



NÍVEL DE SERVIÇO DE PRAÇAS DE PEDÁGIO RODOVIÁRIO: UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FATORES EXTERNOS NO TEMPO DE ATENDIMENTO

Patrícia Pereira Arantes Inácio

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG
pati.arantes@hotmail.com

Josiane Palma Lima

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG
jpalmalima@gmail.com

Fabiano Leal

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG
fleal@unifei.edu.br

RESUMO

Demoras no atendimento em praças de pedágio podem gerar insatisfação, sendo essas demoras resultantes da transação de pagamento e influenciadas por diversos fatores. O objetivo deste trabalho é analisar a influência de fatores operacionais e humanos no tempo de atendimento por meio do *Design of Experiments* (DOE). Foi realizado um estudo de caso em uma praça de pedágio localizada no estado de Minas Gerais. A coleta de dados contou com observações, filmagens e documentos. A metodologia adotada segue as etapas de um projeto de experimentos e os resultados mostram que os fatores que mais influenciaram a variável de resposta foram a “categoria do veículo” que trafega pela praça de pedágio, a “forma de pagamento” adotada pelo motorista, o “turno” e o “sexo do arrecadador”. Sendo o fator “categoria” o que mais tem influência e o fator “dia da semana” não influencia de forma significativa o tempo de atendimento.

PALAVRAS CHAVE. Praça de pedágio, Tempo de atendimento, DOE.

Tópicos: L&T – Logística e Transporte.

ABSTRACT

Unsatisfied delays in toll beaches may generate dissatisfaction, these delays resulting from the payment transaction being influenced by several factors. The objective of this work is to analyze an influence of operational factors and humans without service time through the Design of Experiments (DOE). A case study was carried out in a toll plaza located in the state of Minas Gerais. Data collection included observations, filming and documents. The methodology adopted follows the steps of an experiment design and the results show that the factors that most influence a response variable for a "vehicle category" that travels to the toll plaza, a "payment form" adopted by the driver, the "turn" and the "sex of the collector". Being the "category" factor that has the most influence and the "day of the week" factor does not significantly influence the time of service.

KEYWORDS. Toll plaza, Service time, DOE.

Paper topics: L&T - Logistics and Transport



1. Introdução

A cobrança do pedágio é um fator que afeta de maneira significativa a percepção dos níveis de serviços prestados em uma rodovia [Araújo, 2001]. Demoras no atendimento causadas por falhas na operação da arrecadação, no projeto ou no dimensionamento da praça podem gerar insatisfação, principalmente por criarem interrupções no fluxo e serem potenciais pontos de estrangulamento e aumento do tempo de viagem [Dubedi *et al.* 2012; Harb *et al.* 2010]. Cada praça de pedágio possui características próprias, desde a sua geometria, passando pelo seu dimensionamento até o perfil do usuário. Portanto, para compreender e aperfeiçoar os serviços prestados é importante conhecer os fatores que podem influenciar na capacidade de atendimento manual da praça de pedágio [Ardekani e Torres 1991]. Vários estudos apontam a importância de analisar praças de pedágio e suas características a fim de garantir um serviço de qualidade [Klodzinski e Al-Deek 2002b, 2002c; Al-Deek 2001; Lin 2001; Zarrillo *et al.* 1997; Al-Deek *et al.* 1997; Al-Deek e Radwan 1995; Lin e Su 1994; Woo e Hoel 1991].

Alguns fatores externos ao processo de cobrança podem interferir nos tempos de atendimento nas cabines, tais como: diferentes formas de pagamentos de tarifas; categorias de veículos; valores de tarifas; período do dia e condições meteorológicas; intensidade de fluxo de tráfego, [Araújo e Setti 2006; Oliveira *et al.* 2003; Klodzinski e Al-Deek 2002a; Woo e Hoel 1991]. Por outro lado, poucos estudos verificaram a importância de fatores humanos no nível de serviço prestado em uma praça de pedágio [Araújo 2001; Astarita *et al.* 2001; Al-Deek e Mohamed 2000;]. Sabendo-se que quanto maior for o envolvimento humano no processo de cobrança manual de pedágios, maior será o tempo de atendimento dos veículos [Oliveira 2004].

Como a capacidade de atendimento de uma praça de pedágio está diretamente relacionada aos tempos de atendimento dos veículos nas cabines [Oliveira 2004; Araújo 2001], que por sua vez dependem de fatores como os já citados anteriormente, conhecer a influência destes fatores sobre os tempos de atendimento e suas interações é muito importante. Alguns trabalhos [Araújo e Setti 2006; Oliveira 2004] foram desenvolvidos neste intuito, mas apenas abordam de forma isolada a influência de alguns fatores, não considerando a interação entre os fatores estudados e sua influência no tempo de atendimento. Portanto, o objetivo geral deste trabalho é analisar a influência de fatores externos no nível de serviço de uma praça de pedágio, por meio do *Design of Experiments* (DOE), verificando como esses fatores interagem entre si e quais são mais representativos. Para tal foi realizado um estudo de caso em uma praça de pedágio localizada no estado de Minas Gerais. A coleta de dados contou com observação, filmagens e documentos disponibilizados pela concessionária. A metodologia segue as etapas do projeto de experimentos, ou seja, reconhecimento e relato do problema, escolha dos fatores e dos níveis a serem estudados, seleção da variável de resposta, escolha do planejamento experimental, realização do experimento, análise dos dados e conclusões e recomendações.

Além dessa seção introdutória, este artigo está organizado nas seguintes seções: praças de pedágio rodoviário, técnicas de análise de fatores, desenvolvimento do experimento e para finalizar as conclusões.

2. Praças de pedágio rodoviário

Cada praça de pedágio possui características únicas, definidas de acordo com as particularidades do tráfego que por ela passa e do tipo da via na qual é implantada. Uma praça de pedágio pode ser definida como a área onde o pedágio é cobrado [Faria e Campos 2012]. Tal área tem início onde a estrada se alarga o suficiente para que sejam instalados quantos postos de cobrança sejam necessários, para o atendimento da demanda do tráfego, se estendendo pelas ilhas de cobrança e terminando onde a rodovia volta à sua largura original [Schaufler 1997].

A cobrança da tarifa pode ser feita de maneira manual, ou seja, o veículo tem que parar na cabine de cobrança onde ocorrerá uma interação entre o usuário e o operador de caixa para realizar a transação [Tiefensee 2005]. Já a eletrônica é um sistema em que uma antena identifica o veículo equipado com uma etiqueta ou com um transponder quando este se aproxima da praça. Desta



forma, o sistema debita o valor da tarifa correspondente ao veículo. A cobrança automática consiste no pagamento da tarifa em máquinas automáticas de moedas. O usuário se aproxima da cabine e, em vez de interagir com o arrecadador, insere quantas moedas sejam necessárias para efetuar o pagamento [Faria e Campos 2012].

A capacidade e o nível de serviço (*Level of Service* - LOS) das instalações de pedágio ainda não foram formalmente abordados no *Highway Capacity Manual* – HCM [2000] [Klodzinski e Al-Deek 2002a; Kittelson e Roess 2001]. O HCM [2000] reconhece este fato e afirma que deve ser dada especial atenção às características únicas, restrições e atrasos causados por estas instalações de cobrança de portagem. Devido à considerável interrupção do fluxo de tráfego, o segmento com praça de pedágio não pode ser avaliado como um segmento normal de rodovia. Alguns autores sugerem uma analogia entre praças de pedágios e intersecções semaforizadas. Porém, estas estruturas não podem ser avaliadas da mesma forma [Klodzinski e Al-Deek 2002b]. O atraso em intersecções semaforizadas é resultante da ação de um semáforo automatizado. O atraso em uma cabine de pedágio é resultante da transação de pagamento, e influenciado por vários fatores [Klodzinski e Al-Deek 2002c] como valor da tarifa, forma de pagamento, fluxo e classes de veículos e também da atuação de arrecadadores e motoristas [Oliveira 2004; Araújo 2001]. Para Lin e Su [1994] a capacidade de uma cabine de pedágio pode ser definida como o fluxo máximo de veículos que pode atravessar uma cabine por hora, de acordo com as condições predominantes de tráfego e da via. A capacidade está diretamente relacionada aos tempos de atendimento dos veículos nas cabines, que por sua vez dependem de fatores como a intensidade do fluxo [Oliveira *et al.* 2003; Woo e Hoel 1991], a composição do fluxo, valor da tarifa, perfil do motorista e forma de pagamento [Araújo e Setti 2006; Oliveira 2004].

Levando em consideração a diversidade de fatores que podem influenciar o serviço oferecido em praças de pedágio, vários trabalhos foram desenvolvidos a fim de estudar algum aspecto. Como, por exemplo, a utilização da cobrança eletrônica, geralmente estudada por meio de simulação [Klodzinski e Al-Deek 2002a; Al-Deek 2001], além da análise da tecnologia automática de identificação de veículos [Al-Deek *et al.* 1997; Zarrillo *et al.* 1997]. A capacidade, a eficiência e o nível de serviço têm sido os critérios mais relevantes na concepção de praças de pedágio [Klodzinski e Al-Deek 2002b, c; Transportation Research Board 1997]. A exigência de estabilidade é uma consideração importante para a eficiência [Van Dijk *et al.* 1999; Danko e Gulewicz 1994] e o comprimento médio da fila, bem como o tempo de espera no ponto de pedágio são considerados os parâmetros que definem o nível de serviço das praças de pedágio [Lin 2001; Lin e Su 1994].

3. Técnicas de análise de interação entre fatores

Quando as análises são feitas para verificar a interação entre os fatores no setor de transportes, algumas técnicas vêm sendo aplicadas, tais como modelos de regressão não paramétricos, como é caso do estudo realizado por Xu e Lin [2015] que analisou o aumento do consumo de energia e emissões de dióxido de carbono por parte do setor de transportes. Já Macatangay *et al.* [2014] realizaram uma regressão linear múltipla e um modelo de transporte lagrangeano em uma pesquisa sobre fatores que contribuem para as concentrações de CO₂ em superfícies. Yang *et al.* [2016] realizaram uma análise de correlação para identificar possíveis características espaciais críticas de ciclones tropicais que contribuem para danos funcionais a uma rede rodoviária.

Outra técnica que é útil para verificar se determinado fator influencia, ou não, a resposta de um sistema é o projeto de experimentos [Sanchez, 2008]. Um experimento planejado é um procedimento no qual alterações propositalmente são realizadas, nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões dessas alterações [Montgomery, 2013]. O planejamento de experimentos, do inglês *Design of Experiments* (DOE), pode ser definido como uma metodologia fundamentada em conceitos estatísticos, que tem por objetivo otimizar o planejamento e executar e analisar o experimento [Macedo 2007].



Fundamental no projeto de um novo processo, no estudo e determinação de condições operacionais e no melhoramento contínuo da qualidade de um produto ou de um processo o *Design of Experiments* tem sido estabelecido como um meio eficaz de caracterização e otimização de sistemas desconhecidos ou complexos. Especialmente quando estudos analíticos sobre a ligação entre a entrada e saída do sistema se revelem difícil ou impossível. Também tem sido uma ferramenta para identificar as causas mais prováveis de um determinado problema e testá-las em menor tempo e custos reduzidos, mantendo o nível de confiança por meio da realização de experimentos estatisticamente planejados [Freitas e Chimendes 2015; Goh 2014; Montgomery 2013; Box *et al.* 2005]. “Resposta”, “fator” e “nível” são os termos usados no DOE e são definidos como: resposta indica um experimento que resulta em uma causa; o fator denota uma variável independente na experiência e um nível denota o valor de um fator [Fralely *et al.* 2006]. O DOE organiza as combinações de níveis de fator, ele avalia os efeitos de vários fatores e, simultaneamente, tem como objetivo revelar a relação entre o fator e a resposta [Giunta e Wojtkiewicz 2003].

O DOE tem sido amplamente utilizado em diversas áreas como biotecnologia [Kumar *et al.* 2014; Kazem *et al.* 2014; Jelmy *et al.* 2013; Maheshwari *et al.* 2013; Nista *et al.* 2012], computação [Aragão *et al.* 2016; Lazic e Milinkovic 2015], produção industrial [Giasin *et al.* 2016; Griffiths *et al.* 2016; Oliveira *et al.* 2015] e até mesmo em pesquisas aeroespaciais como pode ser visto no trabalho desenvolvido por Zhang *et al.* [2012]. Entretanto, poucos planejamentos de experimentos vêm sendo desenvolvidos na área de transportes. Dessa maneira, esta pesquisa irá utilizar o planejamento de experimentos para analisar quais fatores externos tem maior influência no tempo de atendimento de uma praça de pedágio localizada no estado de Minas Gerais.

4. Desenvolvimento do experimento

4.1 Reconhecimento e relato do problema

A forma de cobrança praticada, o fluxo de tráfego e sua composição, dentre outros fatores podem afetar o desempenho da praça de pedágio isso porque podem influenciar nos tempos de atendimento. Ressalta-se que os tempos de atendimento dizem respeito aos pagamentos manuais, ou seja, aqueles pagamentos em que ocorre a interação arrecadador-motorista, sendo desconsideradas as outras formas de pagamento.

O objeto de estudo envolveu uma das maiores companhias do setor de concessões de rodovias em quilômetros administrados. A empresa estudada esta presente em cinco estados brasileiros, dentre eles São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, por meio de mais de seis concessionárias, sendo elas estaduais ou federais. A praça de pedágio estudada está situada em uma rodovia federal que possui mais de 500 km de extensão. Além disso, a rodovia está localizada em um ponto estratégico, interligando duas importantes rodovias e as capitais de dois estados brasileiros. Sendo esses dois estados responsáveis por 41,3% do Produto Interno Bruto do Brasil [IBGE 2013]. A coleta dos dados foi iniciada no dia 7 de março de 2016 (segunda-feira) e finalizada no dia 13 de março de 2016 (domingo). Em cada dia da semana foram coletados dados durante 3h, sendo 1h em cada turno de trabalho. Para a coleta desses foram utilizados vídeos e documentos disponibilizados pela organização, além de visitas a praça de pedágio. Cada veículo que passa pela praça de pedágio durante o período de análise é considerado um ponto de dados. O conjunto completo de dados representaram 3636 pontos de dados.

4.2 Escolha dos fatores e dos níveis

Inicialmente foram determinados cinco fatores a serem avaliados, a fim de descobrir quais desses tem maior influência na variável de resposta (saída). O primeiro definido foi à “categoria dos veículos” que trafegam na praça de pedágio. Para isso foi utilizado à categorização adotada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Categoria dos veículos segundo a ANTT



Categoria	Descrição	Nº de eixos	Fator multiplicador	Rodagem
1	Automóvel, caminhonete e furgão.	2	1,00	Simple
2	Caminhão leve, ônibus, caminhão-trator, furgão.	2	2,00	Duplo
3	Automóvel e caminhonete com semi-reboque.	3	1,50	Simple
4	Caminhão, caminhão-trator, caminhão-trator com semi-reboque e ônibus.	3	3,00	Simple
5	Automóvel e caminhonete com reboque.	4	2,00	Duplo
6	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque.	4	4,00	Duplo
7	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque.	5	5,00	Duplo
8	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque.	6	6,00	Duplo
9	Motocicletas, motonetas e bicicletas moto.	2	0,50	Simple

FONTE: Relatório Anual ANTT [2012]

O Quadro 1 revela que os veículos podem ser divididos em 9 categorias de acordo com a quantidade de eixos e a presença de eixos duplos. Neste artigo será adotado o “cat” de categoria na frente dos números. Assim a classificação 1 será chamada de “cat 1”, a segunda de “cat 2” e assim sucessivamente. Além disso, uma décima categoria, denominada “especial”, foi adotada para abordar veículos maiores que seis eixos visto que a categorização da ANTT se limitar a veículo de 6 eixos.

O segundo fator foi à “forma de pagamento da tarifa” que pode acontecer de cinco maneiras: dinheiro com troco, dinheiro sem troco, cartão pedágio, vale pedágio e cheque. O terceiro fator foi o “sexo do arrecadador” que possui dois níveis: feminino e masculino. Os “dias da semana” também foram considerados um fator, assim como os “turnos de trabalho” adotados pela companhia, sendo que o primeiro turno tem início às 22h e termina às 5:59, o segundo turno tem início às 6h e término às 13:59, enquanto que o terceiro inicia-se às 14h e termina às 21:59. Uma condensação dos fatores descritos anteriormente e seus níveis podem ser observados na Figura 1.

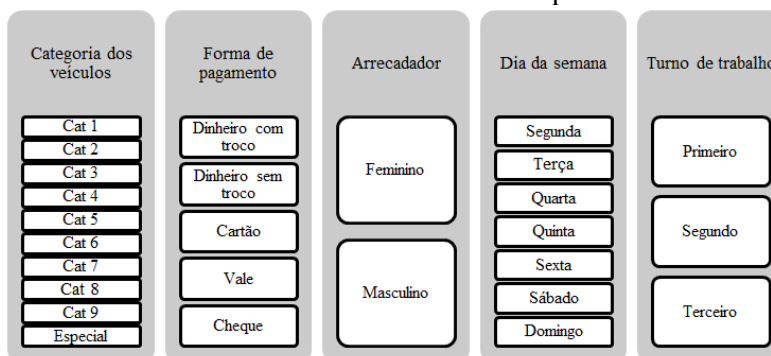


Figura 1 – Fatores e níveis adotados inicialmente

Como verificado na Figura 1, existem seis fatores e cada fator possui dois ou mais níveis. Porém, Kumar *et al.* [2014] salientam a importância da eliminação dos fatores insignificantes nos primeiros passos, pois essa eliminação auxilia na redução de esforços experimentais necessários nos próximos passos do experimento. Dessa maneira foi realizada uma análise de agrupamento (*cluster analysis*) utilizando-se o agrupamento k-médias com a distância euclidiana ao quadrado como medida de similaridade. Como o objetivo é analisar a interação entre os fatores optou-se por criar dois grupos similares para cada fator analisado.

Para o fato “categoria dos veículos”, a similaridade ocorreu entre as categorias cat 2, cat 4, cat 5, cat 6, cat 8 e Especial formando assim o primeiro grupo. O outro grupo ficou formado pelas categorias cat 1, cat 3, cat 7 e cat 9 (Figura 2a). O fator “forma de pagamento” também foi reduzido a dois níveis (Figura 2b), salienta-se que forma de pagamento cheque foi retirada da pesquisa, pois



não ocorreu essa forma de pagamento durante o período de coleta dos dados. Conforme pode ser observado na Figura 2, os grupos estão representados pelas linhas em vermelho e em azul. Cada conexão mostra o nível de similaridade entre cada nível analisado.

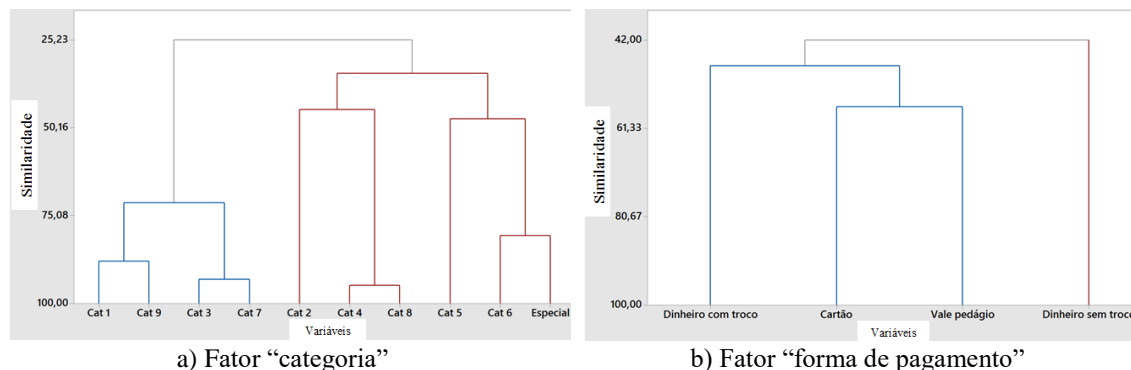


Figura 2 – Dendrograma para os fatores “categoria” e “forma de pagamento”

As formas de pagamento foram agrupadas da seguinte maneira (Figura 2b), o grupo A ficou com a forma de pagamento em dinheiro com troco, cartão e vale pedágio (linha azul) enquanto que o grupo B ficou apenas com a forma de pagamento dinheiro sem troco (linha vermelha). O fator “sexo do arrecadador” não foi agrupado já que possui apenas dois níveis. O mesmo critério foi utilizado para o fator “dia da semana” que ficou agrupado da seguinte maneira: segunda, terça, quarta, quinta e sexta formam um grupo e sábado e domingo outro grupo. Por fim, para o fator “turno” também foi utilizado a análise de agrupamento no qual o grupo A ficou com o turno 1 e o grupo B com os turnos 2 e 3. Assim, o experimento será realizado com cinco fatores e cada fator com dois níveis conforme mostrado na Figura 3.

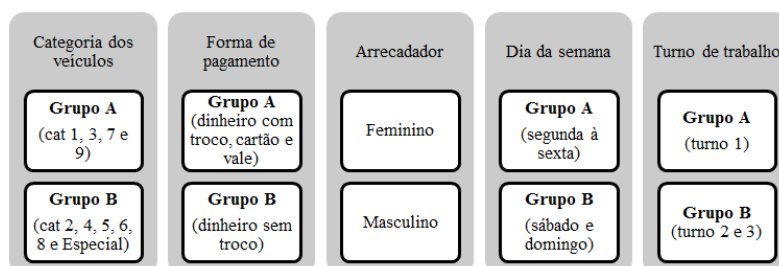


Figura 3 – Experimento a ser realizado com 5 fatores e 2 níveis para cada fator

4.3 Seleção da variável resposta

A variável de resposta será o “tempo de atendimento”. Essa variável é representada pela diferença entre os tempos de chegada e saída. Segundo Inácio *et al.* [2016] o tempo de chegada é o instante em que o veículo para, por completo, ao alcance dos arrecadadores de impostos e o tempo de saída é o momento em que o veículo ultrapassa, por completo, a cancela. Durante a coleta de dados notou-se que certo número de motoristas oferecem o pagamento ao arrecadador enquanto seu veículo ainda está se movimentando, nestes casos o tempo de chegada foi definido como o instante em que o motorista começa a transação com o arrecadador. Por se tratarem de períodos curtos de tempo, os tempos são extraídos em milésimos de segundo e convertidos para segundos.

4.4 Planejamento do experimento

Para a realização do experimento, foi adotado um experimento fatorial, pois permite estudar os efeitos de diversos fatores sobre uma resposta. Ao variar os níveis de todos os fatores ao mesmo tempo, em vez de um de cada vez, é possível estudar as interações entre os fatores [Montgomery 2013]. Além disso, foi realizado o fatorial completo, no qual as respostas podem ser medidas em todas as combinações dos níveis de fatores determinados. Como exposto na Figura 3 todos os fatores possuem apenas dois níveis. Com isso foi realizado um fatorial completo com 2 níveis.



O número de corridas necessárias para um experimento fatorial completo com 2 níveis é 2^k , no qual k é o número de fatores. Dessa maneira, o número de corridas necessárias para o experimento realizado é de 2^5 (serão utilizados cinco fatores), ou seja, 32 corridas.

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

4.5 Realização do experimento

O experimento foi desenvolvido no Minitab® 17 que é um pacote de software com foco na computação estatística e visualização. Dessa maneira, uma parte da tabela gerada para o experimento pode ser observada na Figura 4.

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

Figura 4 – Tabela com a primeira réplica do experimento

A última coluna da Figura 4 representa as repostas para o experimento, ou seja, o tempo de atendimento para cada configuração. Ou seja, para configuração da linha 1, no qual esta sendo analisado o grupo A de todos os fatores, o tempo de atendimento foi de 37,91 segundos.

4.6 Análise dos dados

Após a elaboração do experimento é possível verificar qual fator tem maior influência na resposta, “tempo de atendimento”. A equação de regressão que representa a resposta pode ser representada pela equação a seguir, na qual a letra “A” representa a categoria do veículo, a letra “B” o dia das semana, a letra “C” o turno, a letra “D” a forma de pagamento e a letra “E” o sexo do arrecadador.

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

Com 95% de confiabilidade foi gerado o gráfico de Pareto, que pode ser visualizado na Figura 5, no qual é mostrado o fator que tem maior influência na variável de resposta.

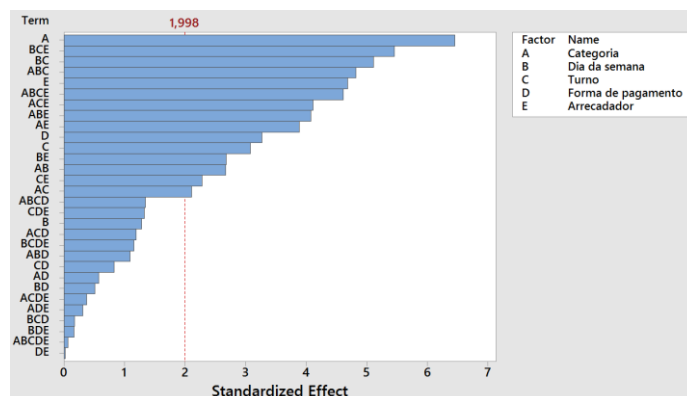


Figura 5 – Gráfico de Pareto com os fatores analisados

A Figura 5 revela que os fatores “categoria”, “turno”, “forma de pagamento” e “arrecadador”, representados pelas letras A, C, D e E respectivamente, influenciam de maneira significativa a variável de resposta “Tempo de atendimento”. Essa influência é verificada já que todos os fatores ultrapassaram a linha de referência, representada por uma linha tracejada na cor vermelha. O fator “dia da semana” foi o único que não exerceu influência de forma significativa no tempo de atendimento. A interação BCE, ou seja, Dia da semana-Turno-Arrecadador foi a mais significativa das interações, aparecendo em segundo lugar na Figura 5, sendo esta a interação que mais influenciou o tempo de atendimento na praça de pedágio estudada.

Também foi verificada a interação dos fatores dois a dois, conforme mostrado na Figura 6, no qual se desejou analisar como os fatores se relacionam.

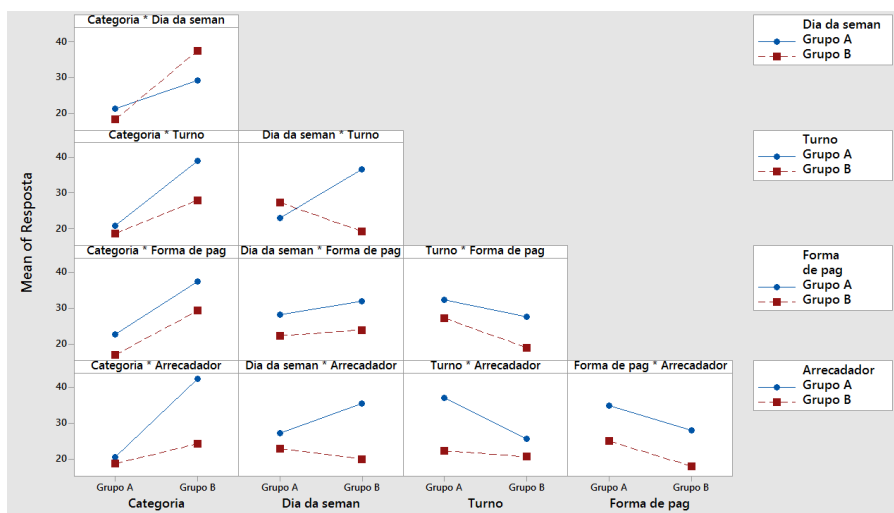


Figura 6 - Gráfico de interação dois a dois para a resposta tempo de atendimento

Na Figura 6 cada ponto no gráfico mostra o tempo de atendimento médio em diferentes combinações de níveis de fator. Se as linhas não forem paralelas, o gráfico indicará que há uma interação entre os dois fatores. Observa-se que várias linhas estão em paralelas na Figura 6, mostrando que não há interações entre os fatores. Entretanto nas interações dos fatores “categoria” e “dia da semana”, “dia da semana” e “turno”, “categoria” e “turno” e “categoria” e “arrecadador”, verifica-se que as linhas se inclinam, levando a acreditar que existe uma interação entre esses fatores. A análise dois a dois que mais se destacou foi entre os fatores “turno” e “dia da semana” como sendo os fatores que mais possuíram interação. Na análise desses dois fatores é verificado que durante a semana o turno 1 apresentou o menor tempo de atendimento. Porém, como a



inclinação da linha do final de semana é maior, conclui-se que esse nível é mais sensível na variação dos turnos.

5. Conclusão

O objetivo deste artigo foi estudar como determinados fatores podem influenciar nos tempos de atendimento de uma praça de pedágio. Para alcançar este objetivo foi utilizado o *Design of Experiments* – DOE que visa criar um modelo empírico que correlaciona as respostas do processo para os vários fatores.

Os resultados mostram que dos fatores determinados os que têm maior influência sobre a variável de resposta tempo de atendimento são “categoria”, “forma de pagamento” e “arrecadador”. O fator “categoria” tem a maior influência, pois os grupos criados acabaram se diferenciando por tamanho e peso do veículo. A categoria do veículo tem forte influência no tempo de atendimento, o que pode ser verificado em diversos trabalhos [Araújo e Setti 2006; Oliveira 2004; Oliveira *et al.* 2003; Woo e Hoel 1991] e esse fator foi o que mais se destacou. Esse resultado foi alcançado, pois o grupo A desta categoria é composto principalmente por veículos leves, como carros de passeio e motos, que possuem maior taxa de aceleração e menor comprimento fazendo com que o seu tempo de atendimento seja pequeno. Enquanto que o grupo B é composto por veículos pesado e com grande extensão, aumentando assim o tempo de permanência desses veículos na cabine de arrecadação.

Em relação à “forma de pagamento”, um dos grupos era composto apenas pela forma de pagamento em dinheiro e sem troco, essa forma de pagamento tende a ser rápida, uma vez que foi observado durante a coleta de dados que motoristas que já possuíam o valor trocado, não paravam o carro por completo para efetuar o pagamento e não esperavam o recibo do arrecadador. Além disso, em momentos de muito fluxo os arrecadadores não conferiam minuciosamente o valor entregue, agilizando assim o procedimento. Já o fator Dia da semana, foi o que mais se distanciou da linha de referência, ou seja, o dia em que ocorre a cobrança não afeta significativamente o tempo de atendimento.

Já as interações que influenciaram significativamente são “dia da semana”, “turno” e “arrecadador”; “dia da semana” e “turno”; “categoria”; “dia da semana” e “turno”, por fim a interação “categoria”; “dia da semana”; “turno” e “arrecadador”. O fator “turno de trabalho” está representado em todas as interações que interferem no tempo de atendimento devido a grande diferença entre os dois grupos desse fator. O grupo A representa o primeiro turno que tem início às 22h e termina às 5:59, nesse período o fluxo de veículos é pequeno e é composto principalmente por veículos pesados. De acordo com Araújo [2001], fluxos reduzidos e presença de veículos pesados tendem a aumentar o tempo de atendimento, já que os arrecadadores trabalham sem grandes pressões devido à criação de filas e os veículos pesados tem uma baixa aceleração como já mencionado.

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

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Referências



- Al-Deek, H. M. e Radwan, A. E. (1995). A framework for evaluation level of service at electronic toll collection plazas. Proceedings of Transportation Congress: Civil Engineers – Key to World Infrastructure, ASCE, v. 2.
- Al-Deek, H. M., Mohammed, A. A. e Radwan, A. E. (1997). Operational benefits of electronic toll collection: case study. *Journal of Transportation Engineering*, 123:467–477.
- Al-Deek, H. M. e Mohamed, E. A. (2000). Simulation and Evaluation of the Orlando-Orange Country Expressway Authority (OOCEA) Eletronic Toll Collection Plazas Using TPSIM – Toll Plaza simulator. Final Report. *Transportation Systems Institute, university of Central Florida*, 96.
- Al-Deek, H. M. (2001). Analyzing performance of ETC plazas using new computer software. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15:309–319.
- ANTT - Relatório Anual – Associação Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: < <http://www.antt.gov.br/>>. Acessado: 2016-01-02.
- Aragão, M., Frigieri, E., Ynoguti, C. e Paiva, A. (2016). Factorial design analysis applied to the performance of SMS anti-spam filtering systems. *Expert System With Applications*, 64:589-604.
- Araújo, J. (2001). Características operacionais de praças de pedágio. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.
- Araújo, J. J. e Setti, J. R. (2006). Caracterização Operacional de Praças de Pedágio do Estado de São Paulo. *Transportes*, 14:33-44.
- Ardekani, S. e Torres, F. (1991). Economic evaluation of toll plaza operations. Transportation Research Record 1305, Transportation Research Board, National Research Coucil, p. 160-168.
- Astarita, V., Florian, M. e Musolino, G. (2001). A microscopic traffic simulation model for de evaluation of toll station system. In: The IEEE 4TH International Conference on intelligent transportation systems, 2001, California, EUA. Anais.. EUA: 4TH ICITS, p. 694-699.
- Box, G. E. P, Hunter, J. S. e Hunter, W. G. (2005). Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery, Vol. 13. Wiley; New York.
- Danko, J. e Gulewicz, V. (1994). Insight through innovation: a dynamic approach to demand based toll plaza lane staffing. In: Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, IEEE Cat. No. 94CH35705, p. 1116–1123.
- Dubedi, A., Chakroborty, P., Kundu, D. e Reddy, H. (2012). Modeling Automobile Drivers’ toll-lane choice behavior at a toll plaza. *Journal of Transportation Engineering*, v. 138:1350-1357.
- Fraley, S., Oom, M., Terrien, B. e Date, J. (2006). Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. The michigan chemical process dynamic and controls open text book, USA.
- Freitas, R. e Chimendes, V. (2015). Aplicação de DOE na determinação dos fatores de influência no prazo da entrega de trabalhos de graduação nos cursos de tecnologia. *Revista Científica OnLine*, v. 5, n. 1.
- Giasin, K., Ayvar-Soberanis, S. e Hodzic, A. (2016). Evaluation of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication effects on machining GLARE laminates using design of experiments. *Journal of Cleaner Production*, 135:533-548.
- Giunta, A., Wojtkiewicz, S. e Eldred, M. S. (2003). Overview of modern design of experiments methods for computational simulations, American Institute of Aeronautics and Astronautics, paper AIAA 2003-649, In: AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno.



Goh, T. (2014). Management of parametric response in design of experiments. *Qual. Reliab. Engng. Int.*, 30:1191-1195.

Griffiths, C., Howarth, J., Almeida-Rowbotham, G., Rees, A. e Kerton, R. (2016). A design of experiments approach for the optimization of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, v. 139:74-85.

Harb, R., Su, X. e Radwan, E. (2010). Empirical Analysis of toll-lane processing times using proportional odds augmented MARS. *Journal of Transportation Engineering*, 136:1039-1048.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PIB de cada estado brasileiro, 2013. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br>>.

Inácio, P., Barbieri, A. e Lima, J. (2016). Análise das características dos veículos e da praça de pedágio na variação do tempo de atendimento. XXX ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro.

Jelmy, E., Ramakrishnan, S., Devanathan, S., Rangarajan, M. e Kothurkar, N. (2013). Optimization of the conductivity and yield of chemically synthesized polyaniline using a design of experiments. *Journal Applied Polymer Science*.

Kazem, N., Lessard, B., Maric, M., Duever, T. e Penlidis, A. (2014). Reactivity ratio estimation in radical copolymerization: from preliminary estimates to optimal design of experiments. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53:7305-7312.

Kittelson, W. K. e Roess, R. P. (2001). High Capacity Analysis After the HCM 2000. Presentation at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., Janeiro de 2001, CD-ROM.

Klodzinski, J. e Al-Deek, H.M. (2002a). Transferability of a stochastic toll plaza computer model. *Transportation Research Record*, 1811:40-49.

Klodzinski, J. e Al-Deek, H. M. (2002b). New Methodology for Defining Level Of Service at Toll Plazas. *Journal of Transportation Engineering*, 28:173-181.

Klodzinski, J. e Al-Deek, H. M. (2002c). Proposed Level of Service Methodology for Toll Plazas. Presentation at the 81th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., Janeiro de 2002, CD-ROM.

Kumar, V., Bhalla, A. e Rathore, A. (2014). Design of Experiments applications in Bioprocessing: concepts and approach. *Biotechnol. Prog.*, v. 30, n. 1.

Lazic, L. e Milinkovic, S. (2015). Reducing software defects removal cost via Design of Experiments using Taguchi approach. *Software Qual. Journal*, 23:267-295.

Lin, F.B. (2001). Delay model for planning analysis of main-line toll plazas. *Transportation Research Record*, 1776:69-74.

Lin, F.B. e Su, C.W. (1994). Level-of-service analysis of toll plazas on freeway main lines. *Journal of Transportation Engineering*, 120:246-263.

Macatangay, R., Sonkaew, T., Velazco, V., Berbig, C., Intarat, N., Nantajai, N. e Bagtasa, G. (2014). Factors influencing surface CO₂ variations in LPRU, Thailand and IESM Philippines. *Environmental Pollution*, 195:282-291.

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



- Maheshwari, V., Rangaiah, G. e Samavedham, L. (2013). Multiobjective framework for model-based Design of Experiments to improve parameters precision and minimize parameter correlation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52:8289-8304.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Industrial Experiments* (8th ed). Wiley: New York, NY.
- Nista, S., Peres, L., D'Ávila, M., Schmidt, F. e Mei, L. (2012). Nanostructured membranes Based on Cellulose Acetate Obtained by Electrospinning, Part 1: Study of the Best Solvents and Conditions by Design of Experiments. *Journal of Applied Polymer Science*, 126:E70-E78.
- Obelheiro, M., Cybis, H., Oliveira, M. e Ribeiro, J. (2011). Método para análise de níveis de serviço em praças de pedágio. *Transportes*, 19:18-27.
- Oliveira, J., Alvez, M. e Costa, J. (2015). Optimization of biogas production from *Sargassum* sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresource Technology*, 175:480-495.
- Oliveira, M. L. (2004) Fatores Intervenientes na Capacidade de Atendimento de Praças de Pedágio. Dissertação (Mestrado), 137 p., Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS, Porto Alegre.
- Oliveira, M. L., Neto, J. M. e Cybis, H. B. (2003). A Influência do Tamanho das Filas na Capacidade de Atendimento das Praças de Pedágio. Anais do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, v. 2, p. 1264-1275.
- Sanchez, S. M. (2008). Better than a Petaflop: The Power of Efficient Experimental Design. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, p.73-84.
- Transportation Research Board. (1997). Toll Plaza Design. National Cooperative Highway Research Program Report 240, Washington, DC.
- Van Dijk, N. M., Hermans, M. D., Teunisse, M. J. e Schuurman, H. (1999). Designing the Westerschelde tunnel toll plaza using a combination of queuing and simulation. Winter Simulation Conference Proceedings Part 22, 1272–1279.
- Woo, T. H. e Hoel, L. A. (1991). Toll plaza capacity and level of service. Transp. Res. Record 1320, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., p. 119-127.
- Xu, B. e Lin, B. (2015). Factors affecting carbon dioxide (CO₂) emissions in China's transport sector: a dynamic nonparametric additive regression model. *Journal of Cleaner Production*, 101:311-322.
- Yang, S., Hu, F. e Jaeger, C. (2016). Impact factors and risk analysis of tropical cyclones on a highway network. *Risk Analysis*, v. 36, n. 2.
- Zarrillo, M. L., Radwan, A. e Al-Deek, H. (1997). Modeling traffic operations at electronic toll collection and traffic management systems. *Computers and Industrial Engineering*, 33:857–860.
- Zhang, J., Li, H., Luo, Y. e Tang, G. (2012). Error analysis for rendezvous phasing orbital control using design of experiments. *Aerospace Science and technology*, 17:74-82.