

Simulação computacional do fluxo de trânsito de veículos em uma intersecção semaforizada da cidade de Caxias do Sul

Computational simulation of flow of motorized vehicles in traffic area with traffic lights in the city of Caxias do Sul

Cleiton Gaziero¹

Universidade de Caxias do Sul
cleiton.gaziero@gmail.com

Leandro Luís Corso¹

Universidade de Caxias do Sul
llcorso@yahoo.com.br

Gabriel Vidor²

Universidade de Caxias do Sul
gbvidor@ucs.br

Everton Marchioro Poli¹

Universidade de Caxias do Sul
everton.poli@gmail.com

Resumo. O presente estudo refere-se à aplicação da Simulação computacional e dos indicadores de Teoria das Filas em uma área de tráfego semaforizada de veículos motorizados na cidade de Caxias do Sul. Objetivou-se analisar os dados da situação atual do local escolhido, de modo a construir um modelo de Simulação e poder se levantar os indicadores de Teoria das Filas, em seguida, foram realizadas simulações visando à melhoria nos indicadores encontrados. O trabalho justifica-se pelo crescimento da frota de veículos na cidade, que levou ao aumento do fluxo de veículos. O trabalho foi aplicado durante o período de agosto de 2013 a junho de 2014. Ao final da aplicação do método, os itens propostos no plano de ação se cumpriram, possibilitando conhecer as condições atuais do local por meio da análise de dados e as alternativas que podem ser adotadas.

Palavras-chave: simulação, teoria das filas, fluxo de trânsito, pesquisa operacional.

Abstract. This study refers to computational simulation application and queuing theory indicators in a traffic area of motorized vehicles with traffic lights in the city of Caxias do Sul. This study aimed at analyzing the data of the current situation of the selected site in order to build a simulation model and to be able to calculate the queuing theory indicators. Then, alternative models were simulated aimed at improving the indicators found. The work is justified by the growth of the fleet of vehicles in the city, which led to increased traffic flow. The method was applied from August 2013 to June 2014. At the end of the method, the proposed items in the action plan were fulfilled, allowing the researchers to know the current site conditions through the analysis of data and the alternatives that can be adopted.

Keywords: simulation, queuing theory, traffic flow, operations research.

¹ Universidade de Caxias do Sul. Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, 95070-560, Petrópolis, Caxias do Sul, RS, Brasil.

² Universidade de Caxias do Sul. Rua João Dal Sasso, 800, 95700-000, Universitário, Bento Gonçalves, RS, Brasil.

Introdução

O seguinte trabalho analisou o comportamento do fluxo de veículos em uma intersecção semaforizada utilizando a Simulação computacional e os indicadores de Teoria das Filas.

O número de veículos por pessoa tem aumentado nos últimos anos em Caxias do Sul. Deve-se pensar, portanto, em diminuir o número de veículos circulando, diminuindo o fluxo de veículos, o que pode ser conseguido por meio de investimentos em transportes públicos eficientes, que consigam convencer as pessoas a trocarem o conforto de seus carros por eles ou da melhoria da infraestrutura das vias. Este trabalho visa analisar o problema na região estudada para que se possam ter indicadores para posteriores ações de melhoria.

Conforme Andrade (1998), a Simulação é uma ferramenta de apoio ao processo de tomada de decisão que consiste na construção de um modelo que imita o comportamento de um sistema real, reproduzindo a sucessão de estados pelos quais um sistema passa ou pode passar.

De acordo com Guidorizzi *et al.* (2009), o aumento dos fluxos de tráfego, decorrente do desenvolvimento urbano, está criando a necessidade da reprogramação dos tempos dos semáforos. Diversas técnicas são empregadas com o objetivo de conseguir melhorias na mobilidade urbana. Programar os semáforos com temporização adequada aos fluxos variáveis de tráfego é uma das dificuldades com que se defrontam os responsáveis pelos órgãos de gestão do tráfego das cidades.

A Simulação é uma ferramenta que pode ser utilizada para analisar o fluxo e programar a sincronização semafórica, visto que pode ser facilmente aplicada nessas situações. A maior vantagem do seu uso está na possibilidade de verificar qualquer situação, para constatar se ocorre ou não influência em outras áreas, evitando, assim, a inviabilização do projeto.

Os semáforos controlam a dispersão dos veículos nas intersecções, e o objetivo da sincronização semafórica é diminuir as filas de espera e, conseqüentemente, os congestionamentos. Além disso, resulta em impactos na velocidade geral do trânsito, pois reduz o número de paradas, agiliza o sistema e diminui os gastos com combustível.

Teoria das Filas

Segundo Prado (1999), a Pesquisa Operacional (PO) fornece ferramentas quantitativas

ao processo de tomada de decisão. A Teoria das Filas e a Simulação são duas entre várias áreas da PO e constituem a base teórica de *softwares* relacionados à Simulação.

Para Arenales *et al.* (2007), a Teoria das Filas auxilia no projeto e na operação de sistemas, para, por meio disso, encontrar um equilíbrio entre os custos de oferecer serviços e os custos dos atrasos sofridos pelos usuários do sistema. A formação de filas ocorre quando a demanda excede a capacidade do sistema de fornecer o serviço em certo período. As filas fazem parte do dia a dia das pessoas, que deparam-se com elas em várias situações, em bancos, supermercados, no trânsito, etc. Quanto menor é a capacidade do sistema, maior será o tempo médio de espera, conforme se aumenta a capacidade, esse tempo diminui.

Conforme Arenales *et al.* (2007), para se descrever e analisar um sistema de filas, é necessário a informação sobre três elementos, que são:

- (a) a entrada ou processo de chegada de usuários no sistema;
- (b) a disciplina da fila, ou seja, a ordem em que os usuários são atendidos;
- (c) a saída ou processo de serviço.

Segundo Arenales *et al.* (2007), os modelos de filas são originados por casos em que os processos de chegada ou serviço, ou ambos, são probabilísticos, resultando na formação de filas de espera e/ou perda de usuários em determinados instantes.

Na Figura 1, é apresentado o esquema de como os três elementos fundamentais de um sistema de filas se relacionam. Os usuários chegam ao sistema, esperam o serviço e, em seguida, são atendidos, para depois deixar o sistema.

Ainda conforme Arenales *et al.* (2007), a taxa de chegada de usuários por unidade de tempo (λ) no sistema é definido pelo oposto do intervalo de tempo médio entre chegadas dos usuários i e $(i-1)$. De forma semelhante, a taxa de serviço por unidade de tempo no servidor (μ), segundo os autores, é calculada pelo oposto do tempo médio de serviço do usuário i .

Conforme Adan e Resing (2001), o fator de utilização do sistema ρ pode ser definido por meio da multiplicação entre a taxa de chegada de usuários no sistema e o tempo médio de serviço, que também pode ser definido pela razão entre a taxa de chegada de usuários no sistema e a taxa total disponível de serviço no sistema.

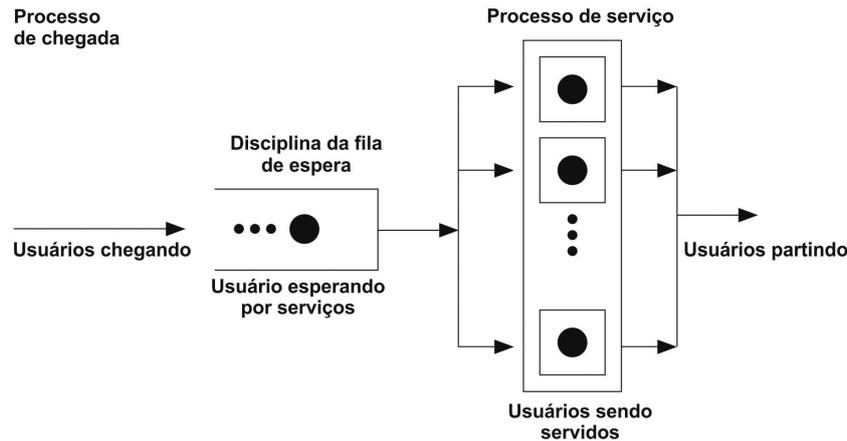


Figura 1. Processo de chegada, disciplina da fila e processo de serviço.
Figure 1. Arrival process, queue discipline and service process.

Fonte: Adaptado de Arenales *et al.* (2007).

Conforme Prado (1999), para um sistema de fila estável, ou seja, aquele onde μ é maior que λ , podem ser aplicados alguns postulados básicos, tais como: o fluxo que entra é igual ao fluxo que sai; além disso, o fluxo de entrada se mantém nas diversas seções do sistema.

Sistemas de filas não só diferem apenas em suas distribuições dos tempos de chegadas e serviço, mas também do número de servidores, do tamanho da fila de espera (finito ou infinito), da disciplina da fila, e assim por diante. Todas as variações de sistemas de filas geram diferentes modelos de filas, alguns deles muito difíceis de serem tratados analiticamente. Nesses casos, podem-se utilizar aproximações analíticas ou modelos de Simulação discreta. Para simplificar a análise, os mais simples foram classificados conforme a notação de Kendall-Lee, que considera sistemas de fila única com um ou mais servidores idênticos em paralelo. A notação é definida por $A/B/m/C/K/N$, cujos significados são indicados a seguir (Adan e Resing, 2001; Arenales *et al.*, 2007; Willig, 1999):

- (a) A representa a distribuição da probabilidade do processo de chegada;
- (b) B refere-se à distribuição de probabilidade do processo de serviço;
- (c) m indica o número de servidores em paralelo;
- (d) C especifica a disciplina da fila;
- (e) K indica o número máximo de usuários no sistema;
- (f) N refere-se ao tamanho da população.

Os estudos de Teoria das Filas requerem uma base em teorias de probabilidade. Para se anali-

sar estaticamente os dados, é necessário estudar os tipos de distribuições de probabilidade de chegadas e atendimento de usuários e de tempos de serviço. Segundo Willig (1999), todos os sistemas markovianos têm como característica comum o fato de as distribuições dos tempos entre chegadas de usuários no sistema e as distribuições dos tempos de serviço serem distribuições exponenciais e, portanto, apresentarem a propriedade de Markov (sem memória).

Simulação

A Simulação possui aplicações nas mais diversas áreas. Podem ser citados como exemplos o fluxo de trânsito, a programação de compra e a estocagem em supermercados, os pedágios, os estacionamentos, as operações logísticas e a área da saúde, entre outros. Basicamente, a Simulação é usada para a análise de processos como ferramenta de apoio à decisão.

Prado (1999, p. 93) define Simulação como uma técnica para solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital.

Devem ser observadas as seguintes condições antes de se optar pela Simulação (pelo menos uma delas deve existir para se utilizar a Simulação – Law e Kelton, 2000):

- (a) o sistema real não existe;
- (b) não há método analítico para resolução do modelo matemático;
- (c) a obtenção de resultados com o modelo é mais fácil de ser obtida por meio da Simulação do que por método analítico;

- (d) não é possível a experimentação no sistema real;
- (e) é desejado estudar longos períodos de tempo;
- (f) interpretação dos resultados por parte do usuário deve ser fácil;
- (g) A resolução de certos tipos de equações diferenciais, quando as condições de contorno levam a soluções analíticas complicadas ou impossíveis.

Podem-se citar algumas vantagens da utilização da Simulação, tais como: fácil compreensão na maior parte dos casos pelos agentes de decisão, possibilidade de controle do tempo, aquisição de visão sistêmica, exploração de possibilidades e diagnóstico de problemas, além de ser mais econômico do que efetuar o teste no sistema real, de permitir a identificação de gargalos e de permitir estudar e experimentar sistemas complexos (Andrade, 1998; Law e Kelton, 2000).

As etapas propostas por Andrade (1998) são semelhantes às apresentadas por Law e Kelton (2000) e são mostradas na Figura 2. Esses passos são usualmente utilizados no desenvolvimento de um trabalho de Simulação.

Conforme Law e Kelton (2000), o trabalho de Simulação pode ser desenvolvido segundo as seguintes etapas: formulação do problema, coleta de dados, definição do modelo, validação do modelo conceitual, construção e verificação do programa computacional, realização de execuções piloto, validação do modelo programado, projeto dos experimentos, realização das execuções de Simulação, análise de resultados e documentação e implementação.

Após a realização dessas etapas e da compreensão dos problemas, é possível a construção de cenários alternativos, visando testar hipóteses de melhorias. Nessa etapa, retorna-se à fase experimental, na qual várias alternativas propostas são consideradas e testadas, por meio das quais se podem fazer análises, a fim de se avaliar o efeito de possíveis alterações, antes que essas ocorram.

Intersecção selecionada

A seleção da zona urbana a ser modelada neste trabalho teve em atenção a concepção de um modelo representativo para se efetuar a análise pretendida. Também, levou-se em consideração o interesse prático que esta podia representar para os estudantes, professores, funcionários e outros frequentadores do Campus

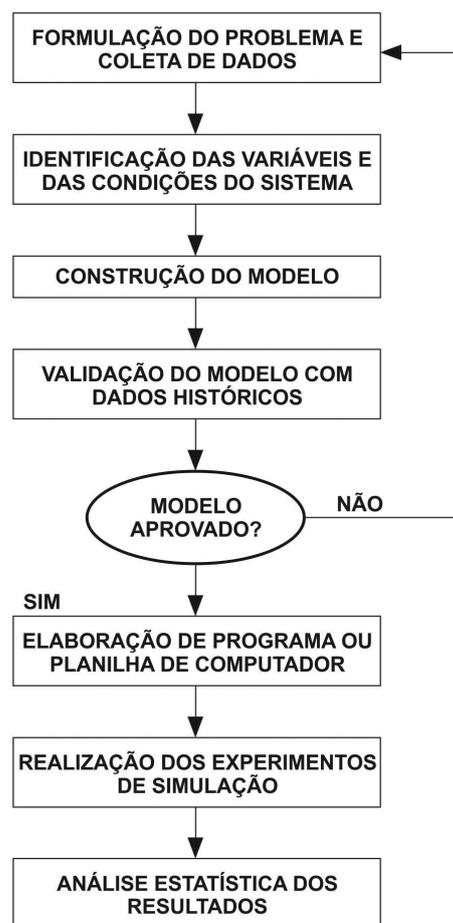


Figura 2. Etapas do processo de simulação.

Figure 2. Stages of the simulation process.

Fonte: Adaptado de Andrade (1998).

Universitário da Universidade de Caxias do Sul (UCS), bem como para a comunidade de Caxias do Sul em geral.

O local de estudo foi a intersecção da rodovia federal BR-116 com a saída frontal do Campus Universitário da UCS, localizado na zona leste da cidade de Caxias do Sul. Esse local foi escolhido devido ao alto fluxo de veículos que nele ocorre em determinados horários, o que acaba causando congestionamentos.

Para fins de facilitar a nomenclatura e o entendimento e diferenciar os semáforos, foram indicados números aos mesmos. O semáforo da BR-116 sentido sul é o semáforo 1, o da BR-116 sentido norte é o 2, e o semáforo da saída da UCS é o 3.

Na Figura 3, é apresentado o sentido do fluxo de veículos e a direções que cada condutor pode seguir após cruzar cada semáforo: vermelho representa o fluxo de trânsito da BR-116 sentido sul, o condutor pode seguir pela BR-116

ou virar à direita e ir pela Rua José Marques; amarelo representa o fluxo na BR-116 sentido norte, o condutor só tem a opção de seguir reto; azul representa o fluxo na saída da UCS, o condutor pode seguir reto pela Rua José Marques ou virar à esquerda e seguir pela BR-116 sentido sul.

Os horários de maior fluxo de veículos na rua de saída do Campus Universitário de Caxias do Sul da UCS acontecem entre as 18h00min e às 19h30min e entre as 22h00min e às 22h30min, desconsiderando o período de férias da UCS, que acontece nos meses de janeiro, fevereiro e julho. Na rodovia federal BR-116, os horários de maior movimento se dão entre as 17h e às 18h30min, de segunda a sexta-feira, com alguns picos esporádicos em outros horários, dependendo a época do ano, e na véspera de feriados.

Quanto ao número de faixas, as vias que se cruzam na intersecção selecionada apresentam características distintas. A rodovia federal BR-116, no sentido norte para sul, apresenta, junto ao semáforo, três vias. A BR-116, no sentido sul para norte, apresenta, junto ao semáforo, três vias. A saída do Campus Universitário da UCS apresenta, junto ao semáforo, quatro vias.

Resultados e aplicações

Circulação de ônibus e veículos pesados não foi diferenciada dos demais, ou seja, todos os veículos serão tratados como iguais. A circulação de motocicletas não foi considerada na coleta de dados.

A coleta de dados aconteceu das 18h00min às 19h00min, nas segundas-feiras, durante o período letivo da UCS, no mês de março de 2014. Esse período foi escolhido porque, por meio de observações preliminares, foi verificado que esse é um intervalo de tempo com fluxo intenso tanto na saída do Campus Universitário da UCS como na rodovia federal BR-116, com ocorrências de congestionamentos. Foram coletados os seguintes dados, necessários para a execução do trabalho:

- (a) o ritmo de chegada dos veículos, quantidade de carros que chegam ao semáforo;
- (b) tempos de operação dos semáforos;
- (c) quantidade de veículos que cruzam a intersecção no tempo de abertura do semáforo.

Em relação aos tempos de operação dos semáforos, os mesmos foram fornecidos pela Secretaria Municipal de Trânsito, Transportes e Mobilidade de Caxias do Sul (SMTTM). Para o horário de coleta de dados, o tempo de operação dos semáforos é apresentado na Tabela 1.

Para o registro das chegadas, foi coletado o tempo em que chegava cada veículo a cada semáforo. Os dados foram coletados durante o mês de março de 2014. Com isso, tem-se o número de veículos que chegou em cada um dos semáforos no intervalo de tempo que foi realizada a coleta.

Na Tabela 2, encontram-se parte dos dados coletados no Semáforo 1. Não foi possível apresentar todos os dados, pelo fato de a ta-

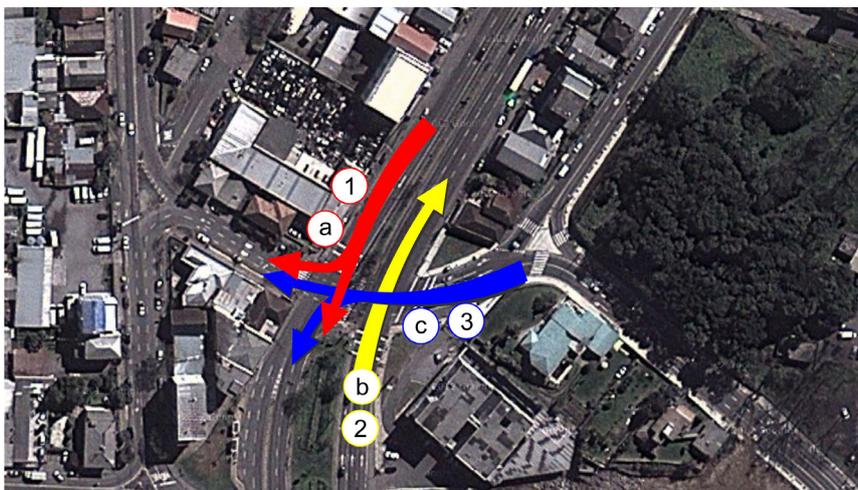


Figura 3. Fluxos de veículos e opções de direção da intersecção.

Figure 3. Vehicle flows and direction options of the intersection.

Fonte: Adaptado de Google Maps (2014).

Tabela 1. Tempo de operação dos semáforos.

Table 1. Operating time of traffic lights.

Fases	01	02	03	04	05	06	Legenda:	
Semáforo 1	V	A	R	R	R	R	V	Verde
Semáforo 2	V	A	R	R	R	R	A	Amarelo
Semáforo 3	R	R	R	V	A	R	R	Vermelho
Tempo (s)	64	4	2	42	4	4		
Total Ciclo (s)	120							

Fonte: Secretaria Municipal de Trânsito, Transportes e Mobilidade de Caxias do Sul (SMTTM).

Tabela 2. Chegadas de veículos ao Semáforo 1.

Table 2. Vehicle arrivals to traffic light 1.

Veículos (unid.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	1543
Tempo (s)	3	6	20	21	25	26	27	28	29	42	...	3124

bela completa apresentar 1.543 colunas. Pode-se observar que chegaram 1.543 veículos em 3.124 segundos.

Na Tabela 3, encontram-se parte dos dados coletados no Semáforo 2. Não foi possível colocar todos os dados, em função de a tabela completa apresentar 1.114 colunas. Pode-se observar que chegaram 1.114 veículos em 3.362 segundos.

Na Tabela 4, encontram-se parte dos dados coletados no Semáforo 3. Não foi possível apresentar todos os dados, pois a tabela completa contém 784 colunas. Pode-se observar que chegaram 784 veículos em 3.363 segundos.

Pode-se observar, por meio dos dados de chegadas, que o maior fluxo de veículos se encontra no Semáforo 1, na BR-116, no sentido sul.

Para se determinar o tempo de atendimento de cada semáforo, foram coletados, em cinco oportunidades, o número de veículos que passam pelo semáforo a cada abertura, ou seja, no tempo de verde e, eventualmente, no tempo de amarelo. Em seguida, foi realizada uma média entre esses cinco valores. Também foi verificada a direção em que cada carro vai após cruzar o semáforo.

A taxa de atendimento foi calculada sobre o tempo de ciclo do semáforo, tempo em que o semáforo passa pelos três estados, verde, amarelo e vermelho, pois, caso fosse calculado sobre o tempo de abertura do semáforo, os indicadores de Teoria das Filas ficariam incorretos, já que na Teoria das Filas não é possível prever paradas do servidor, no caso, o semáforo. Essa taxa, portanto, mostra quantos veículos cru-

zam o semáforo durante seu tempo de ciclo.

Os dados de tempo de atendimento do Semáforo 1 encontram-se na Tabela 5, e foram coletados no dia 7 de abril de 2014. O tempo de abertura desse semáforo é de 64 segundos.

Na Tabela 6, encontram-se os valores de tempo de atendimento para o Semáforo 2, que foram coletados no dia 7 de abril de 2014. O tempo de abertura desse semáforo é de 64 segundos.

Para o Semáforo 2, foi utilizado o mesmo tempo de atendimento do Semáforo 1, visto que ambos possuem o mesmo número de pistas e o mesmo tempo de abertura de semáforo. Nesse caso, foi utilizada a situação em que passam o maior número de carros. Após cruzar esse semáforo, os veículos só têm uma opção de sentido a seguir, que é continuar reto pela BR-116.

Os tempos de atendimento do Semáforo 3 encontram-se na Tabela 7, e foram coletados no dia 7 de abril de 2014. O tempo de abertura desse semáforo é de 42 segundos.

Quanto ao ritmo de chegada de veículos, foi estipulado o intervalo de tempo de 1 segundo, e, para esse intervalo, foi verificada a quantidade de carros que chegam ao semáforo. Foram calculadas a frequência absoluta, a frequência relativa de ocorrência de chegadas de veículos ao semáforo e a frequência obtida pela distribuição de Poisson.

Na Tabela 8, encontram-se os valores de frequência absoluta e relativa, além da frequência obtida pela distribuição de Poisson para o Semáforo 1.

Por meio dos dados obtidos, foi possível calcular a taxa média de chegadas (λ), que foi

Tabela 3. Chegadas de veículos ao Semáforo 2.**Table 3.** Vehicle arrivals to traffic light 2.

Veículos (unid.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	1114
Tempo (s)	4	28	49	51	52	55	56	62	62,5	64	...	3362

Tabela 4. Chegadas de Veículos ao Semáforo 3.**Table 4.** Vehicle arrivals to traffic light 3.

Veículos (unid.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	784
Tempo (s)	2	6	8	8,5	13	14	18	18,5	20	23	...	3363

Tabela 5. Tempo de atendimento Semáforo 1.**Table 5.** Service time of traffic light 1.

Quantidade de carros por abertura de semáforo	Quantidade de carros para a direita	% de carros à direita	Quantidade de carros seguindoreto	% de carros reto	Taxa de atendimento (μ) (veículos/s)
66	8	12	58	88	0,55
60	4	7	56	93	0,50
56	10	18	46	82	0,47
66	8	12	58	88	0,55
64	12	19	52	81	0,53
	Média	14		86	0,52

Tabela 6. Tempo de atendimento do Semáforo 2.**Table 6.** Service time of traffic light 2.

Quantidade de carros por abertura de semáforo	Taxa de atendimento (μ) (veículos/s) pelo tempo de ciclo
46	0,3833
52	0,4333
38	0,3167
34	0,2833
52	0,4333
Média	0,37

de 0,4938 veículos por segundo.

Na Tabela 9, encontram-se os valores de frequência absoluta e relativa, além da frequência obtida pela distribuição de Poisson para o Semáforo 2.

Por meio dos dados, foi possível calcular a taxa média de chegadas (λ), que foi de 0,3312 veículos por segundo.

Na Tabela 10, encontram-se os valores de frequência absoluta e relativa, além da frequência obtida pela distribuição de Poisson para o Semáforo 3.

Por meio dos dados, foi possível calcular a taxa média de chegadas (λ), que foi de 0,23306

veículos por segundo.

No gráfico da Figura 4, tem-se o comparativo da frequência relativa com a frequência obtida pela distribuição de Poisson. Segundo Mood *et al.* (1974), a distribuição de Poisson se aproxima de uma distribuição normal, com o relativo aumento do λ , por esse motivo, foi utilizada essa aproximação.

Pelo gráfico, é possível observar que as frequências estão próximas uma da outra. Por meio do que foi observado pelo gráfico, pode ser considerado que as chegadas de veículos aos três semáforos seguem uma distribuição de Poisson.

Tendo em posse os valores de λ e μ de cada

Tabela 7. Tempo de atendimento do Semáforo 3.

Table 7. Service time of traffic light 3.

Quantidade de carros por abertura de semáforo	Quantidade de carros para a esquerda	% de carros à esquerda	Quantidade de carros seguindo reto	% de carros reto	Taxa de atendimento (μ) (veículos/s)
48	6	13	42	88	0,4000
44	14	32	30	68	0,3667
46	12	26	34	74	0,3833
42	10	24	32	76	0,3500
44	14	32	30	68	0,3667
	Média	25		75	0,3733

Tabela 8. Frequências para intervalo de tempo de 1s no Semáforo 1.

Table 8. Frequencies for a time interval of 1 sec at traffic light 1.

Ritmo	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência obtida pela distribuição de Poisson
0	1648	0,5274	0,6104
1	1410	0,4512	0,3014
2	65	0,0208	0,0744
3	1	0,0003	0,0122
4	0	0	0,0015
5	0	0	0,0001

Tabela 9. Frequência para intervalo de tempo de 1s no Semáforo 2.

Table 9. Frequencies for a time interval of 1 sec at traffic light 2.

Ritmo	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência obtida pela distribuição de Poisson
0	2318	0,6893	0,7180
1	976	0,2902	0,2379
2	66	0,0196	0,0394
3	2	0,0006	0,0043
4	0	0	0,0004
5	0	0	2,39E-05

Tabela 10. Frequência para intervalo de tempo de 1s no Semáforo 3.

Table 10. Frequencies for a time interval of 1 sec at traffic light 3.

Ritmo	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência obtida pela distribuição de Poisson
0	2581	0,7672	0,7921
1	780	0,2319	0,1846
2	2	0,0006	0,0215
3	0	0	0,0017
4	0	0	9,74E-05
5	0	0	4,54E-06

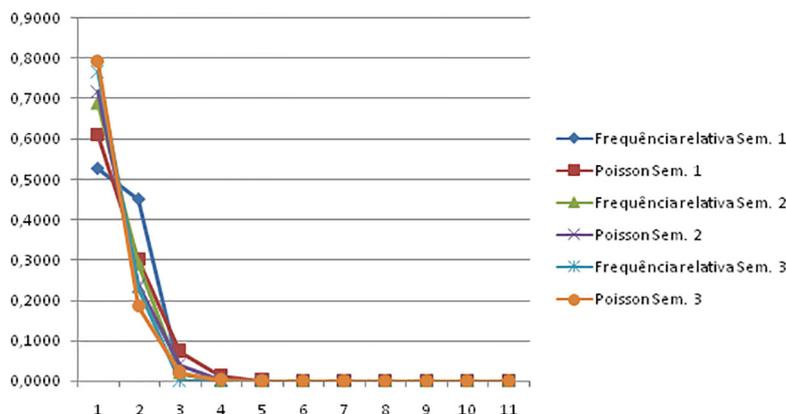


Figura 4. Frequência para intervalo de tempo de 1s.
Figure 4. Frequency for time interval of 1 sec.

semáforo, foram calculados os indicadores de filas por meio de equações matemáticas de Teoria das Filas do modelo M/D/1, devido ao tempo de atendimento ser determinístico. São eles:

- tempo médio que cada veículo espera até o semáforo ficar verde (TF);
- quantidade média de veículos aguardando a abertura do semáforo (NF);
- tempo médio que cada cliente fica na fila e em movimento dentro da área de estudo (TS);
- quantidade média de veículos na fila e em movimento (NS);
- probabilidade de existir um número n de clientes na fila.

Na Tabela 11, encontram-se os indicadores dos três semáforos. Pode-se observar que o Semáforo 1 possui os maiores valores tanto para tempo de espera como para número de veículos, o que é devido à sua maior taxa de chegadas de veículos.

Na Figura 5, são apresentadas as probabilidades de se ter um determinado número de veículos esperando na fila para cada um dos semáforos.

Como se verificou, a Teoria das Filas não é o método mais indicado para analisar o comportamento de semáforos, visto que ela não considera os tempos que o semáforo está fechado para os cálculos do tempo de espera e o tamanho da fila. Também pode prejudicar a análise, por considerar a capacidade como uma média ao longo do tempo. Devido a isso, a Simulação é aplicada.

Para a realização da programação do modelo em linguagem computacional, foi sele-

cionado o *software Promodel Student Version 7.5*, devido à sua flexibilidade na modelagem, *interface* gráfica de fácil compreensão e características visuais oferecidas.

O modelo foi construído de modo a representar a situação real, respeitando as limitações do *software*. Para a construção do modelo, foram considerados os seguintes pressupostos:

- a velocidade considerada para os veículos foi de aproximadamente 40km/h. como o *software Promodel* utiliza como unidade de velocidade, metros por minuto (mpm), foi utilizado o valor de 669mpm;
- o tempo de semáforo de amarelo foi considerado como 50% de verde e 50% de vermelho, ou seja, como o tempo de amarelo é de 4 segundos, dois foram considerados como verde e outros dois como vermelho;

Os elementos do *software Promodel* foram relacionados com os elementos da situação estudada, conforme a seguir:

- os veículos são as Entidades, pois são eles que se movimentaram pelo sistema e sofrem processos;
- os semáforos são Locais, pois por meio deles passam os veículos (entidades). Os locais chamados semáforos mostram quando o semáforo da situação real está verde (disponível) ou vermelho (ocupado);
- as vias foram feitas através das Redes de Caminho, que indicam por onde os veículos passam – as medidas utilizadas no modelo são aproximações das vias no local observado.

Tabela 11. Indicadores de Teoria das Filas.
Table 11. Queuing Theory Indicators.

Indicador	Semáforo 1	Semáforo 2	Semáforo 3
λ (veículos/segundo)	0,4938	0,3313	0,2331
μ (veículos/segundo)	0,5200	0,5200	0,3733
NS (veículos)	9,8833	1,1960	1,1429
NF (veículos)	8,9338	0,5590	0,5186
TS (segundos)	20,0164	3,6106	4,9038
TF (segundos)	18,0933	1,6875	2,2252
ρ	0,9495	0,6370	0,6243

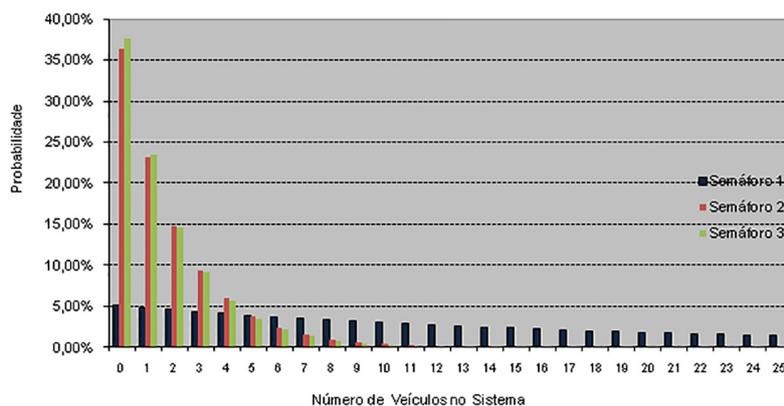


Figura 5. Probabilidades de veículos na fila de espera.
Figure 5. Probabilities of vehicles in queue.

Na Figura 6, é mostrado o modelo construído no *software Promodel*, com os locais, entidades, vias e inter-relacionamentos.

A etapa de validação consistiu na comparação do modelo com o sistema real, de modo a encontrar possíveis erros de construção do modelo. Devido ao fato de não existirem dados históricos sobre o fluxo de veículos no local, essa etapa acabou comparando o modelo apenas com as observações das movimentações no local de estudo. O modelo foi calibrado, portanto, com os dados que existiam para o modelo real, ou seja, o número de carros que chegam ao intervalo de uma hora em cada semáforo. Na Tabela 12, é feita uma comparação de quantos veículos chegaram ao semáforo na coleta de dados e quantos chegaram na Simulação.

Para a realização dos experimentos de Simulação, foram definidos o tempo de aquecimento (*warm-up*) e o número de replicações. Isso se deve ao fato dos dados de entrada pertencem a uma distribuição de probabilidades, no caso o Poisson, ou seja, não têm natureza

determinística, e sim estocástica, consequentemente, as saídas também serão de natureza estocástica.

Para se definir o tempo de aquecimento, foi definida uma variável de saída e acompanhada a sua variação, conforme o aumento do tempo de Simulação. Como variável de saída foi definido o tempo médio de espera na fila do Semáforo 3, variável essa escolhida por ter uma representatividade maior para o trabalho, devido a ser o semáforo de saída da UCS – contudo, a variável pode ser escolhida de forma aleatória.

Em seguida, foram realizadas quatro replicações para tempos de Simulação que aumentavam de 5 em 5 minutos. Para essas replicações, foi calculada a média dos valores obtidos, conforme a Tabela 13.

De posse desses resultados, pode-se traçar um gráfico, no qual, no eixo das ordenadas, está o tempo médio de espera na fila no Semáforo 3 e, no eixo das abscissas, o tempo decorrido de Simulação. O ponto em que o formato

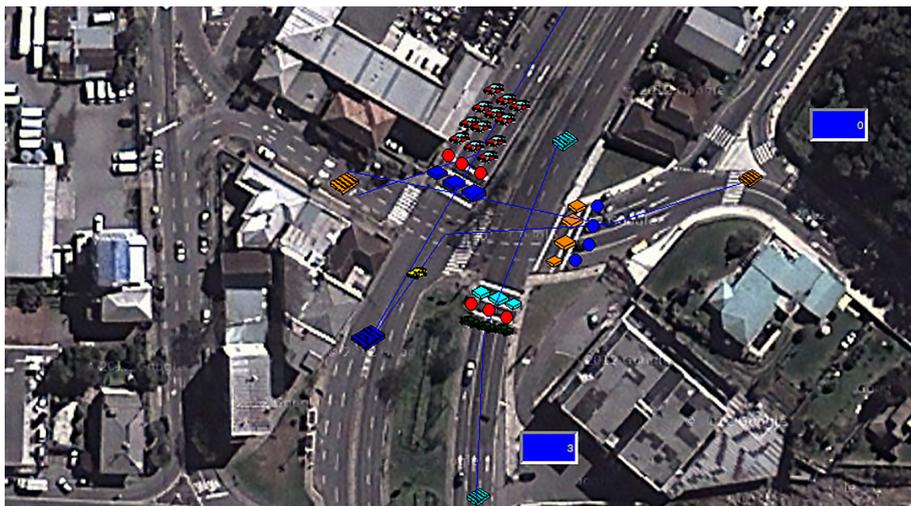


Figura 6. Construção de modelo no Promodel.
Figure 6. Construction of model in Promodel.

Tabela 12. Chegadas de veículos ao semáforo.
Table 12. Arrivals of vehicles at traffic light.

	Real	Modelo	Diferença (%)
Semáforo 1	1.781	1.772	0,51%
Semáforo 2	1.192	1.212	1,68%
Semáforo 3	839	847	0,95%

Tabela 13. Definição do tempo de aquecimento.
Table 13. Warm-up time.

Tempo de Simulação (min)	Tempo médio de espera na fila no semáforo 3 (s)				
	Replicação 1	Replicação 2	Replicação 3	Replicação 4	Média
5	26,91	23,05	32,95	12,69	23,90
10	26,67	31,52	30,45	29,68	29,58
15	27,4	25,88	24,44	28,75	26,62
25	28,02	29,13	26,28	27,51	27,74
30	27,18	28,44	25,33	27,13	27,02
35	27,13	28,04	26,84	27,03	27,26
40	27,1	27,21	27,11	28,61	27,51
45	26,8	24,42	28,49	27,7	26,85
50	26,59	25,8	25,7	26,58	26,17
55	26,76	26,09	26,6	27,66	26,78
60	27,27	26,66	24,66	26,51	26,28

da curva se estabilizar será aquele em que o sistema atingiu seu estado estável, e, portanto é o período de aquecimento. Portanto, conforme a Figura 7, estimou-se que o tempo de aquecimento é de 15 minutos, ou de 0,25 horas.

Para se determinar o número de replicações necessárias, foram realizadas 10 replicações. Para cada replicação, foi obtido um valor diferente para o tempo médio de espera na fila no Semáforo 3, que é representado por X. Após isso, foi calculado o desvio em relação à média de X e o quadrado desse valor, conforme apresentado na Tabela 14.

Por meio desses dados, obtêm-se o número de replicações que são necessárias, tendo em vista essa amostra, para que se obtenha 95% de

confiança de que a diferença entre a média dos resultados obtidos (X) e a verdadeira média μ não seja maior que 1 segundo. Calculando-se o desvio-padrão S da amostra, tem-se 1,1642.

Como $(\alpha - 1)100 = 95$, tem-se que $\alpha = 0,05$. Da tabela de distribuição t, obtém-se que $t = 2,262$.

Substituindo-se esses valores na equação, considerando-se que a diferença máxima que se quer entre X e μ é de uma unidade ($X - \mu = 1$), tem-se que o número de replicações é 6,3934, arredondando para cima, tem-se 7 replicações.

Na etapa de Análise de Resultados, são apresentados os resultados da Simulação, com base no que foi definido nas etapas anteriores. Os indicadores obtidos por meio da Simulação são mostrados na Tabela 15.

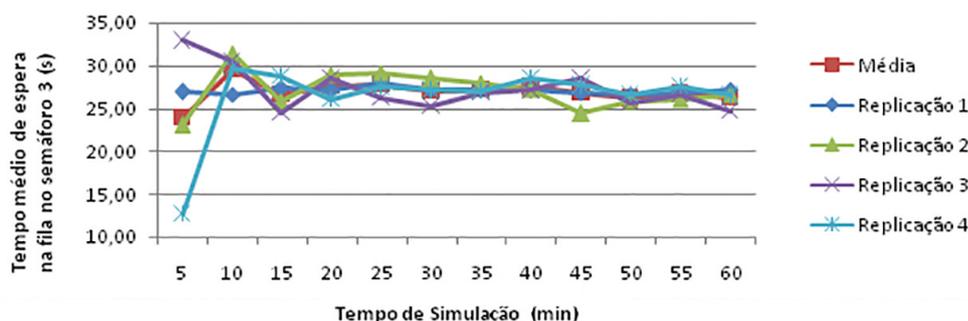


Figura 7. Gráfico do tempo de aquecimento.
Figure 7. Graphic of warm-up time.

Tabela 14. Definição do número de replicações.
Table 14. Definition of the number of replications.

Replicações	Tempo médio de espera na fila no semáforo 3 (s) (X)		
1	27,04	0,558	0,31136
2	26,75	0,268	0,07182
3	28,3	1,818	3,30512
4	27,11	0,628	0,39438
5	25,5	-0,982	0,96432
6	26,69	0,208	0,04326
7	24,46	-2,022	4,08848
8	25,86	-0,622	0,38688
9	27,7	1,218	1,48352
10	25,41	-1,072	1,14918
Média	26,482		12,1984

Tabela 15. Resultados da simulação.**Table 15.** Simulation results.

Indicadores	Semáforo 1	Semáforo 2	Semáforo 3
Tempo médio na fila (segundos)	24,83	15,98	26,55
Tempo médio no sistema (segundos)	34,73	25	37,57
Número médio de carros na fila	13	6	7
Número médio de carros na fila por pista	5	2	2
Tamanho médio da fila (metros)	12,5	5	5
Tempo máximo na fila (segundos)	69,38	60,15	83,50
Número máximo estimado de carros na fila	27	18	18
Número máximo estimado de carros na fila por pista	9	6	5
Tamanho máximo da fila (metros)	22,5	15	12,5

Os dois primeiros indicadores, tempo médio na fila e tempo médio no sistema, foram gerados automaticamente pelo *software Promodel*. Os demais indicadores foram calculados por meio desses primeiros e utilizando-se as demais informações obtidas na coleta de dados. Para o cálculo do tamanho da fila em metros, foi considerado que cada carro possui 2,5 metros de comprimento.

Como pode ser visto, apesar de ter um fluxo menor de chegada de veículos, o Semáforo 3 possui o tempo médio de espera na fila maior, de 26,55 segundos. Consequentemente, o tempo médio no sistema e o tempo máximo na fila também serão maiores. Isso se deve ao fato de que o Semáforo 3 é o que possui menor tempo de abertura em relação aos outros. O tempo de abertura nos Semáforos 1 e 2 é 52% maior que o tempo de abertura no Semáforo 3.

Quanto aos indicadores que se referem ao tamanho da fila, os maiores valores estão no Semáforo 1, o que se deve ao número de pistas – enquanto no Semáforo 1 existem três pistas, no Semáforo 3 existem quatro.

De posse dos resultados da Simulação, foi possível elaborar alguns cenários alternativos, de modo a melhorar os indicadores. Os cenários foram elaborados em função dos resultados encontrados. Esses cenários visam analisar se a mudança de alguns aspectos acarreta melhora em indicadores. Contudo, eles não avaliaram a viabilidade de realização das propostas, pois isso dependeria de fatores como engenharia de tráfego da SMTTM e alterações

na BR-116, que não são abrangidos pelo presente trabalho.

A proposta 1 considera a inclusão de uma nova pista na BR-116 sentido sul. Com isso, passariam a ter quatro pistas, em vez das três do modelo atual. Os resultados da Simulação são apresentados na Tabela 16.

Essa proposta apresentou quase 28% de redução no tempo médio de espera na fila e 40% de redução no tamanho da fila, entre outros. Ela apresenta bons resultados, mas apenas para o Semáforo 1 – no Semáforo 3, os indicadores não se alteram consideravelmente, já que essa proposta afeta apenas o Semáforo 1.

Na Tabela 17, são mostrados os resultados para o cenário 2, que consiste na alteração dos tempos de abertura do semáforo. Os Semáforos 1 e 2 teriam seus tempos de abertura reduzidos de 64 segundos para 59 segundos, enquanto o Semáforo 3 teria o tempo aumentado de 42 segundos para 47 segundos. O ciclo do semáforo, tempo em que o semáforo passa pelos três estágios, foi mantido, ou seja, continuou em 2 minutos.

Como visto, esses cinco segundos não representaram uma melhora no Semáforo 3, apenas 9% de redução no tempo médio de espera na fila. Em compensação, os indicadores dos Semáforos 1 e 2 aumentaram consideravelmente, pois o tempo médio de espera na fila aumentou 163% no Semáforo 1 e 20,84% no Semáforo 2, além de um aumento de 120% no tamanho da fila no Semáforo 1 e de 50% no Semáforo 2. Isso mostra não ser uma opção viável.

Tabela 16. Cenário 1.

Table 16. Scenario 1.

Indicador	Semáforo 1			Semáforo 2			Semáforo 3		
	Atual	Cenário 1	Dif.	Atual	Cenário 1	Dif.	Atual	Cenário 1	Dif.
Tempo médio na fila (s)	24,83	17,92	-27,83%	15,98	15,90	-0,50%	26,55	27,08	2,00%
Tempo médio no sistema (s)	34,73	27,41	-21,08%	25,00	24,94	-0,24%	37,57	38,1	1,41%
Nº médio de carros na fila	13	9	-30,77%	6	6	0,00%	7	7	0,00%
Nº médio de carros na fila por pista	5	3	-40,00%	2	2	0,00%	2	2	0,00%
Tamanho médio da fila (m)	12,5	7,5	-40,00%	5	5	0,00%	5	5	0,00%
Tempo máximo na fila (s)	69,38	63,23	-8,87%	60,15	60,15	0,00%	83,50	83,50	0,00%
Nº máximo estimado de carros na fila	27	27	0,00%	18	18	0,00%	18	18	0,00%
Nº máximo de carros na fila por pista	9	7	-22,22%	6	6	0,00%	5	5	0,00%
Tamanho máximo da fila (metros)	22,5	17,5	-22,22%	15	15	0,00%	12,5	12,5	0,00%

Tabela 17. Cenário 2.**Table 17.** Scenario 2.

Indicador	Semáforo 1			Semáforo 2			Semáforo 3		
	Atual	Cenário 3	Dif.	Atual	Cenário 3	Dif.	Atual	Cenário 3	Dif.
Tempo médio na fila (s)	24,83	65,43	163,51%	15,98	19,31	20,84%	26,55	24,09	-9,27%
Tempo médio no sistema (s)	34,73	75,51	117,42%	25,00	28,09	12,36%	37,57	34,92	-7,05%
Nº médio de carros na fila	13	33,00	153,85%	6	7,00	16,67%	7	6,00	-14,29%
Nº médio de carros na fila por pista	5	11,00	120,00%	2	3,00	50,00%	2	2,00	0,00%
Tamanho médio da fila (metros)	12,5	27,50	120,00%	5	7,50	50,00%	5	5,00	0,00%
Tempo máximo na fila (s)	69,38	92,85	33,81%	60,15	68,23	13,43%	83,50	79,50	-4,79%
Nº máximo estimado de carros na fila	27	30,00	11,11%	18	20,00	11,11%	18	17,00	-5,56%
Nº máximo estimado de carros na fila por pista	9	10,00	11,11%	6	7,00	16,67%	5	5,00	0,00%
Tamanho máximo da fila (metros)	22,5	25,00	11,11%	15	17,50	16,67%	12,5	12,50	0,00%

Além das propostas estipuladas anteriormente, poderiam ser levantadas inúmeras outras. As aqui apresentadas foram usadas apenas para ilustrar o que poderia ser feito. Poderiam ser testadas inúmeras outras variações de temporização de semáforos, por exemplo.

Conclusões

O presente estudo analisou o comportamento do fluxo de veículos da intersecção da BR-116 com a saída da Universidade de Caxias do Sul, durante o mês de março de 2014, as segundas-feiras, das 18h00 às 19h00.

A Simulação mostrou-se o método mais eficaz para avaliar o comportamento de uma intersecção, visto que a Teoria das Filas considera a capacidade como uma média ao longo do tempo.

Buscar um equilíbrio para o fluxo de veículos em uma intersecção, como visto, é uma situação um tanto complexa e subjetiva, mesmo por meio de cálculos e modelos matemáticos. Isso leva a pensar que, sem esses modelos analíticos, essa questão se tornaria ainda mais complexa.

A Simulação permitiu a construção de vários cenários, mudando-se pequenos parâmetros no modelo inicialmente construído, o que

permite maior rapidez no teste e na avaliação de alternativas. A Simulação, por si só, não realiza uma otimização, mas é uma ferramenta útil no apoio à tomada de decisão.

Outros estudos poderiam ser feitos nessa área, tais como abranger um tempo maior de coleta, diferenciar carros, ônibus, caminhões e motocicletas, caso se quisesse estudar e identificar o fluxo de cada tipo de veículos separadamente.

O presente estudo mostrou que o fluxo nessa área está intenso, principalmente na BR-116 no sentido sul, considerando o horário de coleta de estudos. Se a tendência de aumento de carros nas ruas se mantiver como nos últimos anos, isso irá se agravar se não for feita nenhuma melhoria na questão de mobilidade urbana.

Os resultados da Simulação mostraram que o tempo médio de espera na fila está maior na saída da UCS, com 26,55 segundos; em compensação, o tamanho médio da fila é maior na BR-116 sentido sul, com 12,5 metros. Os cenários alternativos foram elaborados em função dos resultados encontrados, sendo que, alterando-se algumas configurações, foi possível diminuir um pouco esses indicadores, como o tempo médio de espera na fila, que ficou em 17,92 segundos nos cenários 1 e 2, devido ao aumento do número de pistas na BR-116 sentido sul.

Referências

- ADAN, I; RESING, J. 2001. *Queueing Theory*. Eindhoven, Eindhoven University of Technology Department of Mathematics and Computing Science, 180 p.
- ANDRADE, E.L. 1998. *Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para a Análise de decisão*. 2ª ed., Rio de Janeiro, LTC Editora, 275 p.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.A.; MORABITO, R.; YANASSE, H.H. 2007. *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro, Elsevier, 523 p.
- GUIDORIZZI, M.S.; SANTOS, A.P.B ; OLIVEIRA, A.B.; LEONARDI, F. 2009. Simulação como Apoio a Tomado de Decisão para a Solução de Problemas Causados pelos Gargalos Formados no Trânsito. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 29, Salvador, 2009. *Anais...* Salvador, p. 1-15.
- LAW, A.M.; KELTON, W.D. 2000. *Simulation modeling and analysis*. 3ª ed., Boston, McGraw-Hill, 760 p.
- MOOD, A.M.; GRAYBILL, F.A.; BOES, D.C. 1974. *Introduction to the Theory of Statistics*. Oxford, McGraw-Hill, 564 p.
- PRADO, D.S. 1999. *Teoria das filas e da Simulação*. Belo Horizonte, Editora de Desenvolvimento Gerencial, 122 p.
- WILLIG, A. 1999. *A Short Introduction to Queueing Theory*. Berlin, Technical University Berlin, 41 p.

Submetido: 09/11/2014

Aceito: 23/12/2014