTEF (2001) Pesagem de Veículos de Carga no Estado do Ceará. Relatório Final da Associação Técnico- Científica Engenheiro Paulo de Frontin – ASTEF para o Departamento de Edificações Rodovias e Transportes do Estado do Ceará – DERT.
- Cardoso, C.R.O. e M.B. Teles (1997) Simulação de Terminal Portuário. *Anais (CD-ROM) do XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP*. ABEPRO - Associação Brasileira de Engenharia de Produção, Gramado, RS.
- Feitosa, M.V.M. e P.P. Porto (1998) Aplicação de Modelos de Simulação em Terminais de Passageiros de Aeroportos. *Anais do XII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Fortaleza, CE, 182-190.
- Kamyab, A.; T. Maze; M. Nelson e B. McCall (1998) Simulation Modelling of Electronic Screening at Weigh Stations. *Preprints of the 77th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- Lin, F.B. e C.W. Su (1994) Level of Service Analysis of Toll Plazas on Freeway Main Lines. *Journal of Transportation Engineering*, v.120, n.2, 246-263.
- Novaes, A.G. (1975) *Pesquisa Operacional e Transportes: Modelos Probabilísticos*. McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo.
- Schriber, T. (1974) *Simulation Using GPSS*. Wiley, New York, USA.
- Soares, J.B.; J.A. Oliveira Júnior e C.F.G. Loureiro (2001) Análise de Viabilidade Econômica do Programa de Pesagem de Veículos de Carga na Malha Rodoviária do Estado do Ceará, Brasil. *Proceedings of the Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (CD-ROM)*, Auburn, Alabama, USA.
- Winston, W.L. (1994) *Operations Research: applications and algorithms*. International Thomson Publishing, Belmont, California, USA.

Endereço dos autores:

Carlos Felipe Grangeiro Loureiro
Marcos José Timbó Lima Gomes
Departamento de Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará – UFC
Campus do Pici – Bloco 703 – CP 12.144
60455-760 – Fortaleza - CE
E-mail: felipe@det.ufc.br