

# Alocação de Eletropostos com Análise Integrada de Tráfego e Impactos Técnicos nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

José C. G. Andrade\*, Manuella C. Marçal\*, Bruno. P. Cancian\*, Waldir Freitas\*, Eduardo P. L. Junior\*\*

\*Departamento de Sistemas e Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação,  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 13083-852, Campinas, SP, Brasil  
E-mails: {jcga, waldir}@dsee.fee.unicamp.br, {g262725, b195136}@dac.unicamp.br

\*\*Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), Rodovia Engenheiro Miguel Noel Nascentes Burnier, km 2,5,  
Campinas, SP, Brasil. CEP: 13088-900. E-mail: lacusta@cpfl.com.br

**Abstract:** Electric mobility is a world-wide phenomenon of irreversible nature, with distinct motivations and targets. To ensure the wide adoption of electric vehicles (EVs), there must exist an adequate charging infrastructure. The objective of this work is to develop a scalable methodology to allocate charging stations in public areas of metropolitan regions based on traffic flow and electric analysis. The methodology is applied to the city of Campinas-SP, which has more than 1.2 million inhabitants in an area of 800 km<sup>2</sup> and 27 electric substations. In the case study, 50 semi fast charging stations were installed on low voltage (LV) and medium voltage (MV) distribution systems. The results have shown that MV installations are preferable to avoid technical impacts in the electric system, however, LV installations are also a viable option if the charging station is installed at the LV side of oversized distribution transformers.

**Resumo:** A mobilidade elétrica é um fenômeno de escala mundial, de natureza irreversível, com distintas motivações identificadas nos vários países precursores em sua adoção. Para garantir a adoção em massa dos veículos elétricos (VEs), é crucial que exista uma infraestrutura de recarga adequada, sendo eletropostos públicos parte significativa deste processo. O objetivo deste artigo é desenvolver uma metodologia de alocação escalonável de eletropostos em locais públicos com base em análises de tráfego e elétricas. A metodologia é aplicada na cidade de Campinas-SP, que possui aproximadamente 1,2 milhão de habitantes em uma área de 800 km<sup>2</sup> e 27 subestações elétricas. No estudo de caso foram alocados 50 eletropostos semirrápidos tanto em baixa tensão (BT) quanto em média tensão (MT). Os resultados indicaram que instalações em MT são recomendadas para evitar impactos técnicos nos sistemas de distribuição de energia elétrica, porém instalações em BT também são viáveis desde que utilizando transformadores sobredimensionados.

**Keywords:** Charging station; electric distribution system; electric mobility; electric vehicle; technical losses; transportation system; voltage violation.

**Palavras-chaves:** Eletromobilidade; eletroposto; perdas técnicas; sistema de distribuição de energia elétrica; sistema de transporte; transgressão de tensão; veículo elétrico.

## 1 INTRODUÇÃO

A eletromobilidade ou mobilidade elétrica é um fenômeno de escala mundial, de natureza irreversível, com distintas motivações identificadas nos vários países precursores em sua adoção. A participação de mercado da mobilidade elétrica está em crescente ascensão e é motivada, entre outros fatores, pela preocupação com mudanças climáticas e volatilidade do preço dos combustíveis fósseis. Diversos fabricantes de veículos automotivos iniciaram investimentos em veículos movidos a eletricidade e, como consequência, em 2018 o número de veículos elétricos (VEs) superou 5 milhões de unidades, com crescimento de 65% em relação a 2017 (International Energy Agency [IEA] 2019). Há expectativa de que este crescimento se acentue nas próximas décadas devido aos avanços tecnológicos, redução de preços dos componentes, produção

em escala e incentivos governamentais (International Energy Agency [IEA] 2019; McKinsey & Company 2017).

Para garantir a adoção em massa dos VEs, é crucial que exista uma infraestrutura de recarga adequada, sendo eletropostos públicos parte significativa deste processo. Atualmente, existem três tipos de eletropostos, os quais são resumidos na Tabela 1 (IEC 2014; International Energy Agency [IEA] 2019; SAE 2019). A aplicação de cada eletroposto depende da potência nominal; por exemplo, o tipo normal aloca-se em locais de pernoite, enquanto estacionamentos diurnos utilizam o tipo semirrápido. O tipo rápido assemelha-se a um posto de combustível, logo, não tem local predefinido.

Em 2018, eletropostos normais correspondiam a mais de 90% da infraestrutura de recarga (International Energy Agency [IEA] 2019); entretanto, o número de eletropostos públicos

(semirrápido e rápido) cresceu 29% em comparação com 2017, com eletropostos semirrápidos representando três quartos do total disponível publicamente (International Energy Agency [IEA] 2019). Dada a crescente presença desses novos agentes, é imprescindível o desenvolvimento de novas metodologias para alocar eletropostos públicos. Uma infraestrutura de recarga mal implementada pode resultar, além dos impactos técnicos no sistema elétrico, em maiores tempos de viagem dentro da região e, portanto, perda de produtividade da população.

Tabela 1. Descrição dos tipos de eletropostos existentes.

Tipo	Potência (kW)	Conexão	Tempo de recarga (horas)
Normal	< 5	fase-neutro ou fase-fase	< 12
Semirrápido	5 - 24	trifásico	< 8
Rápido	25+	trifásico (transformador dedicado)	< 2

No tema de alocação de eletropostos há estudos com os mais variados focos, destacando-se três categorias: (i) sistemas de energia elétrica; (ii) sistemas de transporte (tráfego); e (iii) estudo combinado dos dois tópicos anteriores.

Iniciando pelos estudos de sistemas elétricos, a localização dos eletropostos pode ser analisada através da minimização das perdas técnicas e desvios de tensão (Martins & Trindade 2015). Análises aprofundadas incluem reforços de rede, expansão de subestação e custo de aquisição e manutenção (Arias et al. 2018; Kasi et al. 2014; Liu et al. 2018). Entretanto, nenhum destes estudos citados considera aspectos da malha de transportes (tráfego de veículos). A alocação adequada dos eletropostos não depende somente dos impactos no sistema de distribuição, mas esta deve considerar também os impactos no fluxo de veículos (Amini 2019).

Do ponto de vista do tráfego, estudos envolvendo eletropostos focam primordialmente na capacidade da malha de transportes em minimizar atrasos devido à mudança de fluxo de veículos causada por eletropostos (Chang et al. 2010; Guo & Zhao 2015; Lam et al. 2014). Apesar de considerarem uma segunda perspectiva, focada na capacidade da malha de transportes, estes estudos desconsideram os impactos no sistema elétrico.

Recentemente, estudos têm investigado os sistemas elétrico e de transportes de forma integrada para alocação de eletropostos. Por ser um campo interdisciplinar de estudo, existem diversas metodologias sujeitas a combinações de objetivos, por exemplo: (i) minimização de perdas técnicas e desvios de tensão com base em fluxo de veículos (Celli et al. 2018); (ii) minimização de perdas técnicas e desvios de tensão aliados à maximização do fluxo de veículos (Wang et al. 2013); (iii) maximização da rentabilidade (Neyestani et al. 2018); e (iv) minimização dos reforços nos sistemas elétrico e de transportes (Wei et al. 2017). Apesar desses trabalhos apresentarem uma modelagem mais completa, integrando sistema elétrico e tráfego de veículos, a complexidade das soluções torna difícil a aplicação em regiões extensas e densamente povoadas, que tendem a ser as regiões de interesse no desenvolvimento da infraestrutura de recarga de VEs.

O objetivo deste artigo é desenvolver uma metodologia escalonável de alocação de eletropostos em locais públicos

com base em uma análise integrada de tráfego e sistemas elétricos, facilitando o desenvolvimento da mobilidade elétrica na sociedade. Com base nos resultados, são fornecidas indicações de locais candidatos com significativo fluxo de VEs e que reduzam os impactos técnicos no sistema elétrico.

Este artigo está organizado conforme descrição a seguir. Na seção 2 é descrita a metodologia de alocação. Na seção 3 descreve-se o estudo de caso, cujos resultados encontram-se na seção 4. Na seção 5 as conclusões são apresentadas.

## 2 METODOLOGIA DE ALOCAÇÃO DE ELETROPOSTOS

Nesta seção descreve-se a metodologia de alocação de eletropostos separando o conteúdo em análise de tráfego e análise de sistemas elétricos.

### 2.1 Metodologia de Análise de Tráfego

O primeiro ponto a ser definido é a escala do estudo, a qual pode ser macroscópica ou microscópica (Treiber & Kesting 2013). A primeira trata o fluxo de veículos de forma agregada, utilizando parâmetros como volume e densidade; enquanto a segunda modela os veículos individualmente. A escala deste estudo pode ser classificada em microscópica, visto que os veículos no sistema são modelados individualmente, com base no fato que eles percorrem rotas distintas. Com isto, é necessário indicar um plano de viagens para cada veículo na simulação, isto é, conhecer os pontos visitados por cada veículo. A seguir descreve-se em detalhes a metodologia de análise de tráfego.

#### 2.1.1 Plano de Viagens

Para cada veículo define-se um plano de viagem  $\gamma$  composto por pontos geográficos de início e fim da rota (*e.g.*, uma casa), pontos para serem visitados (*e.g.*, local de trabalho), e a duração correspondente das visitas no período de interesse (*e.g.*, 8 horas). Este plano pode ser descrito através de (1), na qual o plano de viagens da população de veículos em estudo ( $W$ ) é formado por  $\zeta$  (local visitado pelo veículo  $w$ ), e pela sequência de pontos a serem visitados ( $Z$ ). Cada ponto dentro do plano possui uma propriedade temporal  $\beta$ , sendo que o primeiro ponto é modelado através de um tempo final (*i.e.*, término da visita) e os demais, como durações.

$$\gamma_w = \{\beta_\zeta\}_{\zeta=1}^Z, \forall w \in W \quad (1)$$

Na prática, devido à indisponibilidade de padrões individuais de viagens, dados de censos podem ser utilizados para definir de modo realístico os planos de viagens para cada um dos veículos. Para uma dada cidade na qual podem ser definidas as zonas de cada uma das atividades (*e.g.*, residencial, comercial, etc.) é possível gerar planos individuais através da amostragem dos pontos de visita (por exemplo, usando densidade populacional para residências) das rotas dos veículos combinados com a probabilidade de horários de partida e duração das atividades (utilizando horários de trabalho regionais/nacionais). Esta combinação de informações permite a criação de funções de densidade de probabilidade que podem ser utilizadas para produzir padrões de viagem de veículos para uma dada simulação. As funções de densidade de

probabilidade das características temporais seguem a equação (2), sendo  $a$  e  $b$  os limites inferior e superior da função densidade de probabilidade, respectivamente.

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, b > a \quad (2)$$

### 2.1.2 Rota e Simulação de Tráfego

Antes de executar a simulação do tráfego, as rotas para cada veículo devem ser definidas. A rota é calculada através do algoritmo do Dijkstra (Dijkstra 1959), que encontra o caminho mais curto entre os pontos de cada plano de viagem. Após atribuições das rotas de cada veículo, simula-se o fluxo de veículos da região.

O modelo de simulação de tráfego utiliza velocidade dinâmica (Treiber & Kesting 2013) e é descrito por (3) e (4). A velocidade  $v_r$  considera o fluxo instantâneo de veículos ( $\sigma_r$ ) em cada trecho de rota  $r$  (e.g., rua, avenida, rodovia etc.), a qual impacta no cálculo do tempo  $T$  que cada veículo despense para percorrer a rota.

$$T^w = \sum_{r \in R_w} \left( L_r / v_r(t) \right), \forall w \in W \quad (3)$$

$$v_r(t) = v_{r,max} \cdot \exp(-\sigma_r(t)), \forall 0 \leq t \leq 24 \quad (4)$$

O tempo de viagem de cada veículo  $w$  depende da rota  $R$  (conjuntos de trechos, tendo cada trecho  $r$  um comprimento  $L_r$ ) e da sua velocidade em cada trecho. A velocidade é uma variante do tempo  $t$  que depende do fluxo de veículos e da máxima velocidade permitida em cada trecho da rota  $v_{r,max}$ . Todos os veículos realizam as suas rotas simultaneamente. Esse processo é repetido para um número pré-definido de iterações a fim de reduzir individualmente os tempos de viagem e alcançar o equilíbrio do ponto de vista do usuário (Treiber & Kesting 2013). Após cada simulação de tráfego, os veículos que apresentam os 20% piores tempos de viagem, em relação ao tempo sem trânsito, têm suas rotas recalculadas. As análises de tráfego são realizadas no *software* MATSim (Horni et al. 2016), uma ferramenta de simulação em larga-escala de transportes baseada em agentes para planejamento e operação de transportes.

Através deste procedimento é possível obter as condições de tráfego para a região desejada. Esta análise do fluxo de veículos é realizada sem a inclusão de VEs a fim de avaliar os tempos de viagens e determinar os locais potenciais para a instalação dos eletropostos. Os locais candidatos à instalação de eletropostos são determinados baseados nos trechos (seções da rota) com o maior fluxo diário de veículos, isto é, maior número absoluto de veículos passantes. A fim de evitar aglomerações de trechos em uma mesma região, também é definido que os locais devem ter um limite mínimo de separação, neste trabalho definido como 1 km. Desta forma, ao selecionar um local com elevado fluxo de veículos, espera-se que o impacto nos tempos de viagem da população de veículos seja mínimo, visto que o eletroposto será instalado em um local com maiores chances de já fazer parte da rota dos VEs (evitando desvios).

## 2.2 Metodologia de Análise Elétrica

A análise elétrica visa determinar os impactos elétricos causados pela adição dos eletropostos em seus locais de possível instalação. Para associar os locais candidatos obtidos na análise de tráfego com o sistema elétrico de distribuição é utilizada a base GIS (em inglês, *Geographic Information System*), a qual armazena todos os dados geográficos dos ativos, por exemplo, transformadores, linhas etc. Para cada local candidato resultante da análise de tráfego definem-se os pontos elétricos:

- *Em baixa tensão (BT)*: o ponto de conexão deve ser o secundário do transformador de distribuição mais próximo cuja potência nominal seja no mínimo 75 kVA. Este ponto visa aproveitar a capacidade de equipamentos que podem estar sobredimensionados;
- *Em média tensão (MT)*: o ponto de conexão deve ser a linha de MT mais próxima. Neste caso necessita-se utilizar um transformador dedicado, porém existe a vantagem de o ponto elétrico ser mais próximo ao trecho selecionado na análise de tráfego (onde há um transformador de distribuição MT/BT, sempre há uma linha de MT; porém, o contrário não é válido).

Tais impactos são analisados através da execução de um fluxo de carga multifásico série-temporal através do *software* OpenDSS (EPRI 2020) e considerando as métricas definidas na subseção 2.2.1.

### 2.2.1 Métricas

Do ponto de vista do sistema elétrico, três métricas são estabelecidas para avaliar os impactos e benefícios da instalação de eletropostos:

- *Perdas técnicas*: valor percentual que indica a razão entre as perdas técnicas absolutas e a energia injetada na subestação;
- *Transgressão de tensão*: total de pontos com tensão de atendimento fora da faixa adequada avaliado em janelas de 10 minutos, conforme descrito em Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2018). Este índice soma o número de pontos fora da faixa adequada de todas as unidades consumidoras, fornecendo um único valor para o circuito analisado;
- *Carregamento de transformadores MT/BT*: percentual da potência nominal utilizada em transformadores de distribuição, empregada apenas na avaliação de eletropostos instalados em BT. Neste caso, assume-se que a potência deve estar dentro dos limites por 95% do tempo (IEEE 2012), isto é, tolera-se uma hora de sobrecarga diária.

Dada a necessidade de analisar pontos em diferentes níveis de tensão, ambas as redes de MT e BT devem ser modeladas simultaneamente para uma avaliação realista. O algoritmo de análise do sistema elétrico é descrito na subseção 2.2.2.

### 2.2.2 Algoritmo

O algoritmo desenvolvido para realizar a análise elétrica baseia-se nos seguintes pontos:

1. *Teste 1*: Alocam-se todos os eletropostos nos pontos de BT e realiza-se um fluxo de carga série-temporal correspondente a um período de uma semana (7 dias);
2. Verificam-se os resultados com base nas métricas definidas na subseção 2.2.1;
3. *Teste 2*: Todos os eletropostos têm suas conexões alteradas de BT para MT, através de um transformador dedicado, e realiza-se um novo fluxo de carga;
4. Verificam-se os novos resultados com base nas métricas definidas na subseção 2.2.1.

Ao final do algoritmo é possível comparar, para cada instalação de eletroposto (BT e MT) e cada métrica definida, qual local apresentou os menores impactos.

### 3 ESTUDO DE CASO

A metodologia descrita na seção 2 é aplicada na cidade de Campinas-SP, que possui aproximadamente 1,2 milhão de habitantes em uma área de 800 km<sup>2</sup>. A informação geográfica do sistema de transporte foi extraída da base de dados OpenStreetMap (OpenStreetMap 2020). O sistema de transporte desta região é composto por 31 mil nós (pontos geográficos) e 80 mil trechos (arcos que conectam dois nós) com comprimentos variando de poucos metros até 3,6 quilômetros (com 100 metros de média).

Como os planos de viagens (locais e características temporais) da população real são desconhecidos, define-se uma população sintética com base em censos e zonas a fim de se obter as condições de tráfego. A partir do censo mais recente do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE] 2010), ilustrado na Figura 1 para a região selecionada, é possível obter a distribuição geográfica da população real. Com esta informação, geram-se funções de densidade de probabilidade para distribuir as residências da população sintética de forma a obter uma densidade similar.

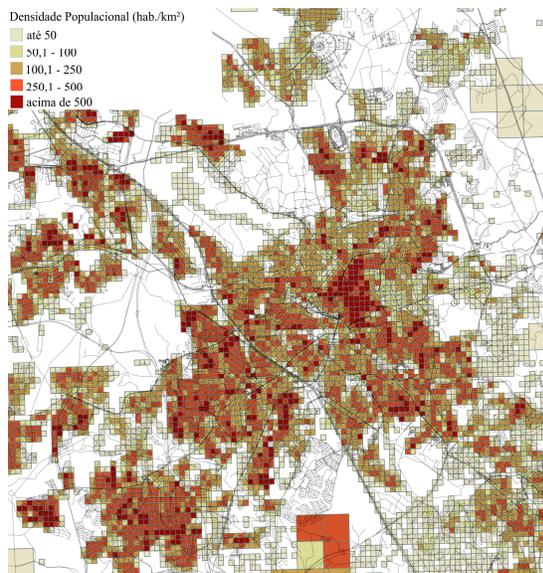


Figura 1. Densidade populacional de Campinas extraída do IBGE.

Em relação ao local de trabalho, é assumido que toda população trabalha na região interna demarcada pelo anel

viário de Campinas, seguindo uma distribuição uniforme. Os horários de trabalho são baseados na legislação brasileira (Presidência da República – Casa Civil – Subchefia para Assuntos Jurídicos 1943). Essa informação é usada para criar os planos de viagem dos veículos. Assume-se que o veículo deixa a residência entre às 6 e 8 horas da manhã, que o trabalho dura entre 8 e 10 horas, e que, após esse período, o veículo retorna à residência. Esta modelagem é feita para proporcionar um estudo realista, representando as diferenças nos perfis dos veículos (diferentes planos de viagens) da população sintética.

A simulação de tráfego ocorre para 24 horas de um dia útil e considera apenas deslocamentos diários de trabalho. Assume-se que cada residência possui 1 veículo utilizado para realizar o percurso de um trabalhador em dia útil, ou seja, ir da residência ao trabalho e vice-versa. A população sintética é criada com 8.000 veículos, ou seja, 0,9% da população original de veículos da região (Ministério da Infraestrutura 2020), o que garante mais de 99% de nível de confiança na amostra (Fleiss 2003) e diminui o esforço computacional.

O sistema elétrico desta região contém 27 subestações (SEs) de distribuição (69 kV/11,9 kV e 138 kV/11,9 kV), as quais englobam mais de 670 mil linhas e 687 mil barras. Os sistemas suprem aproximadamente 585 mil unidades consumidoras, das quais 91% são residenciais, com consumo anual de aproximadamente 3,5 TWh. Os sistemas a montante, de 69 kV e 138 kV, são modelados por um equivalente de Thévenin usando os níveis de curto-circuito de cada SE, cujos dados foram fornecidos pela concessionária local. Os sistemas de MT (11,9 kV) e BT (220 V) são explicitamente modelados, com o primário trifásico a três fios em delta e o secundário trifásico a quatro fios em estrela.

Os dados necessários para a constituição de modelos realistas do sistema elétrico da concessionária local estão disponíveis na Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD), cujo conteúdo é especificado em Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2016). Entretanto, também são usadas outras bases internas para complementar as informações, e.g., temporização de equipamentos controlados. Nos consumidores do grupo B (em BT) são utilizadas curvas típicas resultantes da última campanha de medição realizada pela concessionária (Jardini 2000), enquanto nos consumidores do grupo A (em MT) são usados dados de medições; ambos fornecidos pela concessionária local.

Por simplificação, assume-se o eletroposto como uma carga de consumo constante em 24 horas, com modelo de corrente constante e potência nominal de 20 kW (semirrápido). Em cada local candidato é instalado apenas um eletroposto (único ponto de recarga). As simulações são realizadas com resolução de 5 minutos em cada conjunto elétrico, i.e., para cada transformador da SE e respectivos alimentadores a jusante.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção destina-se a descrever os resultados do estudo de caso, ilustrando primeiramente a análise de tráfego e, na sequência, a análise elétrica.

#### 4.1 Análise de Tráfego

Ao utilizar a população sintética para simular a região de Campinas no *software MATSim* (Horni 2016), o principal resultado obtido é um registro de eventos detalhados sobre todas as ações realizadas. Com esta informação pode-se, então, avaliar quais ruas/avenidas são mais movimentadas, resultando na Figura 2, onde as linhas espessas indicam locais nos quais o fluxo de veículos é superior a 1% do total da frota da população sintética, isto é, locais que possuem fluxo intenso. Nota-se que os principais pontos de fluxo intenso são rodovias e avenidas. Este resultado é coerente com o fluxo histórico divulgado pela Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas [EMDEC] (2009).

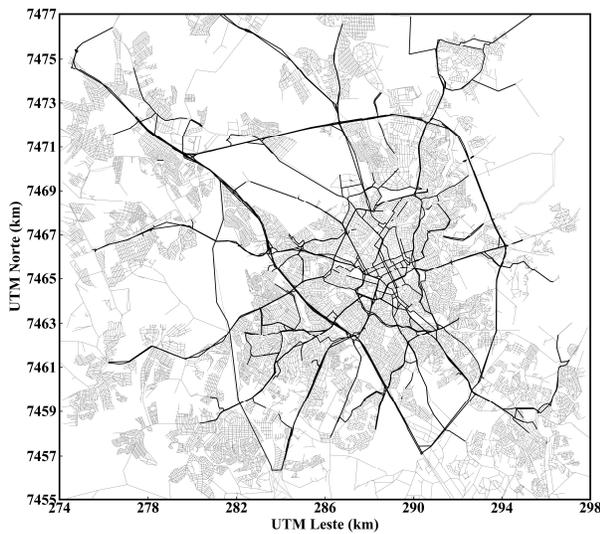


Figura 2. Locais com fluxo de veículos superior a 1% da frota da região.

A partir deste resultado, obtêm-se os 50 locais de maior fluxo ilustrados na Figura 3. Cada círculo representa um ponto candidato, sendo o local específico localizado no centro do círculo. É possível notar que entre os 50 locais, 18 encontram-se ao longo de rodovias e 6 são próximos a trevos (entrada/saída de rodovias), totalizando 24 pontos; isto indica que novas opções razoáveis podem ser obtidas procurando-se estar próximo a rodovias. Também é relevante o número de locais candidatos próximos de cruzamentos entre ruas e avenidas, sendo 16 locais alinhados com esta condição. Os demais locais têm sempre um ponto referencial, *e.g.*, praça, balão/rotatória etc. De posse dos pontos candidatos, resta a análise elétrica de cada local, cujos resultados são descritos na subseção 4.2.

#### 4.2 Análise Elétrica

Na metodologia de análise elétrica, para cada trecho de rua/rodovia candidato, foram determinadas as barras de BT e de MT mais próximas. O resultado desse processo de busca é ilustrado na Figura 4, na qual detalha-se também a rede elétrica de distribuição (linhas coloridas conforme o conjunto elétrico – cada conjunto engloba o transformador da SE e os respectivos alimentadores a jusante) e os pontos de BT e MT.

A barra de BT encontra-se em média a 75,93 metros do local selecionado na análise de tráfego, enquanto a barra de MT

encontra-se em média a 22,65 metros, ou seja, três vezes mais próxima. Isto indica que a conexão com a MT será mais aderente ao local selecionado e requisitará menor quantidade de cabos, porém cada eletroposto candidato usando esta conexão requer um transformador exclusivo.

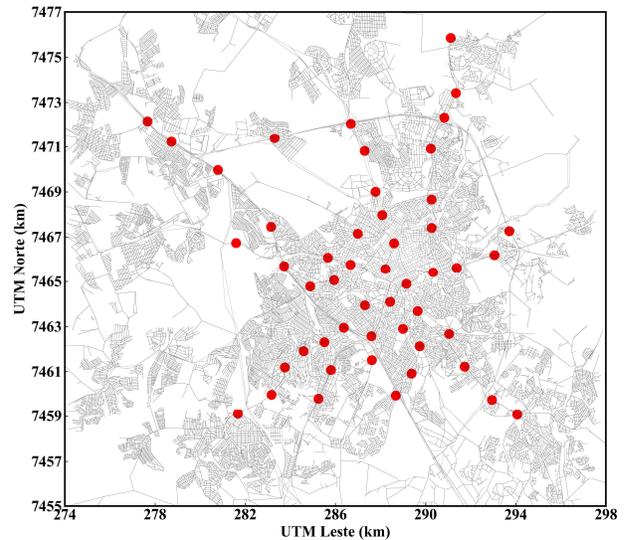


Figura 3. Mapa dos 50 locais candidatos para instalar eletropostos.

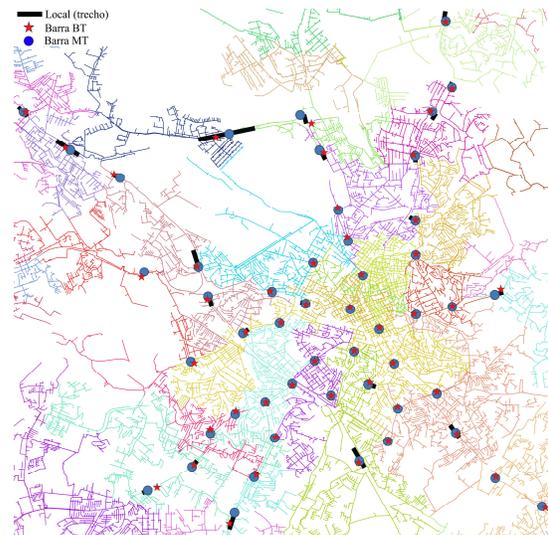


Figura 4. Mapa dos 50 locais candidatos para instalar eletropostos e os respectivos pontos elétricos (BT e MT).

A seguir, cada conjunto elétrico com local candidato é avaliado em termos das métricas descritas na subseção 2.2.1. Ao total, 27 transformadores de subestação, *i.e.*, 27 conjuntos elétricos foram simulados (isto corresponde a 16 das 27 SEs, pois existem SEs com mais de um transformador), com média de dois, mínimo de um e máximo de cinco locais candidatos em cada um desses conjuntos. A Tabela 2 indica quais pontos estão associados a quais conjuntos elétricos. É importante ressaltar que existem pontos nos quais as respectivas barras de BT e de MT estão em conjuntos elétricos distintos; logo, há variação do número de eletropostos nos conjuntos elétricos entre os testes 1 e 2, *i.e.*, para instalação em BT ou MT, definidos no algoritmo da subseção 2.2.2. Tais variações são

destacadas através de linhas sombreadas em amarelo a partir da Tabela 2. As subseções a seguir apresentam os resultados segundo a métrica avaliada.

Tabela 2. Número de eletropostos instalados por conjunto elétrico de acordo com o nível de tensão (BT ou MT).

Conjunto Elétrico	# locais BT	# locais MT
1	2	1
2	5	5
3	2	2
4	1	3
5	3	3
6	1	1
7	2	2
8	0	1
9	1	1
10	4	3
11	1	1
12	2	2
13	1	0
14	2	2
15	1	1
16	1	0
17	2	1
18	1	3
19	1	1
20	1	1
21	1	1
22	4	2
23	3	3
24	0	3
25	4	4
26	3	3
27	1	0

#### 4.2.1 Perdas Técnicas

Esta subseção destina-se a apresentar os resultados obtidos para perdas técnicas percentuais em cada conjunto elétrico. Os resultados são apresentados na Tabela 3, a qual indica o percentual de perdas técnicas no caso base, sem eletropostos (perdas base), e para instalação em BT ou MT. Os espaços vazios na Tabela 3 indicam que a simulação do conjunto não foi realizada por não apresentar eletropostos candidatos, segundo a Tabela 2. Os circuitos sombreados em amarelo seguem a definição estabelecida na Tabela 2.

Considerando ambos os tipos de instalação, BT e MT, é possível notar que as perdas técnicas percentuais diminuem em todos os conjuntos elétricos. Isto ocorre por dois motivos:

1. Os locais de instalação elevam a corrente da MT, porém a impedância das linhas de MT é baixa, resultando em um pequeno aumento absoluto das perdas técnicas. A energia injetada na subestação cresce mais que as perdas técnicas absolutas, logo o percentual diminui;
2. Os locais de instalação em BT elevam a carga dos transformadores, porém, devido a curva do eletroposto ser constante, isto eleva a eficiência do transformador em períodos de baixa carga (fora do pico), resultando em perdas percentuais menores que no caso base.

Avaliando os circuitos não sombreados, isto é, aqueles que possuem o mesmo número de eletropostos instalados em BT e em MT, tem-se que as perdas técnicas foram menores quando a instalação do eletroposto foi em MT em 87,5% (14 de 16) dos conjuntos. Um conjunto apresentou o mesmo valor de

perdas (#20) e no outro as perdas em MT foram maiores que em BT (#6). Ambos os casos podem ser considerados dentro da margem de erro de um fluxo de carga (0,001%).

Tabela 3. Percentual de perdas técnicas em cada conjunto simulado no qual o eletroposto foi instalado (BT ou MT).

Conjunto Elétrico	Base (%)	BT (%)	MT (%)
1	5,289	5,283	5,287
2	4,861	4,848	4,842
3	4,532	4,519	4,518
4	3,904	3,898	3,880
5	4,554	4,533	4,530
6	4,668	4,653	4,654
7	3,995	3,988	3,987
8	4,601	-	4,596
9	5,186	5,171	5,170
10	4,115	4,093	4,099
11	3,913	3,908	3,907
12	4,523	4,513	4,511
13	4,612	4,605	-
14	4,810	4,790	4,789
15	4,573	4,567	4,564
16	3,347	3,342	-
17	4,756	4,747	4,750
18	5,081	5,070	5,050
19	3,758	3,755	3,754
20	3,965	3,956	3,956
21	5,192	5,184	5,183
22	4,264	4,249	4,253
23	4,848	4,841	4,837
24	4,063	-	4,052
25	4,958	4,936	4,934
26	4,125	4,110	4,107
27	4,360	4,342	-

Em contrapartida, nos circuitos sombreados (11 conjuntos elétricos), nos quais o número de eletropostos em MT e BT variam por conjunto elétrico, tem-se:

- Em dois conjuntos as perdas percentuais são menores em MT (#4 e #18);
- Em quatro conjuntos as perdas percentuais são menores em BT (#1, #10, #17, e #22);
- Nos demais 5 conjuntos não é possível comparar pois não há eletropostos em BT ou em MT.

Nota-se que a conexão que resulta em menores perdas percentuais, comparando com o caso base, está associada ao caso com mais eletropostos, o que é coerente pois a energia injetada na subestação cresce mais que as perdas absolutas (devido à curva de demanda constante dos eletropostos).

#### 4.2.2 Transgressão de Tensão

Esta subseção destina-se a apresentar os resultados obtidos para transgressão da tensão de atendimento nos consumidores de cada conjunto elétrico. Os resultados são apresentados na Tabela 4, a qual indica a diferença percentual do número total de pontos (janela de 10 minutos por ponto) com transgressão de tensão para a respectiva instalação, BT ou MT, em relação ao caso base classificando em subtensão e sobretensão.

Em relação à subtensão, apenas 3 conjuntos apresentaram aumento superior a 2% no total de pontos, sendo 2 destes com instalação em BT (#17 e #22), e 1 com instalação em MT (#24). Entretanto, estes conjuntos elétricos apresentam um

pequeno valor de transgressões no caso base, o que culmina em maior aumento percentual. Três conjuntos elétricos apresentaram redução no número de transgressões por subtensão, efeito do diferente padrão de atuação do regulador de tensão em relação ao caso base (o regulador alterou o *tap* para elevar a tensão devido a maior carga); estes conjuntos são: #6 (em BT e MT), #16 (em BT) e #12 (em MT). Dos 27 conjuntos, 23 apresentam variação menor que 2% no número de transgressões, tanto em MT quanto em BT, porém a variação é menor em MT em relação à instalação em BT (comparando-se conjuntos elétricos com mesmo número de eletropostos e admitindo-se uma margem de erro de 0,1% na simulação).

Tabela 4. Variação no percentual de transgressão de tensão em cada conjunto simulado no qual o eletroposto foi instalado (BT ou MT) em relação ao caso sem eletropostos.

Conjunto Elétrico	Subtensão		Sobretensão	
	BT (%)	MT (%)	BT (%)	MT (%)
1	+0,043	+0,042	-5,419	-5,419
2	+0,386	+0,289	-10,667	-10,000
3	+0,363	+0,363	-4,749	-2,313
4	+0,131	+0,174	-1,282	-4,079
5	+1,063	+1,013	+8,011	+5,186
6	-2,569	-2,429	+5,660	+5,660
7	0,000	0,000	+0,220	+0,330
8	-	0,000	-	-1,170
9	0,000	0,000	0,000	0,000
10	+0,920	+0,742	-8,111	-4,867
11	+0,225	+0,225	-0,813	-0,622
12	0,000	-0,305	-11,190	-10,124
13	+0,058	-	-0,279	-
14	+1,111	+0,828	-1,850	-1,693
15	+0,220	+0,318	-0,123	-0,491
16	-0,010	-	0,000	-
17	+9,304	+0,271	-7,735	-3,609
18	+0,002	+0,013	-0,994	+0,398
19	+0,200	+0,150	-0,123	-0,123
20	+0,199	+0,199	-0,346	-0,346
21	+0,496	+0,423	0,000	0,000
22	+2,500	+1,250	-50,000	-50,000
23	+1,663	+1,631	-6,825	-6,362
24	-	+12,381	-	-21,429
25	+1,205	+1,064	-5,786	-5,157
26	+0,297	+0,267	-2,388	-1,512
27	+0,234	-	-1,395	-

Em relação à sobretensão, 20 dos 27 conjuntos apresentam redução no número de transgressões de tensão; 3 apresentam variação nula e os demais 4 apresentam aumento neste índice. Os casos que apresentam aumento estão relacionados com a variação do *tap* do regulador de tensão. As diferenças são maiores que no caso da subtensão, pois o número de transgressões por sobretensão no caso base é menor.

#### 4.2.3 Carregamento dos Transformadores MT/BT

A métrica de carregamento é relacionada ao uso dos transformadores de distribuição já presentes na rede que recebem um eletroposto, *i.e.*, eletropostos conectados na BT. Como mencionado na subseção 2.2, apenas transformadores de, no mínimo, 75 kVA foram selecionados para diminuir o risco de sobrecarga. A Figura 5 ilustra o 95º percentil do carregamento de cada transformador com eletroposto.

É possível notar que apenas um transformador superou 100% de carregamento utilizando o 95º percentil. Apesar de apenas

um transformador ter apresentado sobrecarga, para evitar este risco, recomenda-se realizar a medição da potência passante no transformador selecionado por um período, *e.g.*, uma semana, antes da instalação do eletroposto.

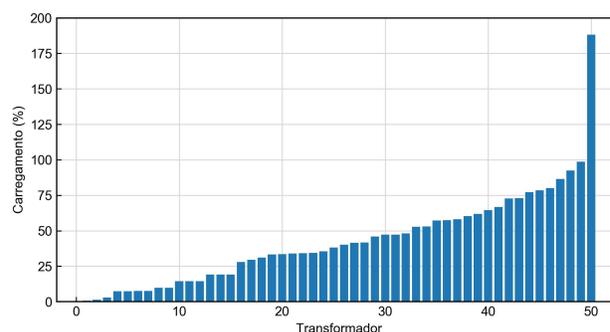


Figura 5. 95º percentil do carregamento de cada transformador MT/BT com eletroposto.

## 5 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o desenvolvimento de uma metodologia escalonável e integrada para alocação de eletropostos. A metodologia proposta integra informações de tráfego e do sistema elétrico. Com a análise de tráfego é possível extrair locais de maior fluxo de veículos, diminuindo, portanto, o impacto no trânsito. A partir dos locais selecionados na metodologia de tráfego, correlacionados através da metodologia elétrica, determinou-se, então, os locais elétricos correspondentes através de informações georreferenciadas. Fluxos de carga série-temporais foram realizados a fim de determinar o impacto da alocação desses eletropostos em três métricas distintas: perdas técnicas percentuais, tensão de atendimento nos consumidores, e sobrecargas de transformadores.

A partir dos resultados conclui-se que: (i) deve-se alocar eletropostos privilegiando locais de maior fluxo de veículos; (ii) a instalação em MT (através de transformador dedicado) é a mais recomendada por resultar em menor impacto em todas as métricas avaliadas, porém os custos podem ser mais altos devido a instalação de um transformador dedicado e, portanto, devem ser considerados; (iii) caso haja um transformador com potência nominal igual ou superior a 75 kVA nas proximidades do local candidato, o eletroposto pode ser instalado em BT. Entretanto, recomenda-se realizar a medição da potência passante no transformador selecionado por um período antes da instalação do eletroposto para garantir que este transformador esteja sobredimensionado.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa em desenvolvimento, no qual pretende-se ainda criar curvas de utilização para os eletropostos e tornar o método estocástico a fim de avaliar incertezas nos dados de tráfego e do sistema elétrico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das seguintes instituições: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos nº 2019/19282-2 e 2015/24448-6,

e Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL Energia), projeto de P&D ANEEL nº PD-00063-3060/2019.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL]., (2016). *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, módulo 10 – sistema de informação geográfica regulatório, revisão 0*. [online]. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-10>.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL]., (2018). *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, módulo 8, revisão 10*. 2018 [online]. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>.
- Amini, M. H., (2019). A panorama of interdependent power systems and electrified transportation networks. In: *Sustainable interdependent networks II*, Springer, pp. 23-41.
- Arias, N. B., Tabares, A., Franco, J. F., Lavorato, M., e Romero, R., (2018). Robust joint expansion planning of electrical distribution systems and EV charging stations. *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, **9**(2), 884-894.
- Celli, G., Pilo, F., Monni, G., e Soma, G. G., (2018). Optimal multi-objective allocation of fast charging stations. *International Conference on Environment and Electrical Engineering, Jun. 2018, Palermo, Itália*.
- Chang, S., Li, H., e Nahrstedt, K., (2014). Charging facility planning for electric vehicles. *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Dez. 2014, Florença, Itália*.
- Dijkstra, E. W., (1959). A note in two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, **1**(1), 269-271.
- Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas [EMDEC]., (2009). *Contagem do fluxo veicular*. [Online]. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: [http://www.emdec.com.br/eficiente/repositorio/EMDEC\\_documentos/1281.pdf](http://www.emdec.com.br/eficiente/repositorio/EMDEC_documentos/1281.pdf).
- EPRI., (2020). *EPRI distribution system simulator – OpenDSS* [online]. EPRI. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: <https://sourceforge.net/projects/electricdss/>.
- Fleiss, J. L., Levin, B., e Paik, M. C., (2003). *Statistical methods for rates and proportions*, 3ª ed., Nova Iorque: John Wiley & Sons.
- Guo, S., e Zhao, H., (2015). Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective. *Applied Energy*, **158**, 390-402.
- Horni, A., Nagel, K., e Axhausen, K. W., (2016). *The multi-agent transport simulation MATSim*. Londres: Ubiquity Press.
- IEC., (2014). *Standard 62196: plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets*.
- IEEE., (2012). *C57.91: IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators*.
- International Energy Agency [IEA]., (2019). *Global EV outlook 2019* [online]. Paris, França. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: <https://www.iea.org/gevo2019/>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE]., (2010). *Censo Brasileiro 2010*. [Acessado em junho 2020]. [Online]. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>.
- Jardini, J. A., Tahan, C. M. V., Gouvea, M. R., Ahn, S. U., e Figueiredo, F. M., (2000) Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers. *IEEE Trans. Power Deliv.*, **15**(1), 375-380.
- Kasi, V. R., Thirugnanam, K., Kumar, P., e Majhi, S., (2014). Node identification for placing EVs and PAs in a distribution network. *IEEE PES General Meeting, Jul. 2014, National Harbor, MD, EUA*.
- Lam, A. Y. S., Leung, Y., e Chu, X., (2014). Electric vehicle charging station placement: formulation, complexity, and solutions. *IEEE Trans. on Smart Grid*, **5**(6), 2846-2856.
- Liu, Y., Xiang, Y., Tan, Y., Wang, B., Liu, J., e Yang, Z., (2018). Optimal allocation model for EV charging stations coordinating investor and user benefits. *IEEE Access*, **6**, 36039-36049.
- Martins, M. C. S., e Trindade, F. C. L., (2015). Time series studies for optimal allocation of electric charging stations in urban area. *Innovative Smart Grid Tech. Conference – Latin America (ISGT-LA), Out. 2015, Montevideu, Uruguai*.
- McKinsey & Company., (2017). *Electrifying insights: how automakers can drive electrified vehicles sales and profitability* [online]. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/electrifying-insights-how-automakers-can-drive-electrified-vehicle-sales-and-profitability>.
- Ministério da Infraestrutura., (2020). *Frota de veículos – março 2020*. [Online]. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: <https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/9484>.
- Neyestani, N., Damavandi, M. Y., Chicco, G., e Catalão, J. P. S., (2018). Effects of PEV traffic flows on the operation of parking lots and charging stations. *IEEE Trans. on Smart Grid*, **9**(2), 1521-1530.
- OpenStreetMap., (2020). *Dados de Mapas*. [Online]. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org>.
- Presidência da República – Casa Civil – Subchefia para Assuntos Jurídicos., (1943). *Decreto-lei 5452, de 1º de maio de 1943*. [Online]. [Acessado em junho 2020]. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Decreto-Lei/Del5452.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del5452.htm).
- SAE., (2009). *Standard J1772: electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler*.
- Treiber, M., e Kesting, A., (2013). *Traffic flow dynamics: data, models and simulation*. Springer.
- Wang, G., Xu, Z., Wen, F., e Wong, K. P., (2013). Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations. *IEEE Trans. on Power Delivery*, **28**(4), 2363-2372.
- Wei, W., Wu, L., Wang, J., e Mei, S., (2017). Expansion planning of urban electrified transportation networks: a mixed-integer convex programming approach. *IEEE Trans. on Transp. Electrification*, **3**(1), 210-224.