v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

SMART CHARGING DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS: UMA APLICAÇÃO PARA GESTÃO DE CARGAS

SMART CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES IN RESIDENTIAL BUILDINGS: AN APPLICATION FOR LOAD MANAGEMENT

SMART CHARGING DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EDIFICIOS RESIDENCIALES: UNA APLICACIÓN PARA LA GESTIÓN DE CARGAS

Alexandre Lima de Godoy[1], Valdecy Cardoso dos Santos[2]

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9471

PUBLICADO 11.2026

RESUMO

O crescente uso de veículos elétricos em edifícios residenciais pode aumentar a demanda elétrica durante o carregamento simultâneo. Este trabalho analisa o efeito de uma estratégia simplificada de *Smart Charging* sobre a demanda instantânea em um cenário residencial hipotético. A pesquisa, de caráter aplicado e abordagem predominantemente quantitativa, baseia-se em uma revisão bibliográfica e em uma análise matemática de dez pontos de carregamento de 7,2 kW cada. Foi estabelecido um limite de potência agregada de 36 kW, com distribuição equitativa da potência entre os veículos quando a demanda potencial ultrapassava esse limite. Os resultados mostraram que, com dois e quatro veículos conectados simultaneamente, não houve redução da demanda. Com seis veículos, a demanda diminuiu de 43,2 para 36,0 kW (16,67%), enquanto, com dez veículos, passou de 72,0 para 36,0 kW (50,00%). Conclui-se que, nas condições analisadas, essa estratégia permite limitar a demanda instantânea potencial dos carregadores quando o carregamento simultâneo supera o limite estabelecido, oferecendo uma abordagem inicial para o gerenciamento da potência de carregamento em edifícios residenciais.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos. *Smart Charging*. Gestão de cargas. Demanda elétrica. Edificações residenciais.

ABSTRACT

The growing adoption of electric vehicles in residential buildings may increase electricity demand during simultaneous charging. This study analyzes the effect of a simplified Smart Charging strategy on instantaneous demand in a hypothetical residential scenario. The applied research, with a predominantly quantitative approach, is based on a literature review and a mathematical analysis of ten charging points rated at 7.2 kW each. An aggregate power limit of 36 kW was established, with power distributed equally among vehicles whenever the potential demand exceeded this limit. The results showed that, with two and four vehicles connected simultaneously, there was no reduction in demand. With six vehicles, demand decreased from 43.2 to 36.0 kW (16.67%), while with ten vehicles, it decreased from 72.0 to 36.0 kW (50.00%). It is concluded that, under the conditions analyzed, this strategy can limit the potential instantaneous power demand of charging stations when simultaneous charging exceeds the established limit, providing an initial approach to charging power management in residential buildings.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA) e Auxiliar de Projetos Elétricos na Itaipu Transformadores, com atuação no desenvolvimento de projetos técnicos.

[2] Engenheiro Eletricista pela Universidade de Araraquara (UNIARA), Engenheiro Civil pelo Centro Universitário de Caratinga (UNEC), especialista em Engenharia Elétrica e Sistemas de Energia e docente do curso de Engenharia Elétrica da UNIARA, com atuação em geração de energia elétrica e automação industrial.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

KEYWORDS: *Electric vehicles. Smart Charging. Load management. Electrical demand. Residential buildings.*

RESUMEN

El creciente uso de vehículos eléctricos en edificios residenciales puede aumentar la demanda eléctrica durante la carga simultánea. Este trabajo analiza el efecto de una estrategia simplificada de Smart Charging sobre la demanda instantánea en un escenario residencial hipotético. La investigación, de carácter aplicado y enfoque predominantemente cuantitativo, se basa en una revisión bibliográfica y un análisis matemático de diez puntos de carga de 7,2 kW cada uno. Se estableció un límite de potencia agregada de 36 kW, distribuyendo equitativamente la potencia entre los vehículos cuando la demanda potencial superaba dicho límite. Los resultados mostraron que, con dos y cuatro vehículos conectados simultáneamente, no hubo reducción de la demanda. Con seis vehículos, la demanda disminuyó de 43,2 a 36,0 kW (16,67 %), mientras que con diez vehículos pasó de 72,0 a 36,0 kW (50,00 %). Se concluye que, en las condiciones analizadas, esta estrategia permite limitar la demanda instantánea potencial de los cargadores cuando la carga simultánea supera el límite establecido, ofreciendo un enfoque inicial para la gestión de la potencia de carga en edificios residenciales.

PALABRAS CLAVE: *Vehículos eléctricos. Smart Charging. Gestión de cargas. Demanda eléctrica. Edificios residenciales.*

INTRODUÇÃO

A crescente utilização de veículos elétricos tem ampliado a necessidade de infraestrutura de recarga em residências, condomínios e demais edificações. Embora a eletrificação do transporte possa contribuir para a redução da utilização de combustíveis fósseis, sua expansão também impõe desafios ao planejamento da demanda elétrica. Projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2026) indicam uma tendência de crescimento da demanda associada ao carregamento desses veículos, reforçando a importância de avaliar os impactos da recarga sobre as instalações elétricas.

Em edificações residenciais, a conexão simultânea de múltiplos veículos pode elevar a demanda dos carregadores e somar-se ao consumo de outras cargas, como iluminação, elevadores, bombas e equipamentos das unidades residenciais. Essa condição pode aumentar a solicitação da infraestrutura elétrica, dependendo da capacidade disponível e das características da instalação. Estudos apontam que o carregamento de veículos elétricos pode produzir impactos sobre a rede elétrica e que estratégias de gerenciamento da carga podem contribuir para controlar esses efeitos (DEB; PIHLATIE; AL-SAADI, 2022; BHUNDAR; GOLAB; KESHAV, 2023). Nesse contexto, a integração de novos pontos de recarga deve considerar os requisitos aplicáveis às instalações elétricas de baixa tensão e à infraestrutura específica para

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

carregamento de veículos elétricos, estabelecidos, respectivamente, pela ABNT NBR 5410 e pela ABNT NBR 17019.

Uma das alternativas para gerenciar a demanda decorrente do carregamento simultâneo é o *Smart Charging*, ou carregamento inteligente. Essa estratégia permite controlar a potência destinada aos carregadores conforme critérios de gerenciamento e limites operacionais, por meio da distribuição da potência disponível ou da redução da potência individual em situações de maior demanda. Estudos sobre o tema destacam o potencial do controle coordenado do carregamento para proporcionar flexibilidade à demanda elétrica e favorecer o aproveitamento da infraestrutura disponível (DEB; PIHLATIE; AL-SAADI, 2022; WU; YÜCEL; ZHOU, 2022; BHUNDAR; GOLAB; KESHAV, 2023).

Apesar das possibilidades oferecidas por essas estratégias, é relevante compreender como o gerenciamento de potência modifica a demanda instantânea associada ao carregamento simultâneo em edificações residenciais. Essa análise permite comparar o comportamento da demanda nos cenários convencional e gerenciado, identificando em quais condições a limitação da potência agregada produz efeitos sobre a demanda potencial dos carregadores.

Diante desse contexto, estabelece-se o seguinte problema de pesquisa: “Em que medida a aplicação de uma estratégia de *Smart Charging* pode limitar a demanda instantânea associada ao carregamento simultâneo de veículos elétricos em uma edificação residencial hipotética?” O objetivo geral deste trabalho é analisar o efeito da aplicação de uma estratégia de *Smart Charging* sobre a demanda elétrica decorrente do carregamento simultâneo de veículos elétricos em uma edificação residencial hipotética. Para tanto, são apresentados os fundamentos do carregamento inteligente e estabelecidos cenários de carregamento convencional e gerenciado, cujas demandas potenciais são comparadas por meio de uma análise quantitativa.

A pesquisa combina revisão bibliográfica de artigos científicos, normas técnicas e documentos institucionais com uma análise matemática de um cenário hipotético. A comparação considera diferentes quantidades de veículos conectados simultaneamente e avalia o efeito da aplicação de um limite agregado de potência sobre a demanda potencial dos carregadores.

Dessa forma, o estudo busca contribuir para a compreensão do potencial do *Smart Charging* como estratégia de gerenciamento da demanda instantânea associada à recarga de veículos elétricos, delimitando os efeitos observados às premissas e aos parâmetros do cenário analisado.

Além desta seção introdutória, o referencial teórico é apresentado na seção 1. A metodologia é definida na seção 2, os resultados e discussão são apresentados na seção 3 e as considerações finais na seção 4, seguida pelas referências.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta os fundamentos relacionados à infraestrutura de recarga e à demanda elétrica em edifícios residenciais, às estratégias de *Smart Charging* e às possibilidades de gerenciamento da potência destinada aos veículos elétricos.

1.1. Infraestrutura de recarga e demanda elétrica em edifícios residenciais

A expansão da mobilidade elétrica introduz novas demandas de energia associadas à recarga dos veículos, tornando necessário considerar a infraestrutura elétrica requerida para atender aos pontos de carregamento. No contexto brasileiro, esse processo demanda atenção à capacidade das instalações existentes e à integração dos carregadores às demais cargas das edificações (ABNT, 2004; ABNT, 2022).

Em edifícios residenciais, a conexão simultânea de múltiplos veículos pode elevar a demanda instantânea, uma vez que as potências dos carregadores se somam durante os períodos de operação concomitante. A magnitude dessa demanda depende da quantidade de veículos conectados, da potência nominal dos equipamentos e das condições de utilização. Por isso, a avaliação da recarga deve considerar sua contribuição para a demanda agregada da instalação, sem desconsiderar as demais cargas do edifício (DEB; PIHLATIE; AL-SAADI, 2022; BHUNDAR; GOLAB; KESHAV, 2023).

O aumento da demanda, entretanto, não implica necessariamente sobrecarga da instalação. Essa condição depende da relação entre a solicitação elétrica e a capacidade dos componentes envolvidos, o que exige avaliação técnica específica. A ABNT NBR 5410 estabelece requisitos gerais para instalações elétricas de baixa tensão, enquanto a ABNT NBR 17019 trata dos requisitos aplicáveis às instalações destinadas à alimentação de veículos elétricos. Essas normas constituem referências para a avaliação da infraestrutura, mas a análise matemática da demanda dos carregadores, isoladamente, não substitui o dimensionamento elétrico da edificação (ABNT, 2004; ABNT, 2022).

1.2. *Smart Charging* e estratégias de gerenciamento de carga

O *Smart Charging*, ou carregamento inteligente, consiste no gerenciamento coordenado da recarga dos veículos elétricos, permitindo ajustar a potência disponibilizada ou o momento em que o carregamento ocorre. Essa abordagem explora a flexibilidade temporal e operacional da recarga para adequá-la às condições de demanda e à disponibilidade de recursos elétricos. Revisões da literatura apontam diferentes estratégias de gerenciamento, cujos objetivos e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

métodos variam conforme as condições de operação e os critérios adotados (DEB; PIHLATIE; AL-SAADI, 2022).

Entre as alternativas existentes, algumas estratégias deslocam sessões de carregamento para períodos mais adequados, enquanto outras controlam a potência destinada aos veículos. Wu, Yücel e Zhou (2022) discutem o gerenciamento do momento da recarga, enquanto Bhundar, Golab e Keshav (2023) analisam como o controle do carregamento pode proporcionar flexibilidade à demanda de edifícios. Abordagens de otimização também podem tratar o problema de alocação da potência entre veículos, conforme discutido por Chen, He e Zhou (2024). Essas possibilidades demonstram que o gerenciamento pode assumir diferentes níveis de complexidade, conforme o objetivo e as restrições do sistema.

Entre as estratégias de controle de potência, destaca-se o compartilhamento da capacidade disponível entre os veículos conectados. Essa abordagem pode estabelecer um limite agregado para os carregadores e distribuir a potência disponível quando a demanda potencial ultrapassa esse valor. A distribuição pode ocorrer de forma igualitária ou considerar critérios de priorização, como as necessidades individuais de carregamento e o tempo de permanência dos veículos. A escolha da estratégia depende dos objetivos operacionais e das informações disponíveis para o gerenciamento (SCHMIDT, 2021; CHEN; HE; ZHOU, 2024).

1.3. Aplicação do *Smart Charging* em edifícios residenciais

Em edifícios residenciais, o gerenciamento da recarga pode contribuir para limitar a demanda instantânea associada à operação simultânea dos carregadores e explorar a flexibilidade dessa carga. Bhundar, Golab e Keshav (2023) investigaram o controle da recarga de veículos elétricos para proporcionar flexibilidade à carga de edifícios, considerando uma abordagem de controle preditivo. O estudo evidencia a possibilidade de coordenar o carregamento dos veículos com as condições de consumo da edificação, embora empregue uma estratégia mais abrangente do que o modelo simplificado analisado neste trabalho.

É importante distinguir a redução da potência instantânea da redução do consumo total de energia. A limitação da potência disponibilizada aos carregadores pode reduzir a demanda simultânea, mas também pode prolongar o tempo necessário para a recarga, dependendo da energia requerida pelos veículos e das condições de carregamento. Assim, a avaliação de uma estratégia de Smart Charging deve considerar o indicador efetivamente investigado, sem atribuir à redução de demanda uma redução equivalente no consumo energético (DEB; PIHLATIE; AL-SAADI, 2022; BHUNDAR; GOLAB; KESHAV, 2023).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Nesse contexto, a análise da relação entre a quantidade de veículos conectados e um limite fixo de potência agregada permite investigar as condições em que o gerenciamento modifica a demanda potencial instantânea dos carregadores. O presente estudo aborda esse aspecto por meio da comparação entre cenários de carregamento convencional e gerenciado em uma edificação residencial hipotética, considerando o compartilhamento igualitário da potência disponível. Essa delimitação permite avaliar o efeito da simultaneidade sobre a demanda dos carregadores, sem pressupor o dimensionamento de uma instalação real ou a implementação de um sistema avançado de controle.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada é apresentada nas subseções a seguir, contemplando a caracterização da pesquisa, a definição das premissas do cenário hipotético, a formulação matemática da estratégia de *Smart Charging*, a construção dos cenários de carregamento e os procedimentos empregados no cálculo e na análise comparativa dos resultados obtidos.

2.1. Caracterização do estudo e metodologia adotada

O presente estudo se caracteriza como aplicado, de abordagem predominantemente quantitativa, desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica e análise matemática de um cenário hipotético de carregamento de veículos elétricos em uma edificação residencial. A pesquisa bibliográfica fundamentou a discussão sobre veículos elétricos, infraestrutura de recarga, demanda elétrica decorrente do carregamento simultâneo e estratégias de *Smart Charging*. Com base nessa fundamentação, formulou-se um modelo simplificado para comparar a demanda instantânea potencial dos carregadores em uma condição convencional e em uma condição submetida ao gerenciamento de potência.

Quanto aos procedimentos metodológicos, o estudo consiste em uma análise determinística de cenários, cujos resultados são calculados a partir de parâmetros previamente estabelecidos. Não foram realizadas medições em campo, experimentos em uma instalação elétrica real ou validação do modelo com dados operacionais e, portanto, os resultados estão condicionados às premissas adotadas e destinam-se à análise do comportamento matemático da estratégia proposta, não à caracterização da demanda efetiva de uma edificação específica.

O desenvolvimento da pesquisa foi organizado em cinco etapas. Na primeira, realizou-se o levantamento bibliográfico sobre veículos elétricos, infraestrutura de recarga, demanda elétrica e estratégias de gerenciamento do carregamento. Na segunda, foram definidos os parâmetros do cenário hipotético, considerando dez pontos de carregamento, cada um com

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

potência nominal máxima de 7,2 kW. Na terceira, calculou-se a demanda potencial do carregamento convencional para diferentes quantidades de veículos conectados simultaneamente. Na quarta, aplicou-se a estratégia simplificada de *Smart Charging*, baseada na limitação da potência agregada destinada aos carregadores e no compartilhamento igualitário da potência disponível quando necessário. Na quinta, compararam-se os resultados dos dois cenários, utilizando a diferença absoluta de potência e a redução percentual da demanda instantânea como indicadores.

A análise considerou cenários com dois, quatro, seis, oito e dez veículos conectados simultaneamente. O modelo foi aplicado exclusivamente à potência demandada pelos carregadores, sem incorporar as demais cargas da edificação e tampouco se calcularam o tempo necessário para completar a recarga nem a energia total consumida durante um ciclo de carregamento.

2.2. Estratégia de gerenciamento de potência

A estratégia de gerenciamento adotada fundamenta-se no conceito de *Smart Charging*, entendido neste estudo como o controle da potência destinada à recarga dos veículos elétricos para limitar a demanda agregada dos carregadores. A literatura apresenta diferentes possibilidades de gerenciamento, incluindo mecanismos de restrição de potência e critérios de priorização dos veículos (SCHMIDT, 2021; CHEN; HE; ZHOU, 2024).

Schmidt (2021), em estudo de simulação sobre o impacto da demanda associada ao carregamento de veículos elétricos, avaliou diferentes algoritmos de *Smart Charging*, incluindo a divisão igualitária da potência e estratégias baseadas em ordem de chegada, estado de carga, autonomia e tempo de permanência. Chen, He e Zhou (2024), por sua vez, analisam uma política denominada *Equal Charge Policy*, na qual a potência disponível é compartilhada entre os veículos conectados, respeitando os limites individuais de carregamento.

Com base nesses princípios, este estudo adota uma estratégia simplificada de compartilhamento igualitário de potência, considerando um limite agregado de 36 kW para o conjunto dos carregadores. Esse valor corresponde a 50% da demanda potencial máxima de 72 kW, calculada para dez carregadores operando simultaneamente à potência nominal de 7,2 kW cada. O limite foi estabelecido como parâmetro ilustrativo para permitir a comparação entre cenários abaixo e acima da potência agregada definida. Não deriva de medições em campo, de um estudo de demanda de uma edificação específica ou de um dimensionamento da infraestrutura elétrica; portanto, não representa uma capacidade recomendada para instalações residenciais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quando a demanda potencial dos veículos conectados é inferior ou igual a 36 kW, cada carregador pode operar à sua potência nominal. Quando a demanda potencial supera esse limite, a potência agregada disponível é distribuída igualmente entre os veículos conectados, respeitando-se a potência máxima individual de 7,2 kW.

A estratégia não incorpora critérios de priorização baseados no estado de carga das baterias, na autonomia, no tempo de permanência ou no horário de saída dos veículos. Tampouco considera a variação temporal da demanda da edificação ou a coordenação com outros sistemas energéticos. Logo, o modelo permite avaliar isoladamente o efeito da limitação da potência agregada sobre a demanda instantânea potencial dos carregadores.

2.3. Premissas e parâmetros do sistema

O cenário hipotético foi definido a partir das seguintes premissas:

a) A edificação dispõe de dez pontos de carregamento;
b) Cada carregador apresenta potência nominal máxima de 7,2 kW;
c) Os carregadores são considerados disponíveis para operação simultânea;
d) No cenário convencional, cada carregador pode operar à potência nominal, independentemente da demanda dos demais carregadores;
e) No cenário com *Smart Charging*, a potência agregada destinada aos carregadores é limitada a 36 kW;
f) Quando a demanda potencial dos veículos conectados é inferior ou igual ao limite agregado, não há redistribuição de potência e cada carregador pode operar à potência nominal;
g) Quando a demanda potencial supera o limite agregado, a potência disponível é distribuída igualmente entre os veículos conectados, respeitando-se a potência máxima individual de 7,2 kW;
h) A análise contempla exclusivamente a demanda instantânea de potência dos carregadores, sem calcular a duração das sessões de recarga ou a energia total requerida pelos veículos ao longo de um ciclo completo;
i) As demais cargas da edificação, como iluminação, elevadores, bombas e equipamentos das unidades residenciais, não são incorporadas ao modelo;
j) Não são considerados o estado de carga das baterias, a autonomia dos veículos, os horários de chegada e saída, as tarifas de energia, a geração fotovoltaica, os sistemas de armazenamento ou as prioridades individuais dos usuários;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

k) O cenário é hipotético e não foi submetido à validação experimental ou à comparação com dados reais de operação.

2.4. Cenário hipotético e formulação matemática

Para o desenvolvimento da análise, considerou-se um cenário hipotético de uma edificação residencial equipada com dez pontos de carregamento para veículos elétricos, cada um com potência nominal máxima de 7,2 kW. Analisaram-se situações com dois, quatro, seis, oito e dez veículos conectados simultaneamente.

No cenário convencional, considera-se que cada carregador pode operar em sua potência nominal, independentemente da demanda dos demais carregadores. A demanda potencial agregada é calculada pela Equação (1).

$$P_{conv} = n \times P_c \quad \text{(Eq.1)}$$

em que:

Pconv – demanda potencial total no cenário convencional (kW);
n – número de veículos conectados simultaneamente;
Pc – potência nominal de cada carregador (kW).

Para dez veículos conectados simultaneamente (n=10), obtém-se:

$$P_{conv} = 10 \times 7{,}2 = 72{,}0 \text{ kW}$$

Assim, 72,0 kW representa a demanda potencial máxima dos dez carregadores operando simultaneamente em suas respectivas potências nominais, sem gerenciamento da carga.

Para a aplicação da estratégia de *Smart Charging*, estabeleceu-se um limite máximo de 36,0 kW para a potência agregada destinada aos carregadores. Esse valor corresponde a 50% da demanda potencial máxima de 72,0 kW e foi adotado como parâmetro ilustrativo para permitir a análise de situações em que a demanda potencial permanece abaixo do limite ou o ultrapassa.

No cenário gerenciado, a potência disponibilizada individualmente a cada veículo é determinada pela Equação (2), considerando o limite agregado e a potência nominal máxima do carregador.

$$P_i = \min (P_c;\ P_{lim}/\ n) \quad \text{(Eq.2)}$$

em que:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Pi – potência disponibilizada individualmente a cada veículo (kW);
Pc – potência nominal de cada carregador (kW);
Plim – limite de potência agregada destinado aos carregadores (kW);
n – número de veículos conectados simultaneamente.

A demanda agregada resultante da aplicação da estratégia de *Smart Charging* é calculada pela Equação (3), que considera simultaneamente a potência máxima individual dos carregadores e o limite agregado estabelecido para o sistema.

$$Psc = \min (n \times Pc; Plim) \quad \text{(Eq.3)}$$

em que:

Psc – demanda agregada dos carregadores no cenário com gerenciamento de potência (kW).

Para dois veículos conectados simultaneamente (n=2), a demanda potencial é de 14,4 kW. Como esse valor é inferior ao limite agregado de 36,0 kW, não há necessidade de redistribuição da potência, e os carregadores podem operar em sua potência nominal:

$$Psc = \min (2 \times 7{,}2; 36{,}0) = 14{,}4 \text{ kW}$$

Para seis veículos conectados simultaneamente (n=6), a demanda potencial convencional é de 43,2 kW, ultrapassando o limite estabelecido. Nesse caso, a potência agregada é restringida a 36,0 kW e distribuída igualmente entre os seis veículos, resultando em 6,0 kW por carregador:

$$Psc = \min (6 \times 7{,}2; 36{,}0) = \min (43{,}2; 36{,}0) = 36{,}0 \text{ kW}$$

$$Pi = \min (7{,}2; 36{,}0/6) = \min (7{,}2; 6{,}0) = 6{,}0 \text{ kW}$$

A diferença absoluta entre a demanda potencial convencional e a demanda no cenário gerenciado é calculada pela Equação (4).

$$\Delta P = Pconv - Psc \quad \text{(Eq.4)}$$

em que:

ΔP – redução absoluta da demanda instantânea de potência dos carregadores (kW).

A redução percentual da demanda instantânea potencial é calculada pela Equação (5).

$$RP = (\Delta P / Pconv) \times 100 \quad \text{(Eq.5)}$$

em que:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

RP – redução percentual da demanda instantânea potencial dos carregadores (%).

Para demonstrar a aplicação das Equações 4 e 5, considera-se o cenário com dez veículos conectados simultaneamente (n=10). A demanda potencial no cenário convencional (*Pconv*) é de 72,0 kW, enquanto a potência agregada com *Smart Charging (Psc*) é limitada a 36,0 kW. A redução absoluta (ΔP) é calculada pela Equação 4.

$$\Delta P = 72,0 – 36,0 = 36,0 \text{ kW}$$

Em seguida, aplica-se a Equação 5 para determinar a redução percentual em relação à demanda potencial do cenário convencional:

$$RP = (36,0 / 72,0) \times 100 = 50,00\%$$

Portanto, para dez veículos conectados, o modelo resulta em uma redução de 36,0 kW, equivalente a 50,00% da demanda potencial dos carregadores. A potência disponível é distribuída igualmente entre os dez veículos, resultando em 3,6 kW por veículo.

Os indicadores de redução absoluta (ΔP) e percentual (RP) são utilizados exclusivamente para comparar a demanda potencial dos carregadores nas condições convencional e gerenciada. Dessa forma, a redução de 50,00% na potência instantânea observada no cenário com dez veículos não representa, necessariamente, uma redução equivalente no consumo total de energia elétrica necessário para completar as recargas. A limitação da potência disponibilizada pode prolongar o tempo de carregamento, aspecto não quantificado neste estudo.

O modelo considera exclusivamente a potência destinada aos carregadores, não incorporando aos cálculos as demais cargas da edificação, como iluminação, elevadores, bombas e equipamentos das unidades residenciais. Tampouco são contempladas a duração das sessões de recarga, a energia total consumida por ciclo, as características específicas das baterias ou a validação experimental com dados reais de operação. Os resultados, consequentemente, devem ser interpretados como uma análise matemática de um cenário hipotético, restrita às premissas e aos parâmetros estabelecidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da comparação entre o carregamento convencional e a aplicação do *Smart Charging* com distribuição igualitária de potência. Foram considerados cenários com 2, 4, 6, 8 e 10 veículos conectados simultaneamente, cada um associado a um carregador com potência nominal de 7,2 kW.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.1. Análise do carregamento sem gerenciamento de potência

No cenário convencional, não há restrição sobre a potência agregada dos carregadores, de modo que cada equipamento pode operar em sua potência nominal de 7,2 kW. Aplicando-se a Equação 1, apresentada na metodologia, obtêm-se os resultados da Tabela 1.

Tabela 1. Demanda potencial no cenário convencional

Veículos conectados (n)	Potência nominal por carregador (*Pc*) (kW)	Demanda total (*Pconv*) (kW)
2	7,2	14,4
4	7,2	28,8
6	7,2	43,2
8	7,2	57,6
10	7,2	72,0

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Os resultados demonstram uma relação diretamente proporcional entre o número de veículos conectados e a demanda agregada, que varia de 14,4 kW, para dois veículos, a 72,0 kW, para dez veículos. Esse comportamento demonstra que o aumento da simultaneidade de carregamento eleva proporcionalmente a potência demandada pelo conjunto de equipamentos. Ressalta-se que os valores apresentados representam exclusivamente a demanda potencial dos carregadores, não abrangendo as demais cargas elétricas da edificação.

3.2. Aplicação do Smart Charging e gerenciamento de potência

No cenário com *Smart Charging*, adotou-se o limite agregado de 36 kW definido na metodologia. Enquanto a demanda potencial permanece abaixo desse limite, os carregadores podem operar em sua potência nominal. Quando a demanda potencial supera o valor estabelecido, a potência total é limitada e distribuída igualmente entre os veículos conectados, respeitando-se a potência máxima individual de 7,2 kW. Os resultados dessa aplicação são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação entre os cenários convencional e com *Smart Charging*

Veículos conectados (n)	Demanda total (*Pconv*) (kW)	Potência com *Smart Charging* (*Psc*) (kW)	Potência individual do veículo (*Pi*) (kW)	Redução absoluta (ΔP) (kW)	Redução percentual (RP) (%)
2	14,4	14,4	7,2	0,0	0,00
4	28,8	28,8	7,2	0,0	0,00
6	43,2	36,0	6,0	7,2	16,67
8	57,6	36,0	4,5	21,6	37,50
10	72,0	36,0	3,6	36,0	50,00

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

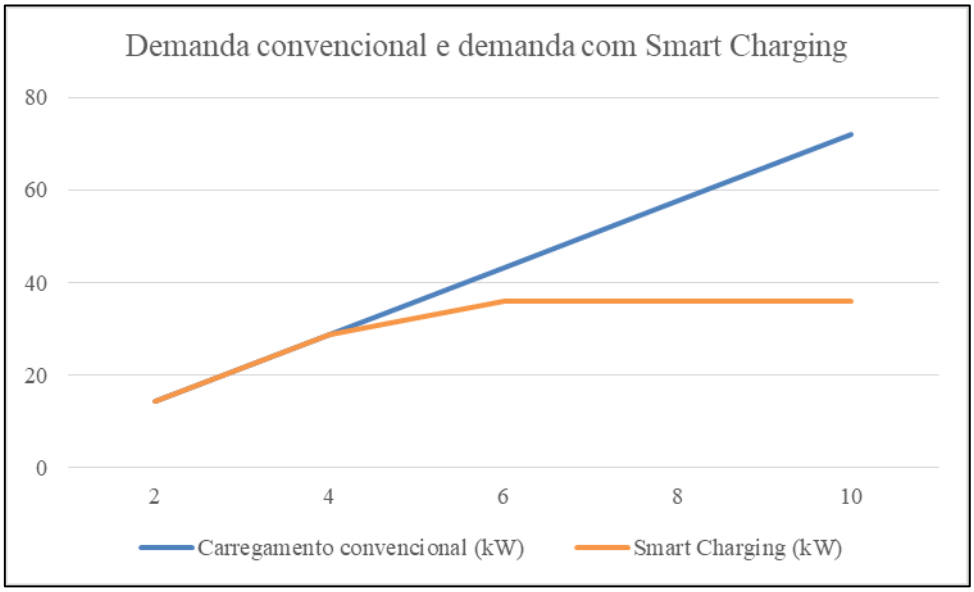
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os resultados demonstram que, para dois e quatro veículos conectados, a demanda permanece abaixo desse limite, permitindo que os carregadores operem em sua potência nominal. A partir de seis veículos, a demanda potencial ultrapassa o valor estabelecido e a potência disponível passa a ser compartilhada igualmente entre os equipamentos.

A magnitude do efeito torna-se mais expressiva conforme aumenta o número de veículos conectados. No cenário com seis veículos, a demanda é limitada de 43,2 kW para 36,0 kW, representando redução de 16,67%. Com oito veículos, a redução alcança 37,50%, enquanto, para dez veículos, a demanda potencial de 72,0 kW é limitada a 36,0 kW, correspondente a uma redução de 50,00%. Neste último cenário, cada veículo recebe potência de 3,6 kW.

A Figura 1 ilustra esse comportamento: enquanto as curvas dos dois cenários coincidem até quatro veículos, a demanda convencional cresce proporcionalmente ao número de conexões, ao passo que a demanda gerenciada permanece limitada a 36,0 kW a partir do momento em que esse patamar é atingido. Portanto, o efeito da estratégia está diretamente associado à simultaneidade dos carregamentos e à necessidade de compartilhamento da potência disponível.

Figura 1. Demanda convencional e demanda com *Smart Charging* em função do número de veículos conectados



Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Esse resultado converge com a discussão de Bhundar, Golab e Keshav (2023) sobre o potencial do controle de carregamento de veículos elétricos para proporcionar flexibilidade à demanda de edificações. Entretanto, as abordagens apresentam diferenças metodológicas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

relevantes. Os autores utilizam um algoritmo de controle preditivo que considera informações sobre o consumo do edifício, o carregamento dos veículos e o armazenamento estacionário, enquanto o presente estudo adota uma formulação determinística simplificada, baseada em um limite agregado fixo e na distribuição igualitária da potência. Assim, a convergência entre os trabalhos está no princípio de gerenciamento da potência de carregamento, e não na equivalência dos métodos ou dos resultados.

É importante destacar que a redução identificada corresponde à demanda instantânea de potência dos carregadores, não representando necessariamente uma diminuição do consumo total de energia elétrica. A disponibilização de potência inferior à nominal pode prolongar o tempo necessário para transferir determinada quantidade de energia às baterias. No entanto, dado que essas variáveis não integram o modelo, não é possível quantificar esse efeito.

Por fim, o limite de 36,0 kW deve ser interpretado exclusivamente como uma premissa ilustrativa do cenário analisado, e não como parâmetro recomendado para edificações residenciais. Como as demais cargas do edifício e as características da infraestrutura elétrica não foram incorporadas, os resultados não permitem determinar a existência de sobrecarga ou estabelecer a capacidade adequada de uma instalação real.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou a aplicação de uma estratégia simplificada de *Smart Charging* para o gerenciamento da demanda instantânea de potência em edifícios residenciais, considerando dez pontos de recarga de veículos elétricos, cada um com potência nominal de 7,2 kW. A partir de um cenário hipotético, compararam-se o carregamento convencional e uma estratégia de limitação da potência agregada em 36,0 kW, com distribuição igualitária da potência disponível entre os veículos conectados.

Os resultados demonstraram que o efeito do gerenciamento depende do número de veículos carregando simultaneamente: para até quatro veículos, a demanda permaneceu abaixo do limite estabelecido, não sendo necessária a redução da potência individual; a partir de seis veículos, a estratégia passou a limitar a demanda agregada, alcançando uma redução de 50,00% no cenário com dez veículos, de 72,0 kW para 36,0 kW. Esses resultados evidenciam o potencial do compartilhamento de potência como mecanismo de controle da demanda instantânea dos carregadores.

Do ponto de vista acadêmico, o trabalho contribui ao apresentar uma formulação matemática simplificada que permite comparar diferentes níveis de simultaneidade e identificar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

quando o gerenciamento da potência se torna necessário. Sob a perspectiva gerencial, o modelo oferece uma referência quantitativa preliminar para a análise de cenários de recarga em edificações residenciais. Ressalta-se, contudo, que a redução observada se refere à potência instantânea disponibilizada aos carregadores, não implicando redução equivalente no consumo total de energia dos veículos: a menor potência de carregamento pode, inclusive, prolongar o tempo necessário para a recarga.

Os resultados devem ser interpretados considerando as limitações do estudo. O cenário é hipotético, e o limite de 36,0 kW foi adotado exclusivamente como premissa ilustrativa, sem decorrer de medições ou dimensionamento de uma instalação real. Além disso, a análise contempla apenas a demanda dos carregadores, desconsiderando as demais cargas da edificação, a duração das sessões, a energia requerida pelos veículos e variáveis como estado de carga das baterias, horários de chegada e saída e critérios de priorização. A ausência de validação experimental também restringe a generalização dos resultados e sua aplicação direta em instalações reais.

Como continuidade, recomenda-se aplicar a formulação em edificações residenciais reais, incorporando dados medidos de consumo, características da infraestrutura elétrica e perfis de utilização dos carregadores. Estudos futuros também poderão avaliar limites dinâmicos de potência, critérios de priorização dos usuários e a integração com geração fotovoltaica, sistemas de armazenamento e tarifas de energia. Essas ampliações permitirão investigar não apenas o controle da demanda instantânea, mas também os efeitos operacionais e econômicos das estratégias de *Smart Charging*.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17019: instalações elétricas de baixa tensão: requisitos para instalações em locais especiais: alimentação de veículos elétricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BHUNDAR, H. S.; GOLAB, L.; KESHAV, S. Using EV charging control to provide building load flexibility. Energy Informatics, v. 6, art. 5, 2023. DOI: 10.1186/s42162-023-00261-8.

CHEN, L.; HE, L.; ZHOU, Y. An exponential cone programming approach for managing electric vehicle charging. Operations Research, v. 72, n. 5, p. 2215-2240, 2024. DOI: 10.1287/opre.2023.2460.

DEB, S.; PIHLATIE, M.; AL-SAADI, M. Smart charging: a comprehensive review. IEEE Access, v. 10, p. 134690-134703, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3227630.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Demanda de energia dos veículos leves: 2026-2035. Rio de Janeiro: EPE, 2026.

SCHMIDT, J. G. Estudo e simulação de impacto de demanda com avaliação de algoritmos de Smart Charging para veículos elétricos em estações semirrápidas. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

WU, O. Q.; YÜCEL, Ş.; ZHOU, Y. Smart charging of electric vehicles: an innovative business model for utility firms. Manufacturing & Service Operations Management, v. 24, n. 5, p. 2481-2499, 2022. DOI: 10.1287/msom.2021.1019.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.