

# UM MODELO DE PREVISÃO DE DEMANDA DE POSTOS DE RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM CIDADES INTELIGENTES

FABIO ANTONIO V. PINTO\*, LUÍS HENRIQUE M. K. COSTA†, MARCELO D. DE AMORIM‡

\* *Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO*  
*Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

† *Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ*  
*Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

‡ *LIP6/CNRS – UPMC Sorbonne Universités*  
*Paris, França*

Emails: [fabiovieira@gta.ufrj.br](mailto:fabiovieira@gta.ufrj.br), [luish@gta.ufrj.br](mailto:luish@gta.ufrj.br), [Marcelo.Amorim@lip6.fr](mailto:Marcelo.Amorim@lip6.fr)

**Abstract**— The development of smart cities has three main pillars: sustainability, rationality, and efficiency. An important element of their development in the transportation sector is the fleet of electric vehicles. Given that the adoption of battery-powered vehicles is a clear trend, we investigate in this paper the behavior of a charging station and instantiate it in the case of the city of Rio de Janeiro (Brazil). The behavior, modeled as a Continuous Time Markov Chain (CTMC), is used to predict some fundamental values such as the mean number of costumers at the charging stations, the mean charging time, the mean waiting time in queue, the available size of waiting queue, and the number of Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE). The results show a clear tradeoff between the design of physical space and electrical installations of the charging station against its availability to customers.

**Keywords**— Veículo elétrico, Sustentabilidade, Cadeia de Markov em Tempo Contínuo.

**Resumo**— O desenvolvimento de cidades inteligentes possui três pilares principais: sustentabilidade, racionalidade e eficiência. Um elemento importante de seu desenvolvimento no setor de transportes é a frota de veículos elétricos. Tendo em vista que a adoção de veículos movidos a bateria é uma tendência cada vez maior, esse artigo descreve o comportamento de uma estação de carga de veículos elétricos, tomando como exemplo a cidade do Rio de Janeiro (Brasil) através de um modelo de Cadeia de Markov em Tempo Contínuo (CMTC). Esse modelo é usado para prever resultados úteis como o número médio de consumidores nas estações de carga, o tempo médio de espera na fila, o tamanho disponível da fila de espera e o número de Equipamentos de Suprimento de Carga de Veículo Elétrico (ESCVE). Os resultados mostram o compromisso entre o dimensionamento do espaço físico e instalações do posto de carga com a disponibilidade do posto e o tempo de espera dos clientes.

**Palavras-chave**— Electric vehicles, Sustainability, Continuous Time Markov Chain.

## 1 Introdução

Hoje em dia, as principais fontes de gases de efeito estufa são os setores de transporte e energia elétrica (Garcia-Valle and Lopes, 2013). Assim, há grande preocupação na adoção de fontes de energia alternativas e na redução da dependência do petróleo. No setor de transportes, a possibilidade de substituir os veículos com motor a combustão por veículos elétricos a bateria (BEV – *Battery Electric Vehicle*) ou híbridos (PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) é uma solução atrativa, considerando ainda o alto preço do petróleo. Considerando que a sustentabilidade é um elo que interliga racionalidade e eficiência, é mandatório que os usuários de veículos elétricos contem com facilidades de acesso à infraestrutura de recarga, que esta esteja disponível a maior parte do tempo e, além disso, que os receba dentro de certos padrões de qualidade de serviço (Erol-Kantarci et al., 2012).

Para que os veículos elétricos sejam integrados ao sistema de transportes, é necessária atenção especial ao projeto e dimensionamento de estações de carga. Além disso, a comunicação entre as entidades envolvidas é importante no contexto

de cidades inteligentes (Baldauf et al., 2012; Bayram et al., 2013). O espaço físico disponível em um posto de carga deve ser considerado com cuidado, pois a natureza do serviço de carga elétrica é diferente do abastecimento de outros combustíveis como a gasolina, diesel ou GNV (gás natural veicular). Um veículo para ter autonomia de 500 km precisa encher o tanque, e o tempo gasto para completar o tanque vazio não ultrapassa, em média, 2 a 3 minutos para álcool, gasolina e diesel e 5 a 10 minutos para GNV. Assim o tempo de serviço, no pior caso, não será maior que 10 minutos. Hoje, a tecnologia de recarga rápida de EVs permite a recarga em 30 minutos, portanto até quase 10 vezes superior ao tempo de abastecimento por combustíveis líquidos (Hess et al., 2012). Além da necessidade de mais espaço no posto, a maior espera impacta a qualidade de serviço oferecida ao cliente.

Assim, este trabalho analisa o *compromisso entre o número de postos de recarga existentes e o tempo de espera imposto aos condutores*, baseado em cadeias de Markov. Além disso, é também uma preocupação a indisponibilidade do posto de recarga devido à sua lotação máxima. Essas pre-

ocupações se justificam dado que a implantação desses postos se dará de forma progressiva. Assim, é importante balancear a demanda entre os postos no intuito de diminuição do tempo de espera, desbloqueio do posto e equilíbrio do consumo de energia da rede elétrica. Finalmente o objetivo é fornecer ao motorista do veículo elétrico, através da rede de comunicação veicular, as melhores opções de postos de recarga, de acordo com sua localidade atual e a demanda global.

## 2 O Modelo de Cadeia de Markov para a Estação de Carga

Em um problema de modelagem de estação de carga de veículo elétrico, por vezes, a preocupação não consiste apenas na manipulação das diversas variáveis aleatórias, mas também como essas variáveis, que são função do tempo, se relacionam. Por exemplo, se a estação de carga disponibilizar lugares na fila de espera, o tempo médio de espera na fila é uma quantidade de interesse. Outro valor de interesse, o número de veículos elétricos  $N(t)$  presentes no sistema no instante  $t$  (aqueles em carga e, possivelmente os que esperam), deixa claro que é necessário especificar no modelo, o procedimento que retorne essa quantidade. Esses parâmetros são o número de *equipamentos de suprimento de carga de veículo elétrico* (ESCVE) disponíveis e o número de vagas na fila de espera. O tempo médio de serviço é outra variável aleatória de interesse, e assim por diante.

Uma Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CMTCC) será usada para obter o comportamento de uma estação de carga. O objetivo é observar como a taxa de chegada dos veículos elétricos, o número de equipamentos de carga e o número de lugares na fila de espera influenciam as seguintes medidas de interesse: (i) o tempo médio de espera na fila, (ii) o número médio de clientes no sistema, (iii) o tempo médio de serviço e (iv) a probabilidade de bloqueio. Este último valor revela a indisponibilidade da estação de carga em receber mais veículos, que pode representar prejuízo para clientes que têm urgência para abastecer e fornecedores do serviço que perdem possíveis clientes.

### 2.1 Estratégia de modelagem

Supõe-se, em uma primeira instância, que a estação de carga está vazia, de modo que o estado do sistema é 0 (zero) veículos no sistema. Deste modo, quando todos os terminais de carga estão inativos, o primeiro veículo que chega conecta seu cabo de carga no primeiro terminal, e o estado do processo muda para 1, ou seja 1 (um) veículo no sistema. O processo de carga começa para o primeiro veículo. Dado que o primeiro veículo ainda está em carga, ao chegar o segundo veículo e ao se

conectar a segunda tomada, o estado do processo muda para 2 (dois) veículos no sistema. Por outro lado, se ninguém mais chegar até o momento, aquele que completar a carga da sua bateria primeiro deixa o sistema e o estado do processo muda para o estado 1. Caso contrário, uma nova chegada de veículo, faz o processo saltar para o estado 3, e assim por diante (os saltos são permitidos apenas para um estado vizinho). Se todos os ESCVEs estão ocupados, o primeiro lugar disponível na fila de espera irá ser ocupado e, logo que vagar uma tomada de carga, esta receberá o primeiro da fila de espera (Figura 1). Uma vez que a fila de espera lotou, o sistema atingiu seu estado de bloqueio e qualquer veículo que chegue ao sistema será redirecionado à próxima estação de carga. Considerando-se que as chegadas de veícu-

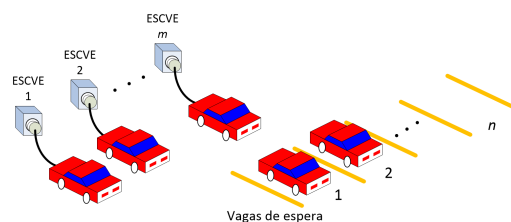


Figura 1: Posto de carga elétrica.

los nas estações de carga obedecem a um processo de Poisson onde os tempos entre chegadas são independentes, idêntica e exponencialmente distribuídos (i.i.d.), o número de chegadas ao longo de um intervalo de tempo é uma distribuição de Poisson (Trivedi, 2002; Bayram et al., 2013). Portanto, considerando um processo de nascimento-e-morte, se ele está em um estado  $k > 0$  as únicas transições possíveis são para os estados  $k - 1$  ou  $k + 1$ . A taxa de chegada de veículos ao sistema é denominada  $\lambda$ .

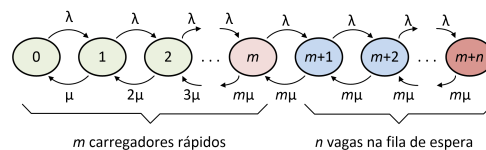


Figura 2: Processo de nascimento e morte.

### 2.2 Processos de Markov de estado discreto e tempo contínuo e de nascimento e morte

Tomando como base a Figura 2, para qualquer  $t \geq 0$ , em um dado momento o processo deve estar em algum estado. No estado estacionário, o vetor de probabilidades  $\pi = [\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots]$  pode ser representado sob a forma de vetor-matriz  $\pi \mathbf{Q} = 0$ , em que  $\mathbf{Q}$  é conhecida como uma matriz de transição de probabilidades. Assim, é conhecido que  $\sum_{j \in I} \pi_j(t) = 1$ , onde  $I$  é o número de estados que o sistema pode assumir. Para determinar uma solução única diferente de zero, é necessário utilizar

a condição  $\sum_j \pi_j = 1$ . Quando a solução do sistema linear apresentar probabilidades-limites positivas  $\pi_j$ , a cadeia de Markov é conhecida como não-nula recorrente ou recorrente positiva, e estas são chamadas de probabilidades de estado estacionário. Assim, resolvendo o sistema de equações dado por  $\pi\mathbf{Q} = 0$  e  $\sum_j \pi_j = 1$  irá resultar nas probabilidades-limite, que é o comportamento assintótico quando  $t \rightarrow \infty$ .

A Cadeia de Markov em Tempo Contínuo homogênea e com o espaço de estados  $0, 1, 2, \dots$  é conhecida como um processo de nascimento-e-morte, se existem constantes  $\lambda_i (i = 0, 1, \dots)$  e  $\mu_i (i = 0, 1, \dots)$  de tal modo que as taxas de transição são dadas por:

$$q_{i,i+1} = \lambda_i, \quad q_{i,i-1} = \mu_i, \quad q_i = \lambda_i + \mu_i, \quad q_{ij} = 0$$

$$\text{para } |i - j| > 1.$$

O cenário de uma estação de carga de veículo elétrico é um caso de uma fila  $M/M/m/n$ , onde a taxa de chegada de veículos obedece uma distribuição Poisson (exponencial, portanto), o serviço também apresenta distribuição exponencial, o sistema apresenta  $m$  servidores ou equipamentos de suprimento de energia elétrica e  $n$  vagas de espera na fila. Também pode ser observado como um caso especial do processo de nascimento-morte e apresenta um espaço de estados finito  $0, 1, \dots, m + n$ , com fila de espera finita  $n$ , com taxa de nascimento constantes  $\lambda_i = \lambda$  e taxas de morte constantes  $\mu_i = \mu$ . Em um processo contínuo de Markov, não tem significado falar de matriz de transição de probabilidades. Não existe a probabilidade do processo permanecer no mesmo estado, pois o tempo de permanência no estado é uma variável aleatória de natureza exponencial, mas por outro lado, observando o regime permanente, a chance do processo permanecer em um estado decresce a uma taxa que é igual à soma das taxas de transição para um estado vizinho, que pode ser um nascimento ou uma morte, ou seja,  $-(\lambda_i + \mu_i)$ . Assim, pode-se construir a matriz geradora ou matriz de taxa de transições  $\mathbf{Q}$  da CMTTC. Assim, à soma dos elementos na mesma linha da matriz é igual a zero, ou seja,  $\sum_j q_{ij} = 0$ , pois  $\pi\mathbf{Q} = 0$ , logo a matriz de taxa de transição  $\mathbf{Q}$ , no caso do modelo em questão, é dada por: A partir do sistema formado por  $\pi\mathbf{Q} = 0$  e  $\sum_j \pi_j = 1$ , é possível resolvê-lo e responder algumas questões importantes, de interesse tanto do cliente quanto do fornecedor do serviço, relacionadas às seguintes variáveis de interesse:

**Número de clientes no sistema ( $N$ )** - Essa variável é de grande interesse do fornecedor do serviço. Quanto mais clientes estiverem no posto, mais lucrativo será o retorno. Do ponto de vista do usuário do serviço, quando o posto está muito cheio provoca insatisfação, pois gera a impressão

que o tempo de espera será alto. Assim tem-se:

$$N = \sum_{i=1}^N n_i \pi_i, \quad (2)$$

onde  $n_i$  é o número de veículos no estado  $i$  e  $\pi_i$  é a probabilidade do sistema estar no estado  $i$ .

**Tempo médio de atendimento ( $\bar{T}_{at}$ )** - Uma vez que a taxa de chegada de veículos é conhecida, assim como a probabilidade de permanência em cada estado, de acordo com o Teorema de Little:

$$N = \lambda(1 - \pi_N)\bar{T}_{at}, \quad (3)$$

e assim tem-se que:

$$\bar{T}_{at} = \frac{N}{\lambda(1 - \pi_N)}. \quad (4)$$

**Probabilidade de bloqueio ( $P_{bl}$ )** - Essa variável

mede a indisponibilidade do sistema que se traduz no último estado  $\pi_N$ . Qualquer veículo que chegue ao posto de carga e o estado seja  $\pi_N$ , terá que se dirigir ao posto mais próximo, pois não há tomada disponível nem lugar na fila. Assim, a probabilidade de bloqueio é:

$$P_{bl} = \pi_N. \quad (5)$$

**Tempo médio de espera na fila ( $\bar{T}_{fila}$ )** - Esse tempo mede o quanto um cliente espera na fila ao chegar em algum estado onde já não exista mais ESCVEs disponíveis mas haja vaga na fila de espera até ser atendido. Quando só há uma vaga de espera na fila ( $n = 1$ ) o tempo médio de fila ( $\bar{T}_{fila}$ ) é expresso por:

$$\bar{T}_{fila} = \frac{\pi_m}{m\mu}. \quad (6)$$

Quando  $n \geq 2$ , o tempo médio de fila ( $\bar{T}_{fila}$ ) é dado por:

$$\bar{T}_{fila} = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} i \cdot \pi_{m+i-1}}{m\mu \sum_{i=m}^{m+n-1} \pi_i}. \quad (7)$$

### 3 Análise de Desempenho do Sistema

Esta seção descreve o cenário do problema, o procedimento de carga, que pode ser realizado em três níveis distintos, mostra as características da bateria de veículos elétricos e explica as variáveis de entrada do problema, inclusive detalhando os valores que elas irão assumir no modelo.

#### 3.1 Cenário: A cidade do Rio de Janeiro

Numa parceria entre a Nissan e a BR-Distribuidora, 15 veículos elétricos estão operando na cidade. O veículo Nissan Leaf é 100% elétrico e por isso considerado veículo de emissão zero. A

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix}
-\lambda & \lambda & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 2\mu & -(\lambda + 2\mu) & \lambda & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & (m-1)\mu & -(\lambda + (m-1)\mu) & \lambda & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & m\mu & -(\lambda + m\mu) & \lambda & \dots & m\mu & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & m\mu & -(\lambda + m\mu) & \lambda & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m\mu & -m\mu & -m\mu
\end{bmatrix}. \quad (1)$$

Tabela 1: Notações utilizadas no problema.

Notação	Descrição	Valores
$\lambda$	Taxa de chegada de veículos ( <i>veiculos.hora</i> <sup>-1</sup> )	1 a 10
$\mu$	Taxa de serviço ( <i>veiculos.hora</i> <sup>-1</sup> )	2
$m$	Número de ESCVEs	1 a 6
$n$	Número de vagas de espera	0 a 6

Prefeitura do Rio de Janeiro tem se mobilizado em atingir como alvo uma redução de 16% das emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2016 com base no ano de 2005. No caso da estação de carga na cidade do Rio de Janeiro, está prevista a instalação de Equipamentos de Suprimento de Carga de Veículo Elétrico em todos os postos de gasolina da Petrobras. O Nissan Leaf possui uma bateria de 48 células de ions de lítio totalizando a energia de 24 kWh que pode ser recarregada na garagem das residências durante um período de 8 horas, ou em um carregador rápido no posto de gasolina Petrobras, em um período de 30 minutos (Hess et al., 2012). A autonomia do veículo costuma alcançar 160 km nas condições de tráfego na cidade (40 km/h) e com o ar condicionado desligado. Na estrada (90 km/h) e com o ar funcionando a autonomia cai para 110 km e nas condições de tráfego congestionado, onde a velocidade fica em torno de 25 km/h, e com o ar condicionado ligado, o alcance torna-se mais restrito – algo em torno de 70 km. O processo de carga pode ser realizado de três formas distintas:

- *Carga lenta ou nível 1* – O veículo possui um carregador *on-board* que é conectado à tomada residencial (120 V/16 A/1.92 kW) e o tempo de carga costuma levar de 8 a 10 horas.
- *Carga padrão ou nível 2* – Também usa o carregador *on-board* conectado à tomada residencial (108-240 V/12-80 A/2.5-19.2 kW) e o tempo de carga diminui para 6 a 8 horas.
- *Carga rápida ou nível 3* – Nessa condição há o equipamento de suprimento de energia elétrica que fornece uma alimentação DC, onde não há um requisito mínimo de energia, mas o limite máximo de corrente é 400 A e 240 kW. O tempo de carga se reduz a 30 minutos.

### 3.2 Variáveis de entrada

As variáveis do problema são apresentadas na Tabela 1. Tomando como base que a recarga rápida de um veículo elétrico leva em média 30 minutos, o tempo de serviço  $\mu$  pode ser definido como 2 *veiculos.hora*<sup>-1</sup>. As taxas de chegadas dos veículos ( $\lambda$ ) nos gráficos que seguem na próxima seção variam de 1 a 10 *veiculos.hora*<sup>-1</sup>. O número de servidores (ESCVEs) também tem seu valor que vai de 1 a 6. É considerado o caso onde não há lugar para espera ou até 6 vagas. Assim ao se variar a taxa de chegada, o número de vagas de espera e o número de servidores, pode-se ter um panorama do número de veículos que o sistema comporta ( $N$ ), da indisponibilidade do sistema ( $P_{bl}$ ), do tempo de serviço ( $\bar{T}_{at}$ ) e do tempo de espera na fila ( $\bar{T}_{fila}$ ).

## 4 Resultados Teóricos

Os resultados dessa seção, obtidos com o auxílio do Matlab 2013, mostram como se comportam as quantidades de interesse, de acordo com as variáveis de entrada do problema: a taxa de chegada de veículos ( $\lambda$ ), o número de servidores ou pontos de carga ( $m$ ) e o número de vagas disponibilizadas na fila de espera ( $n$ ). Estas afetam de forma direta a quantidade de veículos no sistema, importante para o planejamento do espaço físico do posto de carga, para a previsão do consumo de energia e assim a quantidade de energia demandada da subestação de energia que atende o posto.

### 4.1 Número de veículos no sistema

A quantidade de veículos reflete também o aspecto lucrativo do estabelecimento de carga. É interessante notar que há no entanto dois aspectos em relação à quantidade de veículos no sistema. Um deles pode ser devido a um número maior de bombas de carga e poucas vagas na fila de espera. Com um maior número de bombas, a vazão do sistema é também maior. Um grande número de veículos nessa configuração, indica uma taxa de chegada de veículos alta, mas a quantidade maior de bombas procura suprir essa demanda. O caso oposto, que também acomoda a mesma quantidade de veículos, mas que de certa forma acaba impactando de forma negativa a satisfação dos usuários, seria um grande número de vagas de espera com poucos servidores ou bombas de carga. Nesse caso,

mais clientes significa elevado tempo de espera. A Figura 3 ilustra este compromisso. Quando a

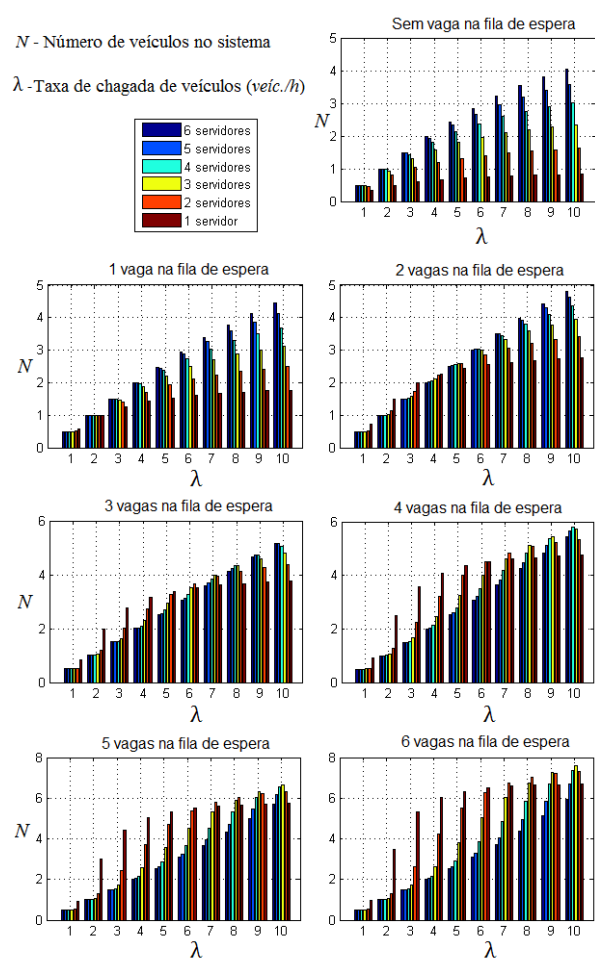


Figura 3: Número de veículos elétricos no sistema.

taxa de chegada de veículos é a menor, ou seja  $\lambda = 1$ , a quantidade de veículos no sistema é praticamente a mesma para  $m = 2$  a  $6$ . Só para  $m = 1$  observa-se variação significativa. Quando o posto não possui vaga de espera, para  $\lambda = 1$ , o número de veículos no sistema para um servidor é até inferior aos casos onde há mais servidores. Ainda para  $\lambda = 1$ , à medida que são disponibilizadas mais vagas de espera, o cenário se reverte, ou seja, quando se coloca mais servidores a vazão do serviço se torna maior, e assim uma menor quantidade de veículos se acumula no sistema. No entanto os gráficos mostram um comportamento assintótico. Percebe-se que a medida que a taxa de chegada de veículos aumenta, a quantidade de veículos no sistema tende a se estabilizar no valor  $n + m$ . Para o caso de um maior número de vagas de espera e servidores o comportamento assintótico só seria observável graficamente para taxas de chegada mais altas. Isso não é visualizado então, porque os gráficos estão limitados no eixo horizontal a  $\lambda = 10 \text{ veiculo.hora}^{-1}$ .

## 4.2 Probabilidade de bloqueio

Outra variável de interesse é a probabilidade de encontrar o posto de carga indisponível, ou seja, no estado de bloqueio. Esta probabilidade também permite estimar a quantidade de veículos que se deixa de atender e que representa prejuízo ao fornecedor do serviço. Pela análise dos

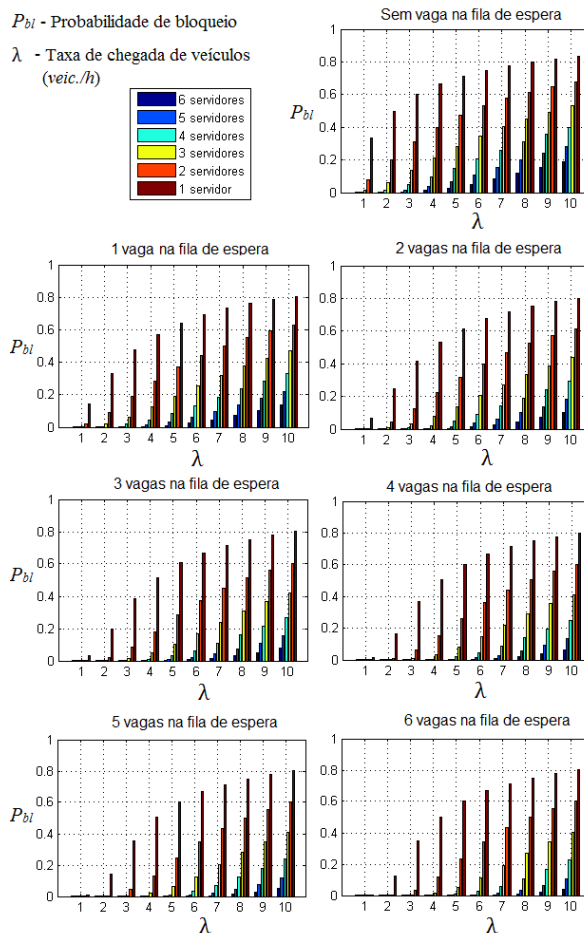


Figura 4: Probabilidade de bloqueio do sistema.

gráficos na Figura 4, pode-se verificar que existe uma variação significativa na probabilidade de bloqueio para pequenas taxas de chegada de veículos. Isso se observa para taxas de  $\lambda = 1$  a  $3 \text{ veiculo.hora}^{-1}$ . Com o aumento do número de vagas na fila de espera, a chance de se encontrar o sistema indisponível para essas taxas de chegada diminui. O aumento da taxa de chegada dos veículos, associado à taxa de serviço constante ( $\mu = 2 \text{ veiculo.hora}^{-1}$ ) que é característica do carregador rápido, faz com que não ocorram variações tão significativas na probabilidade de bloqueio principalmente quando  $n < 3$ . Isso pode ser visualizado no gráfico para as taxas de  $\lambda > 3$ . Para o caso de 6 servidores, sem vaga na fila de espera e taxa de chegada de  $10 \text{ veiculo.hora}^{-1}$  observa-se uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 19%, e para o caso extremo de 6 vagas na fila, para essa mesma taxa de chegada, a probabilidade de

bloqueio cai para 3%. Observa-se assim variações mais significativas nas condições extremas.

### 4.3 Tempo médio de serviço

Outra variável de interesse é o tempo médio de serviço, que mostra o quanto o sistema responde à chegada dos veículos e procura atendê-los (Figura 5). Os casos em que ocorre maior variação podem ser observados para  $\lambda > 2$  e onde existem menos servidores no sistema. Quanto menor o número de servidores, menor é a vazão observada pelos veículos que ingressam no sistema, ou seja, o tempo de serviço aumenta. Com mais servidores, o tempo médio de serviço se estabiliza em 30 minutos, como pode-se observar na Figura 5.

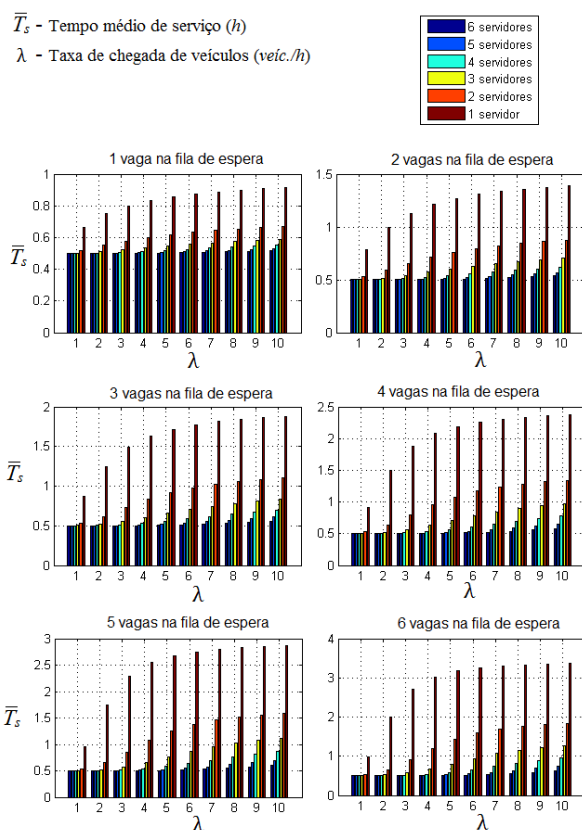


Figura 5: Tempo médio de serviço.

### 4.4 Tempo médio de espera na fila

A última quantidade de interesse é o tempo médio de espera na fila ( $\bar{T}_{fila}$ ). Essa variável estima quanto tempo o cliente que está chegando ao sistema e encontra todos os servidores ocupados, esperará para concluir sua carga e partir para sua jornada. Pode-se observar que no primeiro gráfico da Figura 6, há um comportamento peculiar. O tempo de espera na fila é a probabilidade do sistema estar no estado 1 dividido pela taxa de serviço, ou seja, chegar 1 veículo, este ir para a fila de espera e aguardar o atendimento. Essa probabili-

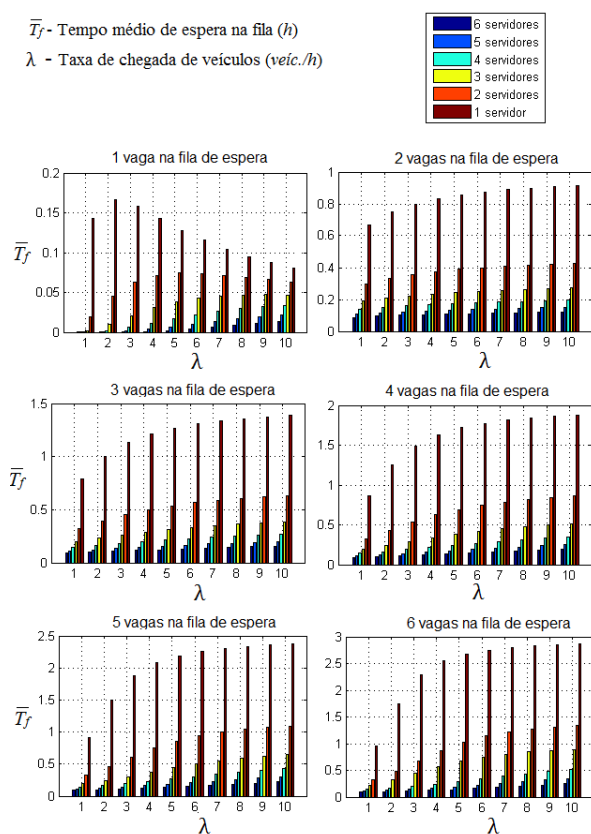


Figura 6: Tempo médio na fila de espera.

dade do sistema estar no estado 1 ( $\pi_1$ ) tem seu valor máximo quando  $\lambda = 2$ , para o caso de apenas 1 servidor. Depois essa probabilidade decresce para o aumento da taxa de veículos. Para o caso de 2 servidores, observa-se um máximo tempo de espera quando  $\lambda = 5$ . Já nos gráficos seguintes, com 2 vagas de espera em diante, é natural observa-se que quanto menor o número de servidores, maior o tempo de espera. E quanto maior o número de chegadas de veículos ao sistema, também menor a vazão e maior o tempo de espera. Mas esse aumento do tempo de espera é mais sutil quando se tem mais servidores para atender os veículos. Isso pode ser observado para  $m > 4$ .

## 5 Cenário da Cidade do Rio de Janeiro

Para visualizar alguns valores que se poderia observar no mundo real, serão apresentados a seguir alguns resultados baseados em algumas simplificações. Primeiramente sabe-se de (oglobo.com, 2013) que na cidade do Rio de Janeiro existem 1,8 milhão de veículos. É conhecido também que atualmente existem por volta de 1,2 mil postos de gasolina para abastecer veículos por toda a cidade. Um motorista típico de uma cidade como o Rio de Janeiro trafega diariamente cerca de 50 km. Assim, tomando como base o Nissan Leaf que tem autonomia de 160 km, o motorista típico da cidade precisaria abastecer a cada 3 dias, aproxi-

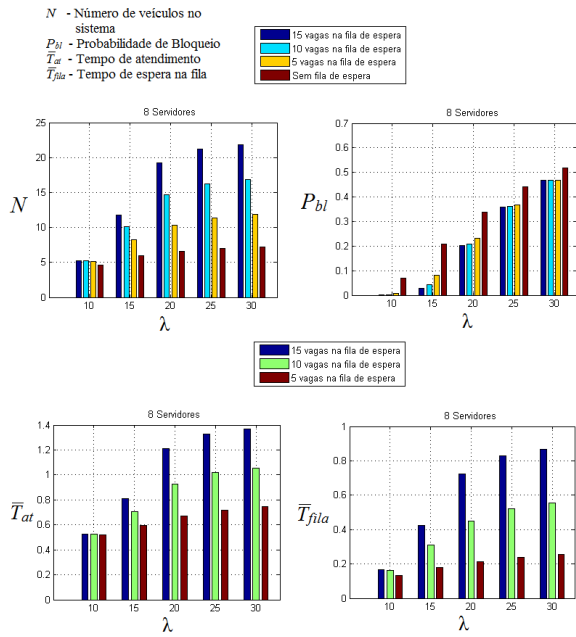


Figura 7: Cenário hipotético futuro com simplificações.

madamente. Assim, supondo que só existam estabelecimentos de recarga como os convencionais postos de gasolina de hoje, e supondo também que o número de veículos já apresentados represente veículos movidos a bateria, ao se tomar uma distribuição uniforme das taxas de chegadas dos veículos, ou seja, dividindo o número de veículos na cidade pela quantidade de postos e posteriormente dividindo por 72 horas, obtém-se como resultado uma taxa de chegada média em torno de  $20 \text{ veículo.hora}^{-1}$ . Como os postos de gasolina atuais apresentam em média 8 bombas, será atribuído aos postos de carga esse número para os equipamentos de suprimento de carga (servidores). Para obtenção dos resultados, considerou-se a possibilidade de não haver espaço físico para fila de espera em um primeiro momento e, quando possível a formação de fila, variou-se a quantidade de vagas de espera de 5 até 15 vagas, para se observar o comportamento das quantidades em estudo. Assim, os gráficos da Figura 7 mostram as quantidades de interesse para um suposto cenário futuro. Pode-se observar que para taxas de chegada em torno de  $10 \text{ veículo.hora}^{-1}$ , a quantidade média de veículos no sistema se situa em torno de 5 veículos, mesmo para o caso de não haver espaço para fila. À medida que a taxa de chegada aumenta, o número de veículos que o sistema pode suportar aumenta consideravelmente com a ampliação do número de vagas de espera. Para a taxa de 20 veículos/hora, observa-se respectivamente  $N = 6.6, 10.4, 14.6$  e  $19.2$  veículos no sistema. Como a lotação máxima é de até 23 veículos, com essa taxa de chegada, para o caso onde não há fila de espera, a probabilidade de blo-

queio é mais alta (33,8%). Quando aumenta-se o número de vagas a probabilidade de bloqueio cai para 20,9% para o caso de 15 vagas. O tempo de espera na fila também aumenta com o aumento da taxa de chegada. E quanto maior o espaço físico para fila, maior o tempo de espera. Para o caso em questão, o tempo de espera para um número de vagas  $n = 5, 10$  e  $15$  é respectivamente de 13, 27 e 42 minutos aproximadamente.

## 6 Trabalhos Relacionados

Ainda no contexto da adoção crescente dos veículos elétricos, há uma grande preocupação em relação ao suprimento adicional (Garcia-Valle and Lopes, 2013) que a rede de energia elétrica precisaria para abastecer essa nova e emergente carga, evitando sobrecargas nas subestações elétricas. Em (Ashtari et al., 2012), procura-se obter uma estimativa do comportamento do padrão de mobilidade dos veículos elétricos através de modelos determinísticos e estocásticos que possam fornecer informações de apoio às concessionárias de energia para que possam suprir convenientemente as localidades de abastecimento (residências, shoppings, postos, etc.), observando principalmente, as horas de pico de energia. Uma estratégia eficiente de reserva em postos de carga é apresentada em (Kim et al., 2010). É prevista a comunicação entre os veículos e o posto de carga e, através de uma função de alocação, baseada na estimativa do tempo de chegada, na disponibilidade de espera, e na quantidade de energia requerida, os veículos são escalonados de forma a tentar atender, dentro do possível, as pretensões dos usuários. Aqueles que não conseguirem ser escalonados procuram um novo posto de carga. Uma alternativa para aliviar a carga da rede elétrica é o uso de armazenamento via ultracapacitores ou *flywheel* nas estações de carga (Bayram et al., 2013). O sistema abastece os veículos através das tomadas disponibilizadas pelo ESCVE do posto. Quando não há mais ESCVEs disponíveis, os veículos elétricos são redirecionados ao armazenamento de ultracapacitores ou *flywheel*. É utilizado um modelo de cadeia de Markov bidimensional onde cada estado representa as quantidades de veículos conectados às tomadas da rede e ao armazenamento de ultracapacitores (*flywheel*). Em (Bayram et al., 2012) o autor sugere um modelo semelhante, e são analisadas estratégias diferentes. Em um primeiro momento, veículos se conectam primeiro a rede e depois aos ultracapacitores e posteriormente realiza-se o inverso. É desenvolvida nesse modelo uma função-lucro relacionando modelos de preço ao modelo estocástico, ou seja, a receita obtida com a carga via rede elétrica e armazenamento auxiliar e as perdas financeiras relacionadas ao estado de bloqueio. O presente artigo é complementar às iniciativas mencionadas, uma vez que a análise realizada fornece



as estimativas de tempo de espera e de número de veículos no sistema, dados de entrada para a previsão de carga oferecida à rede de energia elétrica.

## 7 Conclusão e Trabalhos Futuros

Os cenários fornecem uma estimativa das condições de recarga de veículos elétricos na cidade, caso todos os veículos, hoje, fossem movidos a bateria. Primeiramente foram observados como as variáveis de entrada influenciam a quantidade de veículos no sistema, o grau de indisponibilidade do posto (probabilidade de bloqueio), o tempo médio de serviço e o tempo médio de atendimento. Com base nesses resultados foi proposto um cenário baseado em um panorama futuro, considerando todos os veículos elétricos. Assim foram alcançados alguns valores que permitem prever o quanto um usuário iria esperar ou encontraria um posto indisponível ou ainda o tempo de serviço seria afetado caso a taxa de chegada, a quantidade de servidores e o espaço disponível na fila fossem as supostas. Tendo em vista os resultados obtidos, é fundamental voltar a atenção ao projeto otimizado de localização do postos de suprimento de carga, dimensionamento do seu espaço físico, propondo soluções de aumento de capacidade baseado em vários pavimentos de abastecimento, semelhante ao que ocorre nas garagens de edifícios e estabelecimentos comerciais. É interessante que as garagens, estacionamento, estabelecimentos comerciais, *shopping centers*, espaços públicos e privados também deem oportunidade para recarregar os veículos. Além disso, tendo em vista a qualidade de serviço, principalmente sob o ponto de vista do tempo que o consumidor irá levar para abastecer, há a necessidade de desenvolvimento de redes de comunicação entre as entidades que viabilizem localizações de postos de carga mais próximos. É importante promover a sinalização das melhores opções para os usuários, até mesmo em função da quantidade remanescente de carga em seus veículos que deverá ser suficiente para chegar até o posto mais viável e garantir um melhor ajuste da sua rota ao destino. Como trabalhos futuros pode-se tentar buscar soluções baseadas na comunicação prévia entre os usuários e postos e que os primeiros informem a energia necessária para chegar ao seu destino, evitando um tempo de serviço mais longo, e consequentemente esse procedimento promoveria uma redução no tempo de espera na fila. Tal medida poderia ser incentivada com descontos ou alguma forma de bonus no próximo abastecimento.

## Referências

- Ashtari, A., Bibeau, E., Shahidinejad, S. and Molins, T. (2012). PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data, *IEEE Transactions on Smart Grid* **3**(1): 341–350.
- Baldauf, M., Bessler, S. and Fröhlich, P. (2012). Prototyping a mobile routing assistant for optimizing energy scheduling and charging of electric vehicles, *International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI), Workshop on Electric Vehicle Information Systems*, Portsmouth, USA, pp. 1–5.
- Bayram, S., Michailidis, G., Devetsikiotis, M. and Granelli, F. (2013). Electric power allocation in a network of fast charging stations, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **31**(7): 1235–1246.
- Bayram, S., Michailidis, G., Devetsikiotis, M. and Parkhideh, B. (2012). Strategies for competing energy storage technologies for in dc fast charging stations, *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Tainan City, Taiwan, pp. 1–6.
- Erol-Kantarci, M., Sarker, J. H. and Mouftah, H. T. (2012). Quality of service in plug-in electric vehicle charging infrastructure, *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pp. 1–5.
- Garcia-Valle, R. and Lopes, J. A. P. (2013). *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, Springer.
- Hess, A., Malandrino, F., Reinhardt, M. B., Casetti, C., Hummel, K. A. and Barceló-Ordinas, J. M. (2012). Optimal deployment of charging stations for electric vehicular networks, *First workshop on Urban networking-UrbaNe'12*, New York, New York, USA, pp. 1–6.
- Kim, H.-J., Lee, J., Park, G.-L., Kang, M.-J. and Kang, M. (2010). *Security-Enriched Urban Computing and Smart Grid Communications in Computer and Information Science*, Vol. 78, Springer, chapter An Efficient Scheduling Scheme on Charging Stations for Smart Transportation, pp. 274–278.
- oglobo.com (2013). Crescimento no número de carros é semelhante ao de ônibus no Brasil. <http://redeglobo.globo.com/globoecologia/noticia/2013/06/crescimento-no-numero-de-carros-e-semelhante-ao-de-onibus-no-brasil.html>.
- Trivedi, K. S. (2002). *Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications*, John Wiley and Sons.