

ANÁLISE DO IMPACTO DA EXPANSÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NA CURVA DE CARGA LÍQUIDA

Palavras-Chave: VEÍCULOS ELÉTRICOS, CARGA LÍQUIDA, GERAÇÃO RENOVÁVEL

Autores(as):

ANDREY DE PAULA OLIVEIRA BARBOSA, FECFAU – UNICAMP

Prof. Dr. VINÍCIUS DE CARVALHO NEIVA PINHEIRO (orientador), FECFAU - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A crescente preocupação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem impulsionado a busca por alternativas de transporte de baixo impacto ambiental. Os veículos elétricos (VE's) surgem como uma solução estratégica para descarbonizar o setor de transportes, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. No Brasil, o avanço da mobilidade elétrica ocorre paralelamente à expansão das fontes renováveis, principalmente solar e eólica, que já representam uma parcela significativa da matriz elétrica nacional (EPE, 2025).

Entretanto, a recarga massiva desses veículos, considerada neste estudo até o horizonte de 2034, poderá impactar diretamente o perfil de demanda do Sistema Interligado Nacional (SIN). A chamada curva líquida de carga, diferença entre a demanda total e a geração renovável, tende a apresentar rampas mais acentuadas no início da noite, período em que a geração solar declina e o consumo residencial aumenta. A inclusão da carga adicional dos VE's nesse intervalo pode pressionar o despacho de usinas flexíveis e demandar maior capacidade de resposta do sistema.

Esta pesquisa busca analisar o impacto da expansão da frota de VE's no Brasil até 2034 sobre a curva de carga líquida, considerando diferentes cenários de concentração da recarga no horário de ponta (18h–21h), a relevância da geração renovável e a necessidade de estratégias para mitigação desses impactos.

METODOLOGIA:

A metodologia desta pesquisa foi estruturada em três etapas, contemplando a projeção da frota elétrica, a estimativa do consumo energético associado à recarga dos veículos e a construção de cenários para avaliar os efeitos dessa nova carga sobre a curva líquida do SIN.

Primeiramente, foi definido o horizonte de análise para 2034, ano escolhido como referência para avaliar o comportamento do sistema diante da eletrificação da frota veicular. Utilizaram-se dados do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034), publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que prevê cerca de 48 milhões de veículos leves no país nesse período. De acordo com o estudo,

espera-se que 4 milhões desses veículos serão elétricos, o que representaria aproximadamente 8,3% da frota total prevista para o ano de referência.

Na segunda etapa, foi estimado o consumo energético diário dos VE's. Adotou-se o valor médio de 20,6 kWh a cada 100 km percorridos, conforme Faller e Junior (2019), e uma quilometragem média diária de 40 km por veículo. Dessa forma, obteve-se um consumo aproximado de 8,24 kWh/dia por unidade, totalizando cerca de 32,96 GWh diários para a frota projetada. A conversão desse valor em potência média considerou um tempo típico de recarga de 2 a 3 horas, compatível com carregadores semi-rápidos residenciais, amplamente utilizados para recarga doméstica (COSTA, 2014).

Em seguida, foram construídos três cenários de comportamento de recarga, variando a fração da energia total consumida no horário de ponta (18h–21h). O Cenário A considerou que 100% da energia seria carregada nesse período, enquanto os Cenários B e C adotaram 75% e 50%, respectivamente. Essa abordagem buscou avaliar diferentes níveis de sobreposição da nova carga aos horários críticos do sistema.

Por fim, utilizaram-se séries horárias do Operador Nacional do Sistema (ONS) referentes a 2024, contemplando a carga total e a geração combinada de fontes solar e eólica no país. A curva líquida foi obtida subtraindo-se a geração renovável da demanda total para cada hora do dia. A Figura 1 apresenta uma ilustração desse fenômeno, também conhecido como *duck curve*, destacando o desafio operacional enfrentado pelos operadores do sistema quando a produção renovável variável cai ao entardecer, coincidindo com o aumento do consumo e, futuramente, com a recarga veicular concentrada."

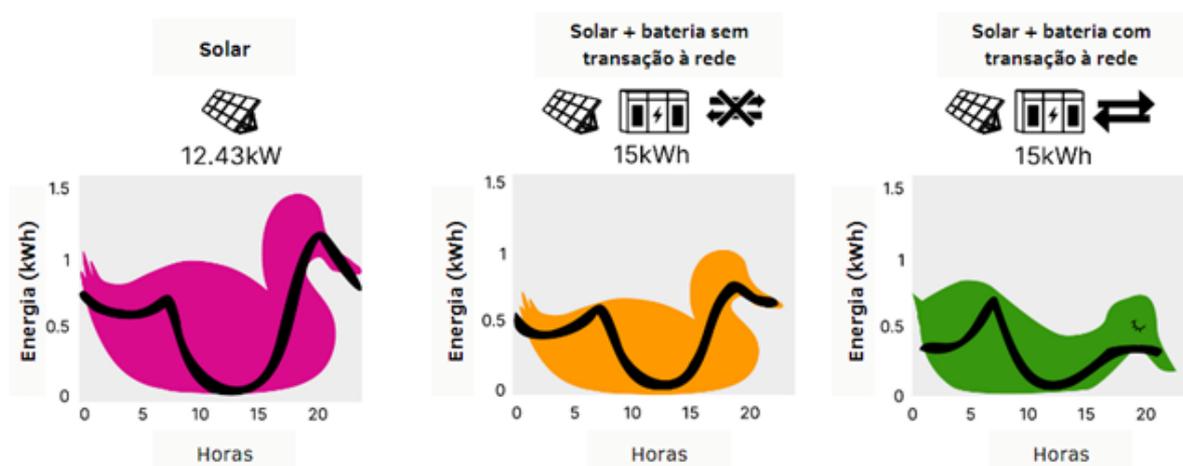


Figura 1: Comportamento da curva de carga líquida. Fonte: IEEFA, 2023.

Em seguida, adicionou-se a carga projetada para os três cenários, simulando o comportamento da curva líquida em 2034. Essa abordagem permitiu avaliar a intensificação da rampa vespertina e a necessidade potencial de recursos adicionais de flexibilidade para atender à nova demanda.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com base nas séries horárias do Operador Nacional do Sistema (ONS), foi construída a curva média horária anual de 2024 do Sistema Interligado Nacional (SIN). Primeiramente, consolidou-se a

carga total do SIN por hora e, em seguida, calculou-se a média para cada horário do dia (0–23h) ao longo do ano. O perfil obtido reflete o comportamento típico do sistema brasileiro, com patamares mais baixos durante a madrugada, elevação gradual ao longo do dia e pico vespertino-noturno, atingindo o valor máximo no início da noite, quando ocorre maior consumo residencial e comercial (ONS, 2024).

Foram também analisadas as séries históricas de geração renovável variável (solar fotovoltaica e eólica) disponibilizadas pelo ONS. A geração solar apresentou maior contribuição entre o final da manhã e o início da tarde, com pico próximo ao meio-dia, enquanto a eólica manteve comportamento relativamente constante, com pequenas reduções nas horas centrais do dia. A curva líquida base foi obtida a partir da diferença entre a demanda total do SIN e a soma da geração renovável para cada hora do dia. O resultado evidencia um vale diurno, quando a injeção solar reduz a necessidade de outras fontes, seguido de rampa acentuada no fim da tarde, quando a produção fotovoltaica declina e a demanda cresce rapidamente.

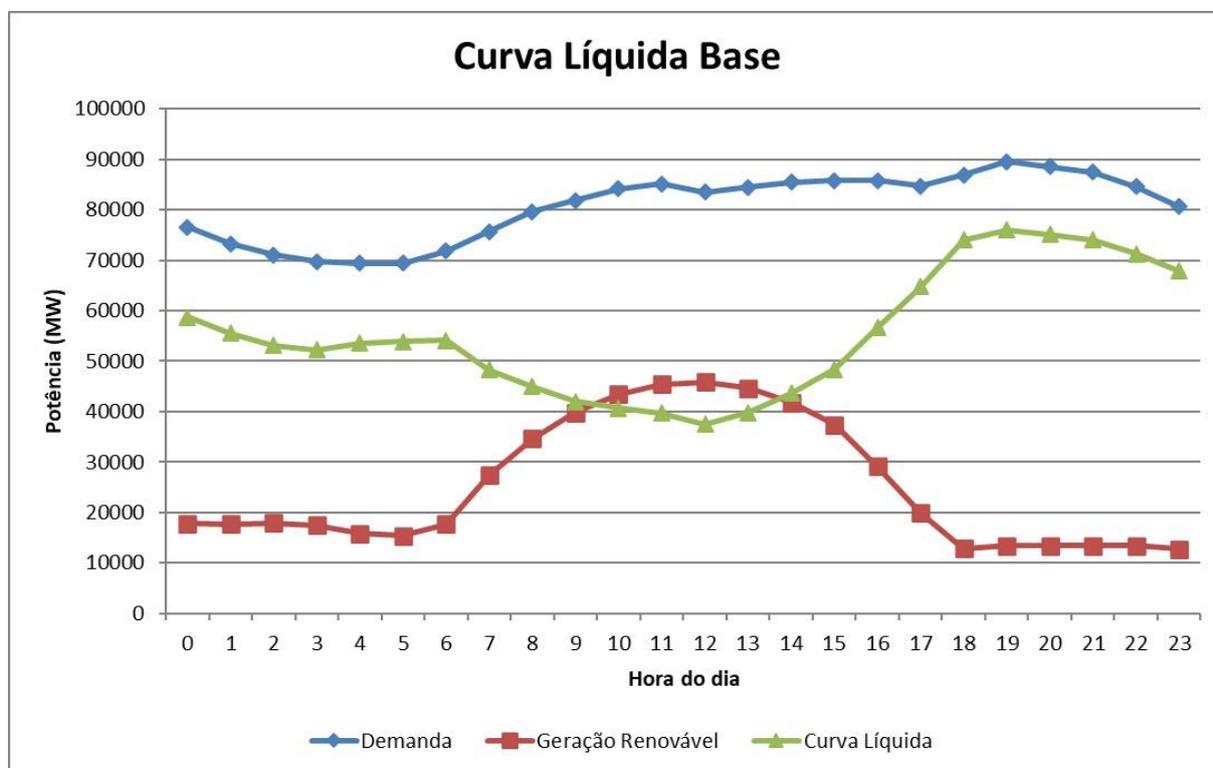


Figura 2: Gráfico da curva de carga líquida de 2024. Fonte: Autor.

Com base nessa curva líquida base, foram simulados três cenários para 2034, considerando uma frota projetada de 4 milhões de veículos elétricos leves e um consumo médio de 8,24 kWh por veículo/dia (Faller & Junior, 2019). Essa energia adicional, equivalente a cerca de 32,96 GWh/dia, foi distribuída de acordo com a preferência por recarga residencial noturna, adotando-se a janela entre 18h e 21h como período crítico (INL, 2015). Os três cenários assumiram diferentes níveis de concentração da recarga nesse horário: Cenário A (100%), Cenário B (75%) e Cenário C (50%), resultando em incrementos médios de aproximadamente 10,99 GW, 8,24 GW e 5,49 GW, respectivamente.

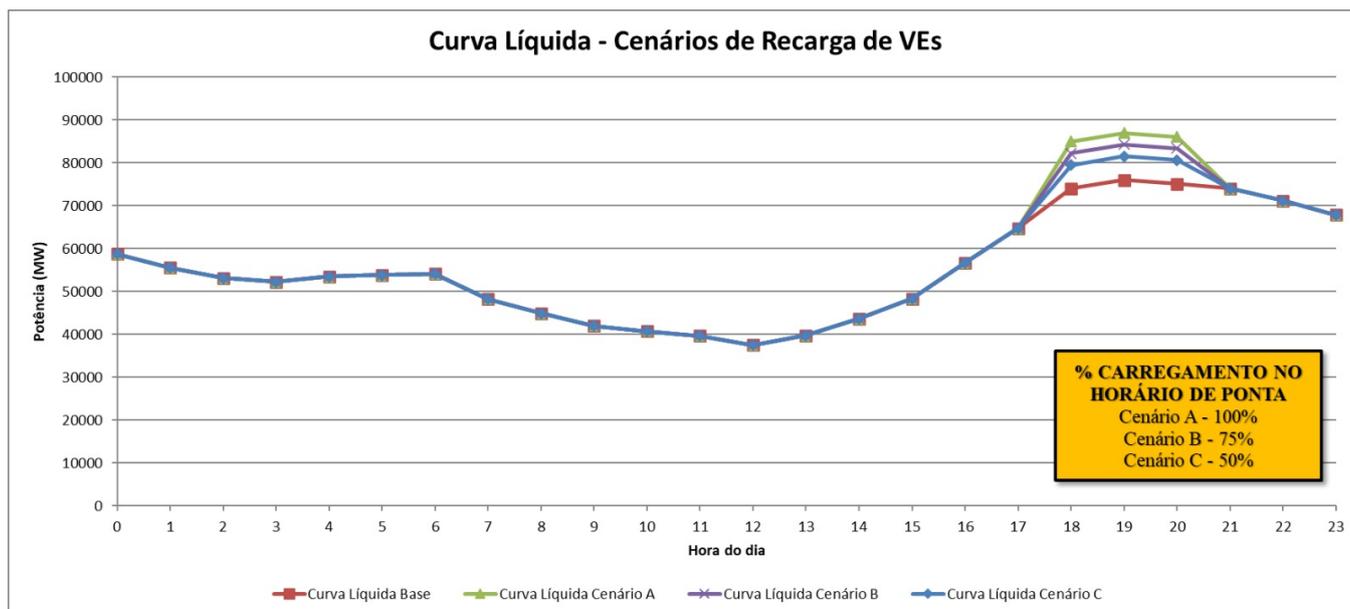


Figura 3: Impacto da expansão dos veículos elétricos na curva líquida. Fonte: Autor.

A análise mostra que a eletrificação veicular até 2034 tende a intensificar a rampa vespertina da curva líquida, já que a redução da geração solar no fim da tarde ocorre ao mesmo tempo em que cresce a demanda por recarga dos veículos. Esse cenário cria maior pressão sobre a operação do sistema, exigindo resposta rápida de usinas flexíveis para atender o pico de consumo, em um comportamento semelhante à “duck curve” registrada em outros mercados elétricos.

Apesar das simplificações adotadas no estudo, como o uso de médias horárias anuais e a não diferenciação de perfis regionais de consumo e recarga, os resultados apontam um desafio real para a operação futura do sistema. Estratégias como tarifação horária, uso de carregadores inteligentes e avanço das tecnologias de Vehicle-to-Grid (V2G), combinadas à expansão da geração solar e de soluções de armazenamento, serão fundamentais para suavizar a curva líquida e evitar sobrecargas no horário de ponta.

CONCLUSÕES:

A pesquisa conclui que a eletrificação da frota de veículos leves no Brasil até 2034, mesmo em cenários conservadores de recarga, deverá impactar significativamente a curva líquida do SIN, elevando a demanda durante o horário de ponta. A sobreposição da recarga veicular com o aumento do consumo residencial, aliada à queda da geração solar no fim da tarde, intensifica a rampa vespertina e eleva a necessidade de usinas flexíveis para garantir o equilíbrio do sistema.

Os resultados apontam a urgência de estratégias de planejamento para mitigar esse impacto, incluindo a ampliação da geração solar com sistemas de armazenamento, a implementação de tarifas diferenciadas, o incentivo ao carregamento inteligente e o uso de V2G. Essas medidas podem reduzir a

pressão sobre a rede elétrica, melhorando a estabilidade do sistema e garantindo a viabilidade da eletromobilidade em larga escala no país.

BIBLIOGRAFIA

COSTA, T. I. da. **Charging Station Location Strategy for Electric Vehicles. The Case of the City of Porto.** Universidade do Porto, ProQuest Dissertations & Theses. Portugal, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Plano Nacional de Expansão de Energia 2034.** Rio de Janeiro, 2025.

FALLER, D.; JUNIOR, P. M. **A eficiência energética dos veículos elétricos, as oportunidades e desafios para o setor elétrico brasileiro.** Agência Canal Energia. Rio de Janeiro, 2019.

INL. **Plugged in: How Americans charge their electric cars.** [S.l.]: INL, 2018.

INSTITUTE FOR ENERGY ECONOMICS AND FINANCIAL ANALYSIS, IEEFA. **Household solar and storage will dramatically change the shape of electricity markets and networks.** 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. **Histórico da operação.** Brasília, 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. **Curva de Carga Horária.** Brasília, 2024.