

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE ROTAS DE ÔNIBUS: SCHEDULING VERSUS SISTEMA AUTO-ORGANIZANTE

ANDRÉIA MORAES FERREIRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
andreiamoraesferreira@gmail.com

CRISTIANO TOREZZAN
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
cristiano.torezzan@fca.unicamp.br

RESUMO

Este trabalho utiliza simulação computacional para comparar o desempenho de uma rota de ônibus gerenciada por tabela de horários fixos com uma rota que se organiza pelo conceito de sistemas auto-organizantes, que propõe o abandono da tabela de horários e promete desempenho equivalente. As simulações realizadas consideram uma linha que possui pontos no centro de uma cidade e também em um bairro. As variações das condições do trânsito são modeladas por uma variável de Poisson com média que varia entre zero e dez minutos. Os resultados computacionais mostraram que ambos os sistemas tem, de fato, desempenho similar em relação ao tempo de passagem dos ônibus nos pontos, mas o gerenciamento através de sistemas auto-organizantes obteve desempenho ligeiramente superior em relação ao tempo de parada dos ônibus no ponto de controle. O tempo de parada é importante para atender aspectos da legislação trabalhista e também implica em economias para a frota.

Palavras-chave: Simulação; Logística e Transportes; sistemas auto-organizantes.
Área: LT - Logística e Transportes.

ABSTRACT

In this paper we use computer simulation to compare the performance between a bus route that is under a scheduling system with a route that is organized by the concept of self-organizing systems. The simulations consider a bus route that has bus-stop at the downtown and also at a calm neighborhood. The traffic variations are modeled as a Poisson process with average between 0 and 10 minutes. The results show that both systems have similar performance in terms of the time past between the stops, but self-organizing systems

performed better in the waiting time at the control point, which is an important measure in this problem.

Keywords: Simulation; Logistics and Transportation; self-organizing systems.

1. INTRODUÇÃO

Os fundamentos dos sistemas auto-organizantes foram inicialmente formulados por William Ross Ashby em 1947. Ashby (1947, p.267) apresenta dois significados diferentes para sistemas auto-organizantes: o primeiro está relacionado a sistemas que possuem partes separadas e que se juntam para formar conexões entre si, com o objetivo de aumentar ou potencializar suas relações; um segundo significado relaciona sistema auto organizante à mudança de uma organização ruim para uma organização boa, de acordo com regras retiradas de dentro da própria organização. Por exemplo, uma criança que possui um cérebro organizado para procurar fogo e, depois que uma mudança significativa ocorra, uma nova organização do cérebro faz com que ela fuja do fogo.

Alguns anos depois, o conceito de sistemas auto-organizantes ganhou força quando Ilya Prigogine recebeu o Prêmio Nobel em 1977. Prigogine constatou que quando os sistemas são levados a situações distantes do equilíbrio, eles começam a se auto-organizar no intuito de buscar o equilíbrio (apud Chiavenato, 2003). É possível verificar esse conceito em ecossistemas de florestas tropicais, no cérebro humano ou em formigueiros, por exemplo. Esses sistemas auto organizantes são complexos e surgem a partir da organização (voluntária ou não) de agentes individuais que interagem a fim de criar um sistema autogerenciável, organizado e completamente cooperativo.

Nos últimos anos, biólogos, engenheiros e cientistas em geral tem procurado aplicar estes conceitos para modelar problemas reais e buscar soluções auto-organizantes.

Neste trabalho, rotas de ônibus urbanos são analisadas sob esta ótica. Quando ônibus circulam em uma rota urbana, é ideal que tempo entre a chegada sucessiva de ônibus nos pontos fosse igual. Porém, na prática, é impossível manter progressos exatamente iguais devido à variação do tráfego e por causa da entrada e saída de passageiros. Essas variações inevitavelmente fazem com que alguns ônibus se atrasem em relação aos outros e, quanto maior o atraso, maior a tendência de aumentar o atraso nos pontos seguintes. Esse fenômeno é a causa do chamado “*Bus Bunching*” ou *aglomeração de ônibus*, no qual os ônibus são levados a uma condição distante da condição de equilíbrio.

O estudo de caso conduzido por Bartholdi (2011) propõe que a rede de transporte de ônibus se comporte como um sistema auto-organizante. Ele desenvolve um método de coordenação de ônibus que tende a equalizar o progresso dos ônibus. De acordo com esse método, os ônibus se tornam auto-equalizadores. Ou seja, depois de qualquer interrupção que o ônibus sofra, eles vão conseguir se adequar em intervalos iguais e, conseqüentemente, evitarão uma aglomeração.

Outros estudos levam em consideração o uso de cronogramas alvos (*scheduling*), no qual o horário de chegada de cada ponto de controle é planejado minuto a minuto, ou o uso de avanços alvos, quando um ônibus chega ao ponto de controle, seu progresso é comparado com um valor alvo pré-estabelecido. No entanto, as condições de tráfego, hábitos do motorista

e número de passageiros que embarcam e desembarcam em cada ponto são variáveis que dificultam a coordenação de ônibus baseado em avanços alvo, sobretudo em situações de maior variabilidade, como aquelas encontradas nos centros de grandes cidades.

Bartholdi (2011) propõe abandonar a noção de cronograma para assim o sistema ficar livre para expressar seu progresso natural e tentar equilibrar o avanço mesmo na presença de perturbações. Através de uma função (auto-organizante) que controla o tempo que cada ônibus deve ficar parado no ponto de controle, é possível demonstrar que o sistema irá convergir para o menor avanço comum possível dada a capacidade atual e demanda sobre o sistema.

Neste trabalho realizamos um estudo através de simulação computacional para comparar o desempenho de uma rota de ônibus que esteja sob o sistema de Scheduling com uma rota que se organize pelo conceito de sistemas auto-organizantes proposto por Bartholdi (2011). Para que seja possível sua comparação, ambas sofrerão o mesmo tipo de perturbação aleatória que representa as variações do trânsito.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 discutimos os principais modelos utilizados para gerenciamento de rotas de ônibus urbanos e apresentamos a ideia de proposta em Bartholdi (2011) que aplica o conceito de sistemas auto-organizantes. Na Seção 3, consideramos um cenário mais próximo do que é encontrado nas cidades brasileiras e definimos o problema sob o qual serão feitas as simulações. Na Seção 4 apresentamos os resultados computacionais e na Seção 5 incluímos nossas considerações finais.

2. GERENCIAMENTO DE ROTAS DE ÔNIBUS URBANOS

2.1. COORDENAÇÃO DE ÔNIBUS

Rotas urbanas de ônibus são em geral gerenciadas por cronogramas alvos, no qual o horário de chegada de cada ponto é planejado minuto a minuto em uma tabela de horários (ou *scheduling*). Caso o ônibus chegue adiantado no ponto de controle, ele deve ficar esperar o equivalente de tempo extra que ele chegou adiantado. Dessa forma, esse atraso planejado ajuda a recuperar o cronograma. Por outro lado, se o ônibus estiver atrasado em relação ao cronograma, o ônibus pode prejudicar uma parte do planejamento ou ele por completo.

Recentemente, Daganzo (2009) propôs uma abordagem que focava em um avanço alvo. Quando um ônibus chega ao ponto de controle, seu progresso é comparado com um valor alvo pré-estabelecido. Se o avanço é menor, o ônibus é dito estar andando muito perto do seu predecessor e atrasa por mais tempo que o valor nominal. Se o avanço é maior, o ônibus atrasa menos do que o valor nominal. Por exemplo, se um ônibus faz uma rota em 60 minutos e chega ao ponto de controle com 50 minutos, seu progresso é maior uma vez que o ônibus demorou menos que seu valor nominal.

Ambas as abordagens de cronogramas e avanços alvos tentam realizar um valor pré-estabelecido de avanços. A proposta de Bartholdi (2011) considera essas teorias com abordagens vulneráveis à variabilidade do ambiente externo e sugere abandonar a noção de

cronograma para assim o sistema ficar livre para expressar seu progresso natural. Com isso, seria possível equilibrar o avanço mesmo na presença de perturbações e o sistema poderia convergir para o menor avanço comum possível dada a capacidade e demanda do sistema.

2.2 AVANÇOS AUTO-EQUALIZADORES

O modelo proposto por Bartholdi (2011), que iremos analisar neste trabalho, considera uma rota com n ônibus movendo-se a uma velocidade constante (\bar{v}) sobre uma rota circular de comprimento normalizado a 1, com um único ponto de controle (conf. Figura 1).

Em qualquer ponto, cada ônibus i tem uma localização x_i entre 0 e 1. Os instantes que os ônibus chegam no ponto de controle são indexados como $t = 1, 2, \dots, n$. A cada momento os ônibus são reindexados para que o ônibus que chega ao ponto de controle receba índice 1 e os demais são numerados em ordem crescente. Para cada tempo t , tem-se um vetor $\mathbf{x}^t = (x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t)$ que representa a localização dos ônibus, de forma que $0 = x_1^t \leq x_2^t \leq \dots \leq x_n^t < 1$.

O ônibus que acabou de chegar ao ponto de controle é denominado **ônibus 1** e os outros são numerados de acordo com o sentido da viagem. Seja n o número de ônibus na rota, denominamos h_i o avanço (tempo) que separa o ônibus i do ônibus $i + 1$.

O sistema é visto então como um sistema complexo e auto-organizante, onde o atraso do ônibus 1 é baseado no avanço h_n . Mais especificamente, retemos o ônibus 1 no ponto de controle pela duração $\alpha * h_n$, sendo $\alpha \in [0,1]$ um parâmetro de controle que determina a sensibilidade do sistema a perturbações. (α pode ser ajustado de acordo com a situação real).

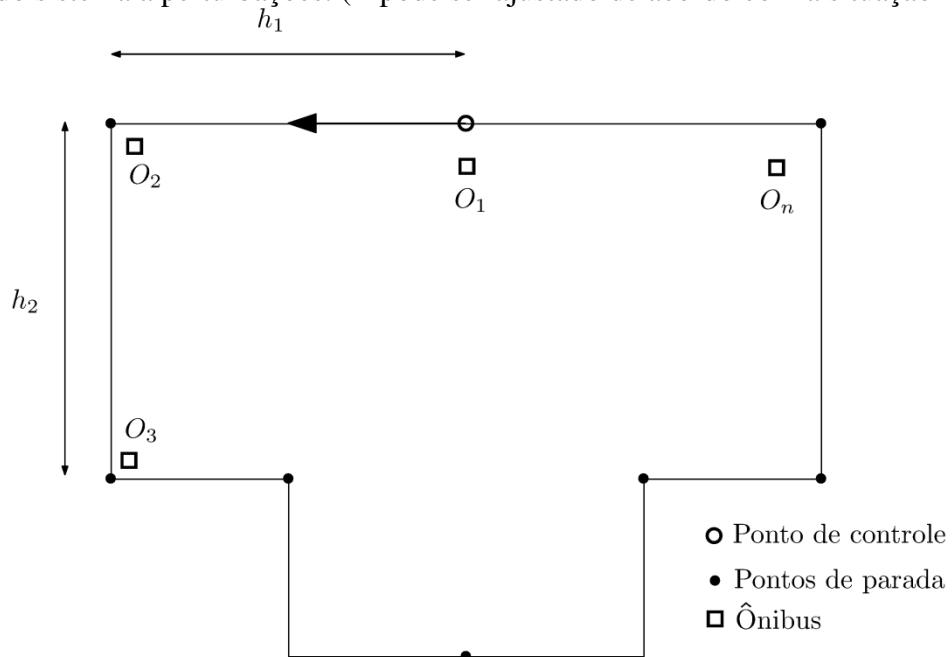


Figura 1: Exemplo de uma rota cíclica de ônibus.

Assim, em cada tempo t , o avanço é definido da seguinte forma:

$$\text{Se } i = 1, h_1^t = \alpha h_n^t \quad (\text{Equação 3.2.1})$$

$$\text{Se } i \neq 1, h_i^t = \frac{(x_{i+1}^t - x_i^t)}{v} \quad (\text{Equação 3.2.2})$$

A partir do cálculo do avanço, para cada ônibus que chega ao ponto de controle, calcula-se quanto tempo ele deve esperar até continuar a sua rota com base em quanto tempo o próximo ônibus demorará para chegar no ponto de controle. Dessa forma, à medida que o tempo passa, os avanços irão se auto equalizando de forma que o sistema se reorganizará automaticamente. Vale a pena ressaltar que esta abordagem não possui tabela fixa de horários, exceto para a primeira partida de cada ônibus.

Em Bartholdi (2011), demonstra-se que esta regra de auto-organização pode ser descrita por uma cadeia de Markov, que resulta no seguinte resultado:

Teorema: Para $\alpha \in [0,1]$, o avanço comum dos ônibus de qualquer trajetória regida sob as regras descritas acima irá convergir para um único ponto fixo comum x^* , com avanço dado por $h^* = \frac{1}{(n-\alpha)v}$.

Na próxima seção contextualizamos o cenário estudado por Bartholdi (2011), para situações comumente encontradas no Brasil e apresentamos uma descrição do problema que será utilizado para a simulação computacional e comparação das abordagens de gerenciamento.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA PARA ROTAS NO BRASIL

No Brasil, as empresas de ônibus geralmente trabalham com cronogramas alvos e tabelas de horários ou *scheduling*. Porém, por causa de diversos problemas de infra-estrutura das cidades ou condições adversas como tráfego inesperado, chuva, lentidão de passageiros ao subir ou descer do ônibus, atingir esses horários-alvo torna-se uma tarefa muito difícil. Na maioria das vezes os motoristas dos ônibus não conseguem cumprir seus horários e, como consequência, os passageiros acabam não tendo previsão de tempo de espera nos pontos e, além disso, os motoristas acabam perdendo o horário de descanso programado na tabela e têm que partir logo em seguida que chegam ao ponto de controle, uma vez que já estão atrasados em seu cronograma. Essa situação, além do desconforto para os passageiros, gera um stress nos motoristas que impacta em seu modo de dirigir e na segurança tanto dele como dos usuários do sistema.

A partir deste cenário, esse trabalho tem como objetivo simular o comportamento de ambos os métodos de controle de horários de ônibus em uma situação hipotética que modela rotas reais. Para isto, adaptamos o problema estudado em Bartholdi (2011) para criar um cenário próximo do que é comumente encontrado em várias cidades do Brasil.

3.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Nas simulações que realizamos, consideramos a seguinte situação: em uma rota urbana, circulam diariamente 07 ônibus durante 16h por dia. A rota possui nove pontos de paradas para embarque ou desembarque de passageiros, além do ponto de controle, sendo que cinco destes pontos encontram-se no centro da cidade (onde o trânsito é mais carregado) e quatro deles em um bairro (onde o trânsito é mais tranquilo). Um ônibus regular, com velocidade média de 40km/h, demora 90 minutos para completar a rota inteira, desde que não haja condições adversas como tráfego ou paralizações. Assim, ele demora em média 10 minutos entre cada uma das paradas, se não houver qualquer interrupção.

Para simular a variação encontrada em ambientes reais, adicionamos ao modelo uma variável aleatória w_j , $j = 1, 2, \dots, 9$ para modelar o atraso de cada ônibus entre dois respectivos pontos. Assumimos que w_j tem distribuição de Poisson com média λ_c entre dois pontos do centro e λ_b entre dois pontos do bairro, sendo $\lambda_c \geq \lambda_b$. Assim, para cada viagem dos ônibus, a variável aleatória w_1 representa o atraso ocorrido entre o ponto de controle e o ponto 1; w_2 representa o atraso ocorrido entre o ponto 1 e o ponto 2, e assim sucessivamente.

Este cenário foi simulado para 5000 dias, com os ônibus organizados sob as duas propostas: tabela de horários e sistemas auto-organizantes, para $\lambda_c \in [0, 10]$ em minutos e $\lambda_b = 1$ min.

4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O cenário descrito na Seção anterior foi implementado em linguagem similar a MATLAB, com auxílio do software livre OCTAVE®. O código escrito compara as duas formas de gerenciamento (scheduling e o método usado por Bartholdi (2011)), sob as mesmas condições de variação aleatória do trânsito.

O desempenho dos sistemas foi medido através das quatro variáveis descritas a seguir:

- T_{min} = menor tempo decorrido entre a passagem de dois ônibus consecutivos, em qualquer ponto.

- T_{max} = maior tempo decorrido entre a passagem de dois ônibus consecutivos, em qualquer ponto.
- T_{med} = tempo médio de espera de qualquer passageiro, em qualquer ponto.
- T_{mot} = tempo de descanso dos motoristas no ponto de controle.

Os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir, em função do aumento da variação das condições do trânsito (que são modeladas pelas variáveis de Poisson w_{-j}).

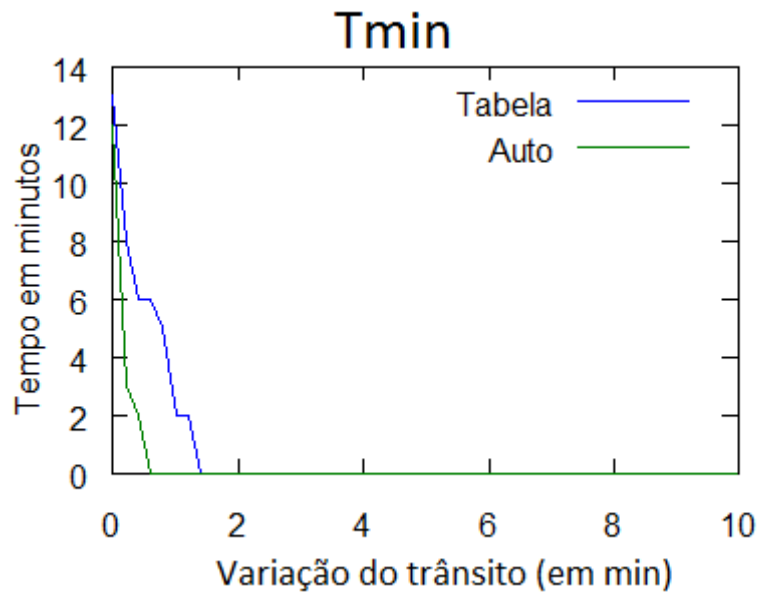


Figura 2: menor tempo decorrido entre a passagem de dois ônibus consecutivos, em qualquer ponto, em função da variação do trânsito no centro $\lambda_c \in [0,10]$.

Pela figura 2 pode-se perceber que, pelo método usado atualmente pelos sistemas rodoviários, ou seja, pelo método de tabela, o passageiro deve esperar mais tempo no ponto de ônibus até que o próximo ônibus chegue quando comparado com o método auto-organizante. Dessa forma, esse último mostrou ser mais eficiente quanto a percepção do passageiro em relação a eficiência do sistema. No geral, há uma menor espera do passageiro pelo ônibus no último método.

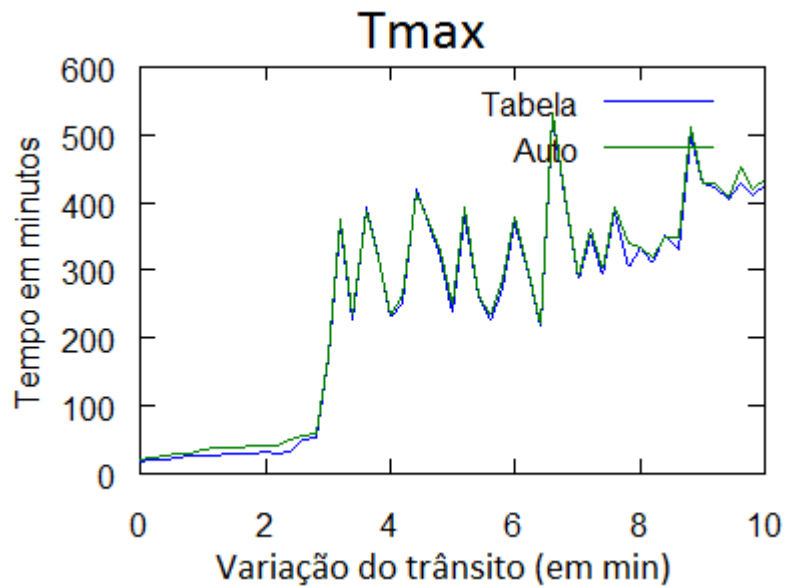


Figura 3: maior tempo decorrido entre a passagem de dois ônibus consecutivos, em qualquer ponto, em função da variação do trânsito no centro $\lambda_c \in [0,10]$.

Ao analisar o tempo máximo de espera do passageiro pelo ônibus, observa-se que os métodos comportam-se de forma similar. A medida que a variação do trânsito aumenta, o tempo decorrido entre a passagem de dois ônibus consecutivos aumenta também.

A mesma situação ocorre ao verificar o tempo médio de espera do passageiro que pode ser observada na figura 4. Na média, novamente ambos os métodos comportam-se igualmente.

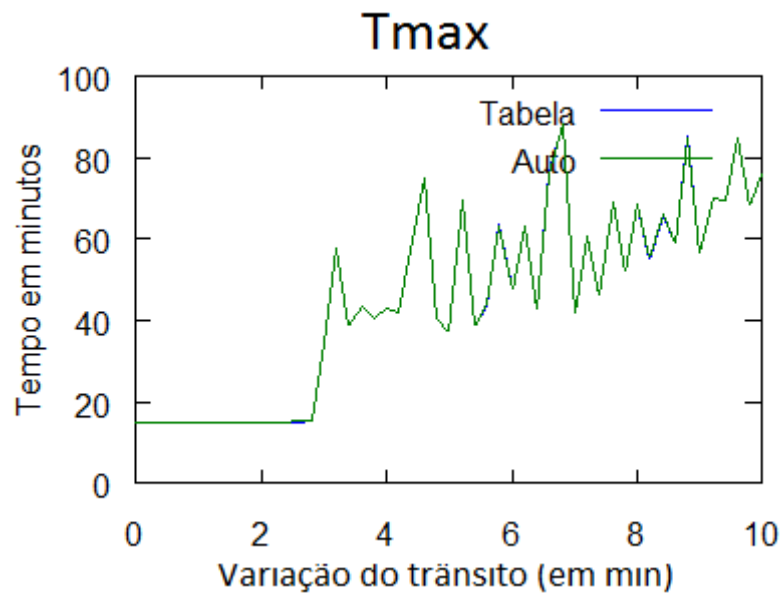


Figura 4: tempo médio de espera de qualquer passageiro, em qualquer ponto, em função da variação do trânsito no centro $\lambda_c \in [0,10]$.

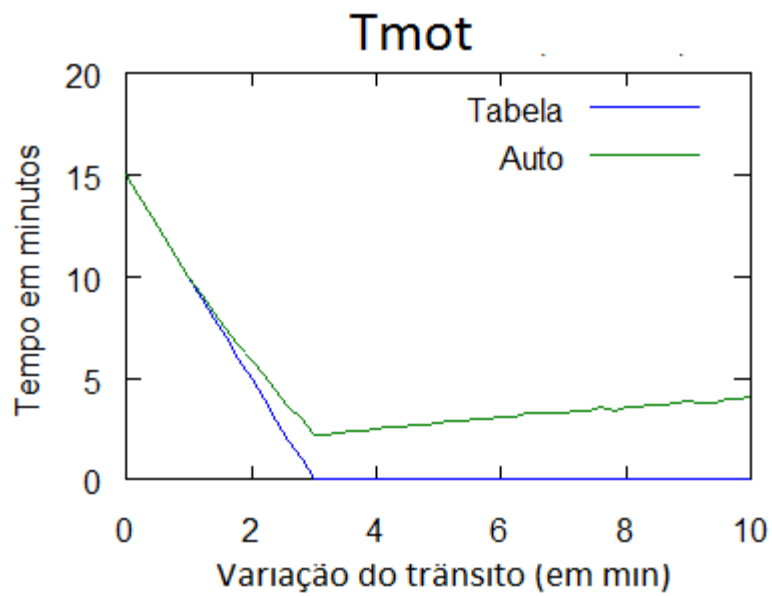


Figura 5: tempo de descanso dos motoristas no ponto de controle, em função da variação do trânsito no centro $\lambda_c \in [0,10]$.

Na figura 5 é demonstrado o tempo de descanso dos motoristas no ponto de controle. Como pode ser observado, o sistema auto-organizante permite que os motoristas descansem mais tempo em comparação com o sistema de tabela a medida que a variação do trânsito aumenta.

Por fim, os resultados da simulação mostram que ambos os sistemas de gerenciamento possuem desempenho similar em relação ao tempo de passagem dos ônibus nos pontos, mas o gerenciamento através de sistemas auto-organizantes obteve desempenho superior em relação ao tempo de parada dos ônibus no ponto de controle. Quando as condições de trânsito pioram, os ônibus tendem a chegar atrasados no ponto e, no sistema de horários fixos, precisam sair imediatamente para cumprir sua agenda. A parada no ponto é uma variável importante, pois além de atender aspectos da legislação trabalhista, significa uma redução de custos, pois os ônibus estão parados no ponto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse artigo utilizamos simulação computacional para comparar dois sistemas de gerenciamento de rota de ônibus: o *scheduling* e o sistema auto-organizante. Ambos os métodos de equilibrar o tempo de passagem dos ônibus nos pontos e também equalizar o tempo de espera dos motoristas no ponto de controle.

Os resultados computacionais para o cenário que consideramos mostraram que ambos os sistemas tiveram desempenho semelhante em relação ao tempo de passagem dos ônibus nos pontos, mas o gerenciamento através do sistema auto-organizante possibilitou um equilíbrio maior no tempo de descanso dos motoristas no ponto de controle. Isto significa que, em situações de grande variação de trânsito, é possível atingir o mesmo desempenho do modelo que utiliza *scheduling* e ainda assim garantir um tempo confortável de parada no ponto de controle. A parada no ponto é uma variável importante, pois além de atender aspectos da legislação trabalhista, significa uma redução de custos, pois os ônibus estão parados no ponto.

Este trabalho está sendo ampliado através de um estudo de caso em linhas reais com o intuito de calibrar melhor os parâmetros e verificar o desempenho do sistema na prática. Além disso, este trabalho pode inspirar o uso de sistemas auto-organizantes em outras áreas de logística que estão sujeitas a variações das condições de contorno.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ashby, W. R. (1947). **Principles of the self-organizing dynamic system**. Journal of General Psychology, 37, 125–128.

[2] Bartholdi, J. J., III, Eisenteins, D. D. **A self-coordinating bus route to resist bus bunching**. Transportation Research Part B, 2011.

[3] Chiavenato, Idalberto. Introdução à Teoria Geral da Administração: Uma visão abrangente da moderna administração das organizações. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

[4] Da Silva, D.M. **Sistemas inteligentes no transporte público coletivo por ônibus**. 2000. 144 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.