

Estimação do Fluxo de Veículos Elétricos em Zonas Urbanas

I. Morro-Mello

A. Padilha-Feltrin

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Universidade Estadual Paulista, UNESP

Ilha Solteira, Brasil

igoormello718@gmail.com, padilha@dee.feis.unesp.br

J. D. Melo

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais

Aplicadas - CESC

Universidade Federal do ABC, UFABC

Santo André, Brasil

joel.melo@ufabc.edu.br

Resumo—Neste artigo apresenta-se um modelo de simulação espacial para estimar o fluxo de veículos elétricos, a fim de fornecer informações na tomada de decisão da instalação dessas estações, usando o valor médio do número de veículos por subáreas e a quantidade de carga disponível nas baterias. O processo de simulação é inicializado com uma distribuição inicial dos veículos para um período de tempo. Os veículos são deslocados por meio de um modelo de agentes que considera um grupo de veículos como um agente percorrendo a zona urbana até atingir um nível mínimo de carga disponível. A simulação termina quando todos os grupos forem deslocados. O resultado do modelo proposto são mapas temáticos que mostram o fluxo de veículos na zona urbana. O modelo proposto foi aplicado em uma cidade brasileira de médio porte com 4700 veículos elétricos. Os mapas obtidos podem ajudar as empresas de distribuição no planejamento da expansão e operação da rede elétrica para o fornecimento da demanda elétrica das estações de recarga.

Palavras Chaves—Veículos elétricos, estações de recarga, eletropostos, sistemas de distribuição, planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de veículos elétricos (VEs) é uma alternativa em países com energias limpas ou em processo de descarbonização, a fim de diminuir a poluição do ar de suas zonas urbanas. Assim, tais países têm incentivado a compra dos VEs através de uma redução de seu preço [1], [2], [3]. No caso do Brasil, o governo exonerou o imposto de importação para VEs, a fim de incentivar seu uso em zonas urbanas. A partir destes incentivos, espera-se uma grande frota de VEs circulando na zona urbana que diminuirá a emissão de gases estufa [4].

Um VE tem uma baixa autonomia (por volta de 100 km a 200 km) e, por conta disso, precisa de recargas em diversos períodos de tempo segundo as distâncias das viagens. Essas recargas podem ser realizadas nas residências ou em estações de recarga com as infraestruturas disponíveis para ligar as baterias dos VEs. Alguns habitantes podem não ter espaço suficiente para instalação de sistemas de recarga para os VEs em seus domicílios ou tomadas disponíveis nas suas garagens.

Assim, para tornar viável o uso do VE precisa-se da construção de estações de recarga.

A construção de estações de recarga requer a participação de órgãos públicos e privados que têm diversos objetivos e responsabilidades [4], [5]. Dentre estes, as empresas distribuidoras de energia elétrica cumprem uma função importante, já que são as responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica para as estações.

Diversos estudos para alocação de estações de recarga têm sido realizados considerando que as distribuidoras são as responsáveis pela instalação, manutenção e expansão dessas estações [6], [7]. No entanto, a participação das distribuidoras em tal processo de alocação pode ser restrita por causa de proibições da lei vigente para realizar outras atividades que não se encontrem relacionadas ao fornecimento da energia elétrica [5]. Em geral, a normativa que regula a instalação de estações de recarga ainda está em desenvolvimento. Considerando a tendência da legislação internacional [8], espera-se que as distribuidoras não sejam as proprietárias das estações de recarga, por causa dos grandes investimentos necessários. Desta forma, as distribuidoras devem-se limitar ao atendimento da demanda elétrica requerida pelas estações de recarga.

Os departamentos de planejamento de transporte das cidades determinam o fluxo de veículos com o intuito de: planejar o sistema de mobilidade urbana; controlar os congestionamentos de vias; e fazer expansões de vias na cidade. Em geral, para analisar o comportamento desse fluxo levam-se em conta três níveis de agregação: macroscópica, mesoscópica e microscópica. Na análise macroscópica, o fluxo é descrito em função do número de veículos que passam por um local. Na abordagem mesoscópica se utiliza o conceito de pelotões ou grupo de veículos para determinar a quantidade de grupos que se concentram para diferentes períodos de tempo. Já, na análise microscópica se estuda os veículos de forma individual, considerando as relações entre cada veículo [9]. Estas abordagens podem ser implementadas em plataformas computacionais para simular diversos comportamentos dos usuários dos veículos e visualizar sua

distribuição espacial na cidade [10], porém sem estimar o nível de combustível dos veículos. No caso de alocação de estações de recarga, a quantidade de carga disponível nas baterias (state of charge - SOC) dos VEs é uma informação importante para determinar a demanda necessária.

Na literatura especializada existem poucos modelos que realizam a estimação espacial dos veículos e seu nível de carga disponível nas baterias. Alguns trabalhos anteriores utilizaram: sistemas de agentes [11], cadeias de markov [12] e simulação de Monte Carlo [13]. Todos esses métodos consideram uma abordagem microscópica para realizar uma agregação de veículos, a fim de determinar as sobrecargas nas redes elétricas. Desta forma, utilizam um elevado tempo computacional para simular uma grande quantidade de veículos e precisam de muitas informações para poder caracterizar adequadamente características individuais dos VEs.

A abordagem mesoscópica considera a cidade dividida em subáreas para determinar a distribuição espacial dos grupos de veículos, considerando uma base reduzida de dados em comparação com as abordagens microscópica. Tal abordagem pode ajudar a obter as informações necessárias para alocação de estações de recarga dos VEs com um menor tempo computacional. Desta forma, neste trabalho é proposto um modelo de simulação mesoscópico para estimar o número de veículos e sua carga disponível por subárea da zona urbana. Os valores estimados serão apresentados em mapas temáticos que permitem a visualização dos locais com maior fluxo de veículos e com menor quantidade de carga disponível em suas baterias. O modelo proposto pode ser utilizado para fornecer informações ao planejamento da expansão e operação das redes elétricas considerando o fornecimento da demanda elétrica das estações de recarga.

II. MODELO PROPOSTO

A. Base de dados de entrada

Os dados necessários para implementação do modelo de simulação proposto são: o número total de VE a serem simulados, mapa da zona urbana, variáveis socioeconômicas, e a matriz origem e destino de veículos da zona urbana da cidade.

A matriz origem e destino mostra quais são os locais de partida (origem) e chegada (destino) mais frequentados pelos habitantes [14]. Neste trabalho, considera-se que um VE deve partir de um desses locais. No entanto, por causa do custo dos VEs nem todos os habitantes com domicílio nos endereços que aparecem nessa matriz podem adquirir um VE. Assim, para determinar a distribuição inicial dos VE, realiza-se uma análise de custo-benefício para encontrar as regiões com renda suficiente para adquirir um VE.

Na análise de custo-benefício considerou-se que o preço de um VE é de quarenta mil reais [15] e um domicílio pode destinar 30% de sua renda (ao longo de seis anos) para a compra do VE. O resultado dessa análise mostra o número dos VEs por subárea. A partir do número total de VEs na zona urbana e utilizando o resultado da análise custo-benefício, distribui-se uma quantidade igual para os locais encontrados.

O mapa da zona urbana permite a identificação das rodovias e avenidas disponíveis para os VE se movimentarem. Da mesma forma, identificam-se os locais na qual um VE pode ter um menor número de viagens. Por exemplo, rodovias que interligam a outras cidades ou vias para transportadoras. Por causa disto, se determinou uma probabilidade que representa a possibilidade de um VE atravessar uma determinada subárea (esta probabilidade tem valor de 0,5 para regiões de poucas viagens e 1,0 para regiões onde há maior probabilidade do VE se deslocar).

Os valores do preço do VE utilizado na análise de investimento e a probabilidade podem ser ajustados segundo as características da zona de estudo e experiência do planejador.

O modelo é inicializado com a probabilidade e número de VEs por subárea, considerados como estados iniciais do processo de simulação.

B. Simulação Mesoscópica

Esta simulação considera que a zona urbana é dividida por quadrículas com seus respectivos estados iniciais. Como o intuito é obter o fluxo de VE por quadrícula, não há a necessidade de saber o tempo das viagens dos VEs, sua velocidade, tempo no engarrafamento, entre outras informações externas. Desta forma, o modelo proposto movimenta os veículos de cada quadrícula, resultando na variação do número de veículos por quadrícula para cada passo de tempo da simulação, sem modificar o valor da probabilidade. Se o planejador necessitar considerar o efeito de algumas variáveis externas supracitadas, deve-se modificar o valor da probabilidade inicial para caracterizar tal efeito.

Por outro lado, o estado inicial das baterias dos VEs é modelado como uma variável aleatória com uma (distribuição uniforme entre 0 e 1) que caracteriza a estocasticidade dos usuários de VEs para carregar as baterias de seus veículos. O número de veículos em cada quadrícula é agrupado em blocos ou pelotões. Cada um desses blocos é considerado como um agente que percorre a zona urbana até atingir um valor mínimo de carga disponível em sua bateria. As regras para a movimentação de cada bloco são as mesmas utilizadas no sistema multiagentes explicado em [11]. Essas regras consideram que a próxima quadrícula a ser percorrida é selecionada de um processo estatisticamente controlado, analisando as probabilidades dos vizinhos próximos dentro de uma janela de 3x3, sendo as probabilidades de 1,0 para avenidas principais e 0,5 para ruas e avenidas secundárias. A figura 1 mostra essa probabilidade.

1,0	0,5	0,5
0,5		0,5
1,0	1,0	1,0

Figura 1. Processo de movimentação do VE.

Assim, por exemplo, considere um VE que está no centro de uma matriz 3x3, este veículo irá se movimentar de acordo com as probabilidades das quadriculas vizinhas, sendo escolhida a quadricula a partir de um torneio 2 a 2 de forma aleatória, até chegar a duas quadriculas, e a quadricula ganhadora será: se as quadriculas escolhidas têm valores iguais de probabilidades, o ganhador será escolhido de forma aleatória; caso contrário, escolhe-se a quadricula com maior valor de probabilidade. Por fim, as quadriculas analisadas são preenchidas com uma probabilidade igual a zero a fim de se evitar que os VEs voltem ao local de início. O processo de escolha das quadriculas é repetido até que a carga das baterias tenha um valor mínimo, sendo sua determinação feita por conta do planejador.

O nível de carga da bateria do VE depois de ter percorrido a quadricula é calculada a partir de:

$$Soc = Soc\ inicial - \left\{ \frac{2 \times Qv \times d \times (1 - 0,03 \times Fd)}{dR} \right\} \quad (1)$$

Sendo que o SOC inicial é a quantidade de carga inicialmente, antes de se movimentar; Qv é a quantidade de quadriculas que o VE percorre; d é o comprimento da quadricula em km; Fd é um fator médio de declividade da cidade analisada; dR é a autonomia máxima do VE. As baterias (chumbo ácido) tem como valor de autonomia 128,747 km.

O bloco é movimentado até atingir um valor mínimo definido pelo planejador. Durante o processo de simulação são armazenadas as quadriculas que são percorridas pelos blocos e a quantidade de carga de suas baterias quando atravessam a quadricula.

C. Algoritmo Proposto

Na Figura 2 mostra-se o fluxograma dos passos para movimentar cada bloco de VEs. Os dados de entrada para o algoritmo proposto são: o número total de veículos para período em análise, a distribuição inicial dos VE e as probabilidades para cada quadricula.

III. TESTES E RESULTADOS

O modelo proposto foi aplicado em uma cidade brasileira de médio porte com aproximadamente 200 mil habitantes. A cidade foi dividida em quadriculas de 0,350 km² totalizando uma grade de 40 x 40 quadriculas, cada um com seus respectivos estados iniciais.

Para calcular a quantidade total de VE a ser simulada, considerou-se uma penetração 5,41 % do total de veículos que circulam diariamente na cidade, ou seja, foram simulados 4.700 VEs de um total de 86.847 automóveis [14]. Além disso, os seguintes fatores foram utilizados: quadricula de 0,350 km², fator de declividade de 2,5%, autonomia de 128,747 km, SOC inicial gerado de forma aleatória e a quantidade de quadriculas percorridas começando em zero (quadricula em que o VE está no início) e a cada quadricula que o VE percorre, incrementa-se uma unidade.

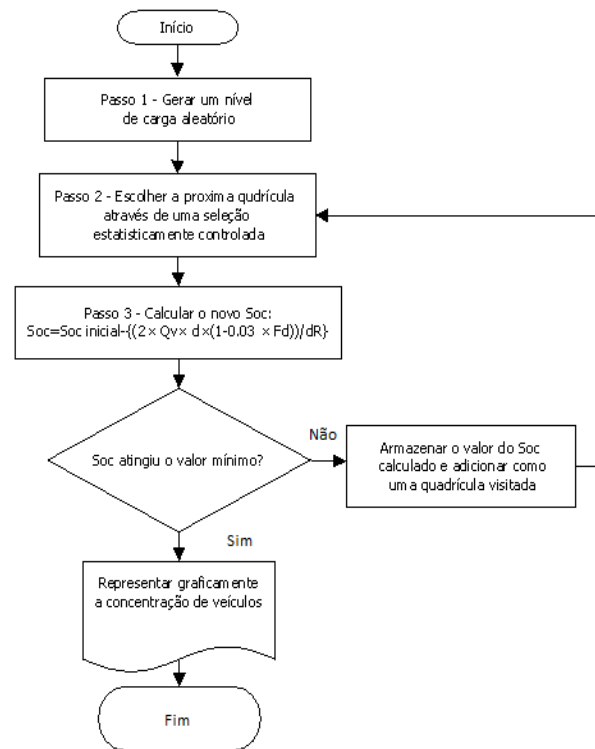


Figura 2. Algoritmo proposto

A análise de custo-benefício na zona de estudo determinou que 94 quadriculas têm condições econômicas para ter um VE. Desta forma, foram alocados 50 veículos em cada quadricula. Utilizando as localizações geográficas das avenidas e a alocação inicial dos VEs, obtiveram-se os locais que deveriam ter uma maior probabilidade para ser percorridas. A Figura 3 mostra a distribuição inicial dos VEs na cidade.

Os mapas que serão mostrados têm escalas de cores. A parte preta mostra o mapa da cidade analisada. Em amarelo claro, amarelo escuro, alaranjado e vermelho são mostradas escalas da menor intensidade a maior intensidade, respectivamente, e os parâmetros destas intensidades variam conforme a figura.

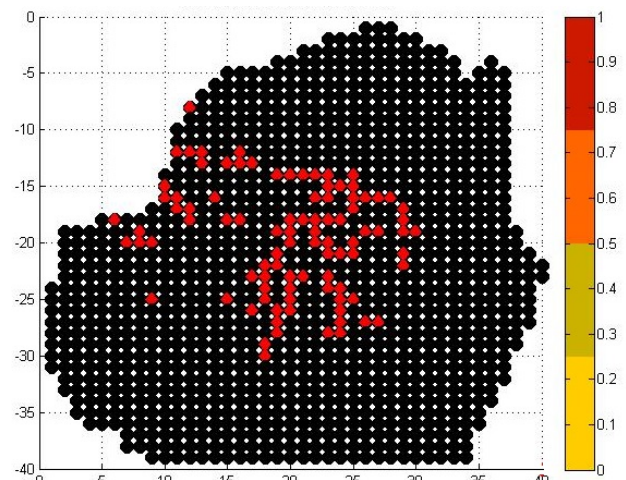


Figura 3. Localização inicial dos VEs.

Para fins ilustrativos, os valores iniciais e finais na movimentação de um VE são mostrados na Tabela 1. Observa-se que o VE estava inicialmente na coluna 29 e linha 21 com SOC inicial de 55,42%. Após aplicação do algoritmo proposto, o VE teve como destino final, a quadrícula da coluna 2 e linha 19 com SOC final de 9,65%. Este VE percorreu uma distância igual a 58,923 km. Percebe-se que com pouco mais da metade de SOC inicial, e critério de parada de 10% do total de SOC, o VE percorreu 91 quadrículas até chegar ao seu destino final e depois retornar ao seu destino inicial. Com isso pode-se concluir que o VE percorreu 45 quadrículas na ida, chegou à quadrícula 46 (sendo esta X=2 e Y=19) e retornou para a quadrícula inicial, completando, assim o trajeto de ida a um determinado local, e após algum tempo, retornando ao inicial.

VE	X	Y	SOC inicial (%)	SOC Final (%)	Distância percorrida (km)
1	29	21	0,554	0,554	0
1	02	19	0,554	0,097	58,923

Tabela 1. Resultado das simulações para um VE.

Este processo foi repetido para todos os VEs do bloco, e para todos os blocos, a fim de simular todos os VEs. Quando todos os blocos foram deslocados, os mapas temáticos dos locais percorridos pelos VEs são gerados. Para cada execução do algoritmo proposto se obtém uma distribuição espacial diferente do fluxo dos veículos, pois se está considerando que o nível inicial de carga é uma variável aleatória. Para estimar o valor esperado do número de veículos por cada subárea e sua quantidade de carga com a qual atravessam as subáreas, realizaram-se 100 simulações para criar um intervalo de confiança para os valores estimados seguindo a metodologia explicada em [16]. Utilizou-se uma abordagem otimista e foi calculado o intervalo de confiança através da equação (2):

$$IC(p, \gamma) = \left[p - Z_{\gamma/2} \times \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}; p + Z_{\gamma/2} \times \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \right] \quad (2)$$

Sendo p a média das concentrações de VEs por quadrícula, e γ o coeficiente de confiança. Para esta aplicação considerou-se um valor de 95% para γ .

Com as 100 simulações realizadas, criou-se um intervalo de confiança através da equação (2). Este intervalo mostra uma dispersão em relação ao valor médio da concentração de veículos. Tal dispersão pode ser considerada como um erro do valor esperado de veículos por quadrícula, mostrada na figura 4. Esta figura mostra erros percentuais em uma escala de 0 a 2,5%; 2,5 a 5%; 5 a 7,5%; e acima de 7,5%. Percebe-se que o erro percentual é baixo, estando eles majoritariamente menores que 7,5%.

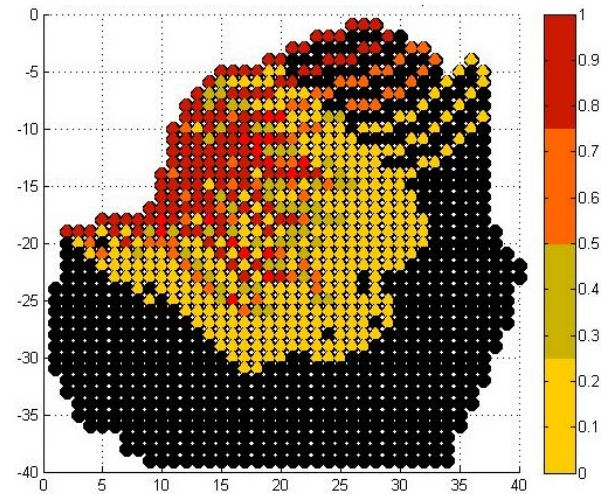


Figura 4. Erro percentual na quantidade de VEs que passam por quadrícula.

O valor estimado de veículos por cada subárea em percentagem do total de veículos simulados é mostrado na Figura 5.

Percebe-se que há maior predominância na circulação de VEs nas partes centrais, norte, oeste e noroeste, visto que estes veículos estão localizados inicialmente nestas regiões da cidade e se movimentam para o centro (regiões de interesse), com o intuito de irem a outros locais e para realizar suas atividades econômicas.

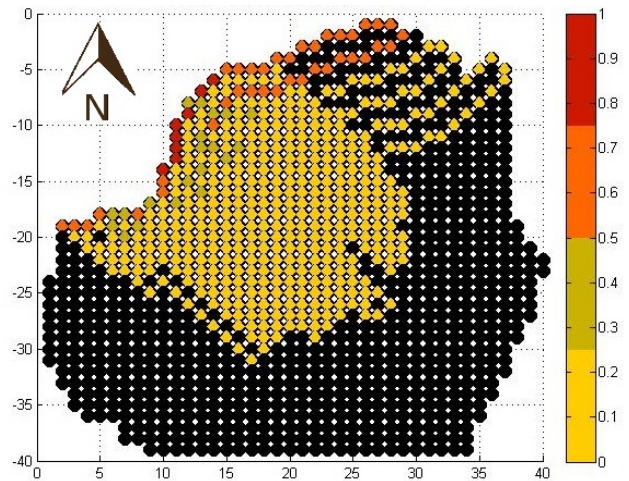


Figura 5. Caminho dos VEs.

A quantidade de SOC médio com os quais os blocos atravessam cada quadrícula é ilustrada na Fig. 6.

Analisando as Figuras 4 e 6 pode-se observar que diversos locais da zona periférica com um alto valor de concentração de veículos por quadrícula são atravessados com um nível alto de bateria. Embora, esses locais sejam muito frequentados (alto fluxo de VEs), o valor médio do SOC que os VEs atravessam é alto, consequentemente, não existe a necessidade da instalação de estações de carga em tais locais. Já, locais com baixo valor médio de SOC e alta concentração de veículos são os candidatos ideais para instalação de estações de recarga.

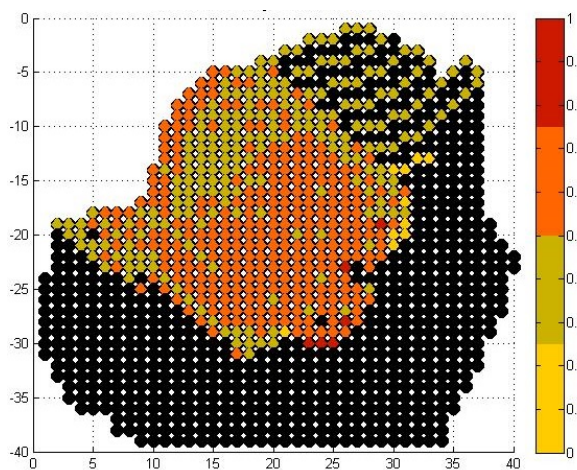


Figura 6. Carga Média das baterias dos VEs.

A figura 7 apresenta os locais finais aos quais os VEs chegaram.

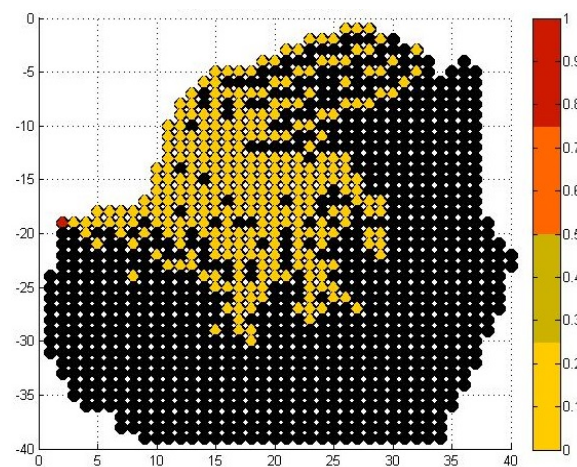


Figura 7. Localização final dos VEs.

Para mostrar a utilidade dos valores estimados, agrega-se a demanda elétrica dos locais candidatos das instalações de estações de recarga aos transformadores de distribuição das quadriculas. Os locais candidatos são considerados aqueles que apresentem um menor intervalo de confiança, um número alto de veículos e um nível baixo de carga nas baterias.

Na figura 8, podem-se identificar os possíveis locais para a instalação de postos de recarga.

Para o cálculo da demanda levou-se em conta que a quantidade de carga que deve ser fornecida aos pelotões é aquela que consumiu na sua viagem. Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas as distribuições espaciais das demandas elétricas sem e com estações de recarga, respectivamente. Foi considerado que o VE chega com uma pequena quantidade de carga em suas baterias e é carregado até que se obtenha 90% de carga. Com 75 postos de recarga disponíveis, foram alocados 63 VEs em cada posto de recarga para a estimação da potência que a estação irá necessitar e adicionados à demanda do local.

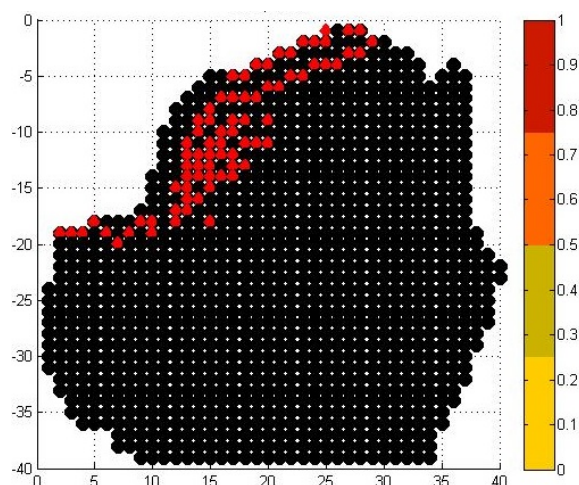


Figura 8. Locais dos possíveis postos de recarga.

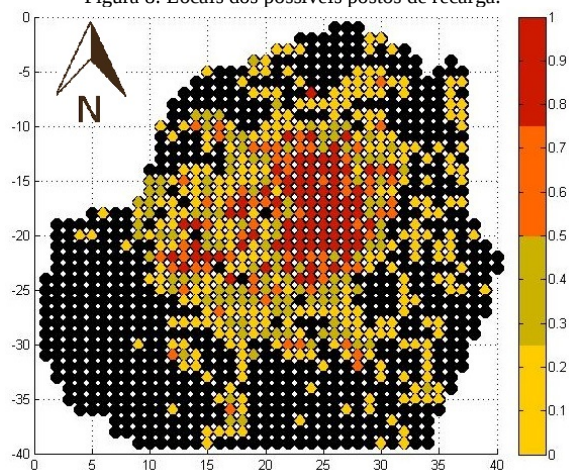


Figura 9. Distribuição espacial da demanda elétrica dos transformadores sem as estações de recarga.

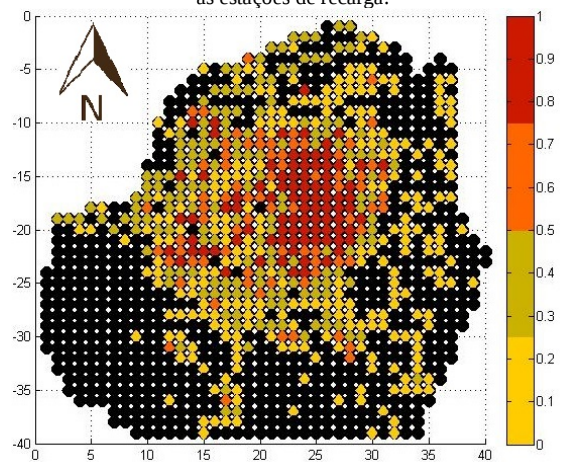


Figura 10. Distribuição espacial da demanda elétrica dos transformadores com as estações de recarga.

Pode-se perceber, através da figura 10, na parte noroeste da cidade, onde estão localizados os possíveis postos de recarga, um aumento da demanda elétrica. Uma evolução espacial da distribuição dos VEs será realizada em trabalhos futuros como uma melhor forma de cálculo da demanda das estações de recarga.

A figura 10 mostra a utilidade dos resultados obtidos pelo modelo proposto a fim de analisar o carregamento das redes elétricas.

O tempo de simulação e geração dos mapas foi de 3 minutos. A plataforma utilizada para realizar as simulações foi o software Matlab, em um computador Intel® core™ i5 4200-u 1,6GHz 8GB RAM.

IV. CONCLUSÕES

Um modelo de simulação espacial para estimação do valor esperado do número de veículos e o nível de carga por quadrícula foi apresentado. O modelo pode simular uma grande quantidade de veículos com um baixo tempo computacional. Uma contribuição do modelo é fornecer informações relevantes para alocação de estações de recarga de VEs. Tais informações são necessárias para os planos de expansão e operação da rede elétrica.

O modelo proposto considera uma abordagem mesoscópica para a análise do fluxo de veículos por quadrícula. Esta abordagem é a mais adequada para estimar as variáveis de localização e demanda elétrica das estações de recarga. Para o ponto de vista das distribuidoras, essa classe de informação é necessária para determinar a demanda futura a ser atendida.

Os intervalos de confiança dos resultados obtidos ajudam a realizar uma melhor inferência dos valores estimados pelo modelo. Assim, locais com menor dispersão são aqueles no qual o modelo tem mais chance de representar o comportamento estocástico dos donos de VEs.

Atualmente, existem poucos modelos para estimar a distribuição espacial dos veículos elétricos. Desta forma, este artigo contribui a literatura especializada com um novo modelo para ajudar na alocação de estações de recarga.

V. REFERÊNCIAS

- [1] Growth Analysis, "Re-charged for success: The third wave of electric vehicle promotion in Japan," February 2012. [Online]. Available: www.growthanalysis.se. [Accessed 12 November 2014].
- [2] M. Petit and Y. Perez, "Plug-in vehicles for primary frequency regulation: What technical implementation?," in IEEE Grenoble PowerTech (POWERTECH), Grenoble, 2013.
- [3] P. Yannick, P. Marc and K. Willett, "A public policy strategies for electric vehicles and for vehicle to grid power," in World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Barcelona, 2013. J. Jones. (1991, May 10). Networks. (2nd ed.) [Online]. Available: <http://www.atm.com>
- [4] Florida Public Service Commission, December 2012. [Online]. Available: <http://www.psc.state.fl.us/publications/reports.aspx>.
- [5] Silver Spring Networks, December 2013. [Online]. Available: www.silverspringnet.com.
- [6] Z. Liu, F. Wen and G. Ledwich, "Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 102-110, Jan 2013.
- [7] F. Baouche, R. Billot, R. Trigui and N.-E. El Faouzi, "Efficient allocation of electric vehicles charging stations: Optimization model and application to a dense urban network," IEEE Intelligent transportation system magazine, vol. 6, no. 3, pp. 33-43, July 2014.
- [8] California State Legislature, 2014. [Online]. Available: <http://www.legislature.ca.gov/>.
- [9] PAIVA, C. Modelos Tradicionais Transportes e Tráfego. ANTP.210.
- [10] J. Pecherka, "Material flow simulation Using Discrete-Event and Mesoscopic approach," 24-26 march 2010.
- [11] J. D. Melo; E. M. Carreno and A. Padilha-Feltrin. "Multi-Agent Framework for Spatial Load Forecasting", in: Proc. Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-8, 24-29 July 2011
- [12] S. Bittanti, G. Nicolao, "Markovian representations of cyclostationary processes," in Topics in Stochastic Systems: Modelling, Estimation and Adaptive Control. vol. 161, L. Gerencsér and P. Caines, Eds., ed: Springer Berlin / Heidelberg, 1991, pp. 31-46.
- [13] J. Hromkovic, Algorithms for hard problems: introduction to combinatorial optimization, randomization, approximation, and heuristics. [S.l.]: Springer-Verlag, London - Berlin - Heidelberg - New York, 2001.
- [14] E. Marchioro, "Projeto de Reestruturação do sistema do transporte coletivo municipal de Presidente Prudente", Presidente Prudente, 2014..
- [15] Veículos de emissão zero, "Sobre o carro". Página consultada em 15 de novembro de 2015, <http://www.vezdobrasil.com.br/sobre-o-carro-eletrico/>>..
- [16] PAV, Kalinowski. Understanding Confidence Intervals (CIs) and Effect Size Estimation. Association for Psychological Science Observer. [S.l.: s.n.], April 10, 2010.