

Universidade Federal do Rio de Janeiro

ANÁLISE DO IMPACTO DA RECARGA DE AUTOMÓVEIS
ELÉTRICOS NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Pedro Henrique Costa Guedes

ANÁLISE DO IMPACTO DA RECARGA DE AUTOMÓVEIS
ELÉTRICOS NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Pedro Henrique Costa Guedes

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador:

Marcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro

Junho de 2026

ANÁLISE DO IMPACTO DA RECARGA DE AUTOMÓVEIS
ELÉTRICOS NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Pedro Henrique Costa Guedes

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

Prof. Marcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Prof. Monica Pertel, D.Sc.

Eng. Daniel Neves Schmitz Gonçalves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Junho de 2026

Guedes, Pedro Henrique Costa

Análise do Impacto da Recarga de Automóveis Elétricos na Matriz Elétrica Brasileira / Pedro Henrique Costa Guedes. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2026.

XVI, 54 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcio de Almeida D’Agosto

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Ambiental, 2026.

Referências Bibliográficas: p. 51-54.

1. Veículos Elétricos 2. Recarga de Bateria 3. Demanda Energética 4. Matriz Elétrica Brasileira 5. Emissão de Gases do Efeito Estufa

I. D’Agosto, Marcio de Almeida II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental III. Análise do Impacto da Recarga de Automóveis Elétricos na Matriz Elétrica Brasileira

EPÍGRAFE

“I’m the small town, one in seven billion.

Why can’t it be me?”

- **Katy Perry**, Daisies, 2020

*Aos meus pais e minhas avós. Essa
conquista também é de vocês.*

AGRADECIMENTOS

“Amor da minha vida / Daqui até a eternidade / Nossos destinos / Foram traçados na maternidade”. A canção “Exagerado” de Cazuza foi, por inúmeros dias, a trilha sonora do meu despertar. Meus pais, Carlos Alexandre e Anny Beatriz, desde o primeiro segundo que descobriram minha existência sempre foram amorosos e comprometidos, nunca medindo esforços para me proporcionar o melhor possível. Não existem palavras que expressem minha gratidão, vocês são o meu maior exemplo. Muito obrigado por estarem ao meu lado em todas as etapas da vida. Nossos laços foram traçados muito antes da maternidade. A eternidade nos pertence.

Às minhas avós Maria Conceição e Marli Guedes. Vocês fazem valer a pena cada segundo da minha vida. Espalhar aos 4 cantos do mundo as minhas conquistas é o maior hobbie que possuem. Eu quero ser, para sempre, o maior orgulho de vocês. Não consigo imaginar quem eu seria sem a criação que me deram. Obrigado por cada sorriso, por cada abraço, por cada palavra. Por tudo...

Ao meu irmão Luís Felipe. São quase 11 anos de diferença e desde que você chegou aprendi a amar de uma forma diferente. Sei que estará sempre comigo independente da situação. Obrigado pela sua irmandade.

À minha madrinha Leyla por ter sido uma segunda mãe para mim. O incentivo que me deu, toda sua preocupação e sua força me motivam diariamente a lutar para ser uma pessoa cada vez melhor.

Às minhas primas Giullia e Pollyanna, que são muito mais que primas, são minhas irmãs também. Cresci com vocês ao meu lado e cada momento foi essencial para que eu pudesse ser quem sou.

Ao meu sobrinho Bento e ao meu afilhado Gabriel que chegaram na família a pouco tempo e me mostraram como é bom ser titio e padrinho.

Ao meu gatinho Panqueka. Você estará para sempre em meu coração.

Aos meus tios Paulo e Silvana e à minha prima Ellen. Mesmo que à distância sempre demonstraram preocupação e torceram por mim.

Aos meus amigos de colégio Larissa, Thaciane, Isabel, Jéssica, Érika e Dereck. O IFRJ nos juntou e nada mais nessa vida será capaz de separar. É muito bom olhar para trás e ver o quão forte somos, o quanto que batalhamos e o quanto somos merecedores de sucesso. Saber que tenho vocês ao meu lado me dá energia para seguir em frente.

Aos meus amigos que a UFRJ proporcionou, Ana Carolina, Dora Melo, Guilherme Félix, Maria Clara, Bruno Magno, Maria Eduarda, Ana Cláudia, Domenique Joelle e Júlia Ramos. Por cada resenha nas cadeiras de plástico do corredor do CT, cada partida de truco, cada festa, cada grupo de estudo, cada trabalho, cada viagem, cada surto. Pela amizade e pelo amor de vocês. Tudo o que vivemos juntos foi essencial para tornar o processo mais leve e mais divertido. Vocês mudaram a minha vida.

A João Victor, por me amar e compartilhar o dia a dia comigo. Cada desafio superado é uma conquista para nós dois. Esta é apenas uma etapa de tudo o que ainda temos para construir.

A todos que trabalharam comigo nas iniciações científicas que realizei, na Âmbar Consultoria Ambiental Jr., na Topázio Geologia e o Grupo Quanta.

Por fim, agradeço à UFRJ, aos professores e funcionários que agregaram em minha jornada, em especial Andrea Medeiros Salgado, Monica Pertel, Lúcia Helena Xavier, Marcio de Almeida D'Agosto e Rita Cavaliere. Minha formação não seria a mesma se não fosse por vocês.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Análise do Impacto da Recarga de Automóveis Elétricos na Matriz Elétrica Brasileira

Pedro Henrique Costa Guedes

Junho/2026

Orientador: Marcio de Almeida D'Agosto

Curso: Engenharia Ambiental

A redução das emissões de gases de efeito estufa é um desafio global urgente, visto que o setor de transportes responde por 43% das emissões energéticas no Brasil. Nesse contexto, a eletromobilidade surge como a principal alternativa para ampliar a eficiência energética e mitigar impactos ambientais. O objetivo deste estudo foi projetar a expansão da frota brasileira de veículos elétricos nos horizontes de 2030, 2040 e 2050, avaliando o impacto da recarga sobre a matriz elétrica nacional sob a premissa de um suprimento 100% renovável. A metodologia adotou uma abordagem quantitativa baseada em dados secundários de órgãos como EPE, ONS, IEA e ANFAVEA, utilizando técnicas de interpolação polinomial para estimar a capacidade instalada, a geração elétrica e a evolução da frota de veículos. Os resultados indicam que a frota elétrica poderá atingir cerca de 7,7 milhões de unidades em 2050. O consumo de energia para recarga, embora marginal no curto prazo — representando 0,12% da geração total em 2030 —, passará a ser um fator estrutural em 2050, alcançando aproximadamente 1% do total gerado. Conclui-se que a matriz brasileira possui viabilidade técnica para suportar a eletrificação, contudo, a implementação da recarga inteligente é condição essencial. Sem essa gestão, a demanda diária de recarga poderia concentrar até 25% da demanda horária média projetada para 2050, ameaçando a estabilidade da rede e forçando o acionamento de térmicas poluentes.

Palavras-chave: Veículos Elétricos, Recarga de Bateria, Demanda Energética, Matriz Elétrica Brasileira, Emissão de Gases do Efeito Estufa

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Analysis of the Impact of Electric Vehicle Charging on the Brazilian Power Grid

Pedro Henrique Costa Guedes

June/2026

Advisor: Marcio de Almeida D'Agosto

Course: Environmental Engineering

The reduction of greenhouse gas emissions is an urgent global challenge, as the transportation sector accounts for 43% of energy-related emissions in Brazil. In this context, electromobility emerges as the primary alternative for increasing energy efficiency and mitigating environmental impacts. The objective of this study was to project the expansion of the Brazilian electric vehicle fleet across the 2030, 2040, and 2050 horizons, evaluating the impact of charging on the national power grid under the premise of a 100% renewable supply. The methodology adopted a quantitative approach based on secondary data from agencies such as EPE, ONS, IEA and ANFAVEA, utilizing polynomial interpolation techniques to estimate installed capacity, power generation, and vehicle fleet evolution. The results indicate that the electric fleet could reach approximately 7,7 million units by 2050. Energy consumption for charging, while marginal in the short term — representing 0.12% of total generation in 2030 —, will become a structural factor by 2050, reaching approximately 1% of the total generated. It is concluded that the Brazilian grid possesses the technical viability to support electrification; however, the implementation of smart charging is an essential condition. Without such management, daily charging demand could concentrate up to 25% of the projected average hourly demand for 2050, threatening grid stability and forcing the activation of polluting thermal power plants.

Keywords: Electric Vehicles, Battery Charging, Energy Demand, Brazilian Power Grid, Greenhouse Gas Emissions

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E FIGURAS

Gráfico 1. Evolução das emissões de GEE nas atividades de energia e processos industriais e uso de produtos (PIUP) no Brasil no período de 1970 – 2024	2
Gráfico 2. Matriz Energética de Transportes em 2024	3
Gráfico 3. Matriz Elétrica Brasileira por Fontes em 2024	7
Gráfico 4. Evolução da Capacidade Instalada Brasileira de 2015-2024	9
Gráfico 5. Evolução da Representatividade de MMGD no Brasil de 2015-2024	10
Gráfico 6. Evolução da Geração Elétrica no Brasil de 2015-2024	11
Gráfico 7. Emissão de tCO ₂ por ano pela geração de energia elétrica de 2015-2024 ...	12
Gráfico 8. Consumo de Energia Elétrica por Classe de 2015-2024	13
Gráfico 9. Curva de Carga Horária no Ano de 2024	14
Gráfico 10. Licenciamento de Veículos Jan/21 – Dez/24	17
Gráfico 11. Projeção da Frota de Veículos Híbridos e Elétricos de 2024 – 2033	28
Gráfico 12. Projeção da geração horária das fontes solar e eólica e da demanda média brasileira	47
Imagem 1. Classificação dos Veículos Elétricos	5
Imagem 2. Dilema do Operador da ONS	7

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Total de modelos de veículos por tipo de propulsão nos últimos 3 anos	15
Tabela 2. Eficiência energética dos 14 modelos elétricos mais vendido no Brasil no ano de 2024	16
Tabela 3. Tipos de Carregadores para VEs	19
Tabela 4. Cenários para Projeção da Capacidade Instalada	21
Tabela 5. Fator de Emissão de CO ₂ eq por Fonte de Energia	26
Tabela 6. Projeção Simples da Capacidade Instalada em MW por Cenários	32
Tabela 7. Projeção da Capacidade Instalada com Base no PDE 2034 e no PNE 2050 ..	33
Tabela 8. Projeção da Geração de Energia Elétrica em GWh com Base no Fator de Capacidade	34
Tabela 9. Projeção da Geração de Energia Elétrica em TWh com Base no WEO 2024 ..	36
Tabela 10. Estimativa dos Fatores de Emissão de CO ₂ eq por Cenário	37
Tabela 11. Consumo Anual de Energia dos Veículos Elétricos Mais Vendidos no Brasil em 2024	38
Tabela 12. Projeção do Frota de Veículos Elétricos	39
Tabela 13. Projeção do Consumo de Energia Elétrica Associado à Recarga de VEs	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
CA	Corrente Alternada
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i> (Crescimento Composto Annual)
CC	Corrente Contínua
COP	<i>Conference of the Parties</i> (Conferência das Partes)
CO₂	Dióxido de Carbono
CO_{2eq}	Dióxido de Carbono Equivalente
DH	Demanda Horária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
GtCO₂	Gigatonelada de Dióxido de Carbono
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
GWh/h	Gigawatt-hora por hora
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico Híbrido)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência International de Energia)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas)
IPI	Imposto Sobre Produtos Industrializados
IPVA	Imposto Sobre a Propriedade de Veículos Automotores
km	Quilômetro
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MJ/km	Megajoule por quilômetro
MME	Ministério de Minas e Energia
MMGD	Micro e Minigeração Energética
MW	Megawatt

MWh	Megawatt-hora
MWh/h	Megawatt-hora por hora
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIUP	Processos Industriais e Uso de Produtos
PNE	Plano Nacional de Energia
PNME	Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SIN	Sistema Interligado Nacional
tCO₂eq	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente
tCO₂eq/MWh	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente por Megawatt-hora
TWh	Terawatt-hora
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i> (Comissão Econômica das Nações Unidas Para a Europa)
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima)
VE	Veículo Elétrico
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido Plug In
WEO	<i>World Energy Outlook</i> (Perspectivas da Energia Mundial)

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
2.	Objetivo.....	8
3.	Revisão Bibliográfica.....	8
3.1	Capacidade Instalada	9
3.2	Geração de Energia Elétrica	10
3.2.1	Emissões Associadas à Geração de Energia Elétrica.....	11
3.3	Consumo de Energia Elétrica	12
3.3.1	Demanda Horária	13
3.4	Panorama Brasileiro de Comercialização de Carros Elétricos	14
3.4.1	Incentivos à Eletromobilidade no Brasil	18
3.4.2	Infraestrutura de Recarga.....	18
3.4.3	Recarga Inteligente	19
4.	Metodologia	20
4.1	Estimativa da Capacidade Instalada Brasileira	20
4.1.1	Metodologia Simples por Cenários	21
4.1.2	Metodologia Baseada no PDE 2034 e no PNE 2050	23
4.2	Estimativa da Geração de Energia Elétrica.....	24
4.2.1	Estimativa de Geração de Energia com Base no Fator de Capacidade Histórico... 24	
4.2.2	Projeção de Geração de Energia com Base em Relatórios Internacionais	24
4.3	Estimativa de Emissões de CO ₂ eq	25
4.4	Capacidade da Bateria e Consumo de Energia Elétrica	26
4.5	Projeção de Veículos Elétricos	27
5.	Resultados	29
5.1	Projeção da Capacidade Instalada	29
5.1.1	Simples por Cenário.....	29
5.1.2	Com Base no PNE 2050	32
5.2	Projeção da Geração de Energia Elétrica	33
5.2.1	Com Base no Fator de Capacidade Histórico.....	33
5.2.2	Com Base nos Relatórios Internacionais	34
5.3	Projeção dos Fatores de Emissão de CO ₂ eq.....	37
5.4	Quantificação do Consumo Médio Anual de Energia por Veículo Elétrico	37
5.5	Projeção de Veículos Elétricos e Respectivo Consumo	39
6.	Discussão.....	40

6.1	Capacidade Instalada	41
6.1.1	Capacidade Instalada em 2030.....	41
6.1.2	Capacidade instalada em 2040.....	42
6.1.3	Capacidade Instalada em 2050.....	42
6.2	Geração Elétrica e Respectivas Emissões de CO ₂	43
6.3	Consumo Elétrico para Recarga de Baterias de Veículos Elétricos	45
6.4	Aplicação da Recarga Inteligente	47
7.	Conclusão	49
	REFERÊNCIAS	51

1. Introdução

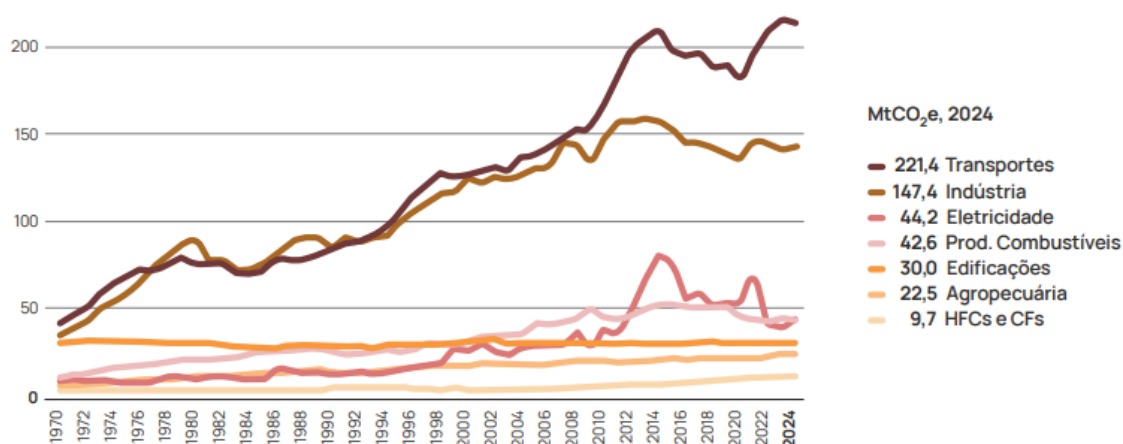
A redução das emissões dos gases do efeito estufa (GEE) é um dos maiores desafios enfrentados pela população ao redor de todo o mundo. Com o intuito de mitigar os danos causados por esses gases, ações para evitar o aumento da temperatura da Terra vêm sendo tomadas desde que objetivos específicos foram estabelecidos no Acordo de Paris¹. No entanto, cumprir esses objetivos a longo prazo significou uma imediata mudança das tendências de emissão de GEE, sendo necessárias atuações urgentes e ambiciosas em todas as escalas (IPCC, 2022).

Desde a aprovação do Acordo de Paris até o ano de 2018, o Brasil conseguiu frear o aumento das emissões. Entretanto, a partir de 2019 esse cenário inverteu, sendo observado um pico histórico que representou um aumento de 20% em relação aos anos anteriores. Em 2022, o Brasil emitiu 2,3 bilhões de toneladas de gás carbônico equivalente (tCO₂eq). Mesmo ocorrendo uma redução de 8% em relação ao ano anterior, este volume configura o terceiro maior desde 2005, ficando abaixo apenas de 2019 e 2021. Devido a esse número elevado, o Brasil ocupa a sexta posição no ranking de países que mais emitem gases do efeito estufa, representando cerca de 3% do total mundial. (SEEG, 2023)

Em 2023 o setor energético atingiu um recorde de 37.4 GtCO₂ emitidos mundialmente, representando 1,1% a mais sobre o registrado em 2022 (IEA, 2024a). Já no ano de 2024, o setor energético representa cerca de 20% das emissões nacionais de GEE (SEEG, 2025). Este setor engloba todas as emissões provenientes da queima de combustíveis, desde a gasolina para movimentar um carro até um gás fóssil para um processo industrial. Atualmente o setor de transportes corresponde a 1/3 do consumo final de energia no Brasil (EPE, 2025a) e representa 43% das emissões provenientes do setor energético (SEEG, 2025).

¹ Com o intuito de frear o avanço do aquecimento global, em 2015 foi assinado um tratado mundial intitulado Acordo de Paris. Ele foi discutido entre 195 países durante a COP21, em Paris, e acordado internacionalmente na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Sua aprovação ocorreu em 12 de dezembro de 2015 e passou a vigorar 328 dias depois, em 4 de novembro de 2016. Seu principal objetivo é reduzir as emissões de GEE com a meta de limitar o aumento médio da temperatura global a 2 °C, quando comparado a níveis pré-industriais. Aliado a isso, pretende provocar estímulos de suporte e cooperação financeira e tecnológica de países desenvolvidos para os mais vulneráveis (ONU, 2015).

Gráfico 1 - Evolução das emissões de GEE nas atividades de energia e processos industriais e uso de produtos (PIUP) no Brasil no período de 1970 – 2024



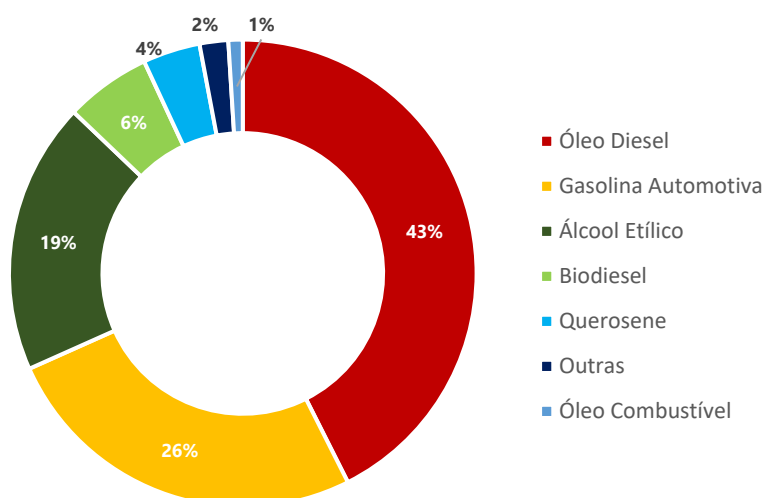
Fonte: SEEG, 2025

Além de sua relevância no consumo energético e dos diversos impactos ambientais associados, o setor de transportes tem ampla relevância e abrangência econômica e social, englobando aspectos como a mobilidade de pessoas, o escoamento da produção agrícola, a logística de exploração do pré-sal, o abastecimento de insumos para indústria etc. (MME/EPE, 2020).

Observando a crescente participação do setor energético nas emissões de GEE, estudos que abordam projeções da demanda de energia apresentam um grande diferencial estratégico para frear o avanço das emissões relacionadas a essa categoria. Para isso, reduzir as emissões de GEE no setor de transportes exige mudanças estruturais nos modos dispostos para transportar pessoas e mercadorias, sendo de suma importância a ênfase na utilização da energia de uma forma mais eficiente (IEA, 2020).

Como podemos observar no Gráfico 2, apenas 21,5% da energia consumida no setor de transportes é de origem renovável - considerando o etanol e o biodiesel. Já os outros 78,5% possuem origem fóssil e são os grandes responsáveis pela alta emissão de gases do efeito estufa do setor, sendo indispensável um foco de atuação para que esses números sejam reduzidos.

Gráfico 2 - Matriz Energética de Transportes em 2024



Fonte: MME/EPE 2025a.

Por mais que o ciclo de vida do etanol seja tido como um ciclo fechado de absorção-liberação de carbono, é necessário fazer um recorte e entender que as emissões estão majoritariamente localizadas em grandes centros urbanos que, consequentemente, sofrem com altos índices de poluição que não seriam solucionados com veículos movidos a etanol pois a população continuaria sofrendo com os impactos diretos das emissões. Conforme constatado por Vaz, et al., (2015), a eletromobilidade se apresenta como a principal alternativa para melhorar a eficiência energética e reduzir sensivelmente o impacto ambiental causado por veículos automotores.

A invenção de carros elétricos não é algo recente. Segundo Noce (2009), desde a idealização da bateria recarregável por Gastón Planté, a utilização desta em veículos automotores já vinha sendo estudada. Para chegar no que conhecemos hoje, ela passou por múltiplas mudanças, sendo a primeira baseada no princípio chumbo-ácido, passando pelas de níquel-cádmio e de níquel-metal hidreto, até chegarmos em 1999 nas baterias de íon-lítio.

Por possuírem uma alta densidade energética, possibilitando maior armazenamento de carga, um bom ciclo de vida, uma taxa de autodescarga relativamente baixa e uma maior autonomia em relação a outras tecnologias de baterias com o mesmo peso, as baterias de íon-lítio dominam não só o mercado de carros elétricos, mas também o de eletrônicos portáteis. Porém, por mais que este seja o modelo de bateria mais utilizado atualmente, também são necessários alguns cuidados a fim de evitar sobrecargas

e danos associados às altas temperaturas. Para isso, é de suma importância que as baterias estejam associadas a um sistema de gerenciamento para garantir seu funcionamento de forma otimizada e segura (HAUSER, 2015).

O princípio básico para o funcionamento de um carro elétrico é bastante similar aos de diferentes tipos de bateria utilizados no cotidiano: ocorre uma reação química entre eletrólitos e eletrodos, onde há a conversão em energia elétrica. No processo de carga da bateria para armazenagem de energia elétrica, os íons saem do eletrodo positivo (catodo) até chegarem no eletrodo negativo (anodo) através de um eletrólito. Para ligar o motor ocorre o processo inverso. Os íons movem-se do anodo para o catodo, gerando energia elétrica. Após essa etapa, o inversor é responsável por converter a corrente elétrica contínua em corrente alternada, que é levada até o motor de indução acionando os mecanismos do motor e fazendo o carro se mover (GUO, 2021).

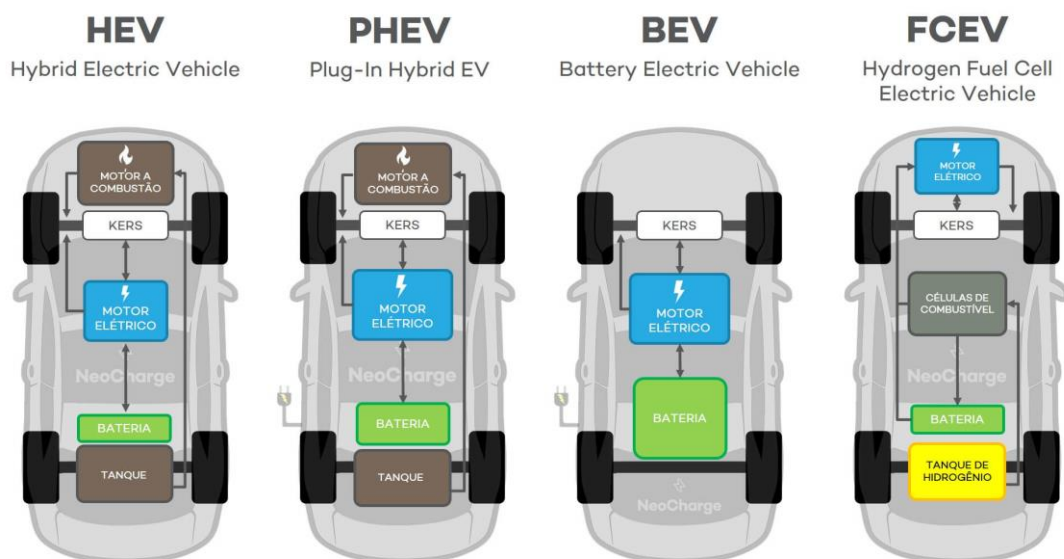
Atualmente os carros elétricos podem ser classificados em 4 tipos diferentes:

- **Veículo Elétrico Híbrido (Hybrid Electric Vehicle - VEH):** tem como principal combustível para realizar a combustão interna o álcool/gasolina e o diesel. Neste modelo, a bateria e o motor elétrico possuem tamanhos menores, fazendo com que o modo “somente elétrico” seja utilizado para atividades que demandem menos trabalho, como a ignição, a utilização de acessórios e a condução em baixas velocidades, deixando que o motor a combustão funcione nas velocidades maiores, onde é mais eficiente. Por se beneficiarem de 2 motores, os veículos híbridos apresentam uma maior eficiência que carros não híbridos e têm maior potencial de causar menos impactos ambientais.
- **Veículo Elétrico Híbrido Plug In (Plug-In Hybrid Electric Vehicle - VEHP):** combina o motor a combustão interna alimentado por álcool/gasolina com um motor elétrico e um banco de bateria recarregável. Para este modelo, o modo “somente elétrico” funciona integralmente, utilizando a eletricidade até que haja o descarregamento médio de 80% da bateria. A recarga da bateria pode ser feita via frenagem regenerativa, que é conversão de parte da energia perdida na frenagem em eletricidade, ou por cabo, que utiliza a energia de uma fonte externa. Os PHEV são mais eficientes e poluem menos que os híbridos convencionais.
- **Veículo Elétrico a Bateria (Battery Electric Vehicle - VE):** utiliza apenas a eletricidade armazenada na bateria para alimentar o motor elétrico e tracionar as

rodas. Sendo assim, este modelo funciona apenas no modo “somente elétrico” visto que não existe motor a combustão na sua composição. A recarga da bateria funciona da mesma forma que nos PHEV e deve ocorrer numa periodicidade que dependerá da autonomia de cada veículo. Além de ser muito mais eficiente que qualquer modelo híbrido, o BEV não emite nenhum gás poluente durante seu uso e é tido como o modelo ideal para reduzir os impactos do efeito estufa.

- **Veículo Elétrico a Célula de Combustível (Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle – VECC):** utilizam o gás de hidrogênio como sua principal fonte de energia. Este modelo se beneficia da reação química entre oxigênio e hidrogênio, resultando na produção de água e energia, capaz de alimentar o motor elétrico. Sua autonomia e reabastecimento se assemelham muito a de um carro convencional e, mesmo com seu combustível oriundo de fonte menos limpas que o carvão mineral, por exemplo, o FCEV gera menos poluente quando comparado com veículos não elétricos.

Imagem 1 – Classificação dos Veículos Elétricos



Fonte: NeoCharge

Devido aos seus benefícios econômicos e ambientais, a penetração dos automóveis elétricos no setor de transportes vem se tornando cada vez mais evidente e, com isso, é possível observar uma grande discussão acerca dessas diferentes tecnologias e formas de uso. Existem inúmeros desafios que devem ser levados em conta para que a eletromobilidade possa avançar de forma contínua e segura, como a garantia de

infraestrutura de recarga, preços acessíveis, praticidade no pós-venda e, principalmente, o abandono do *carbon lock in* (MME/EPE, 2023b). Este conceito infere que a utilização massiva de combustíveis fósseis perpetua, atrasa ou impede a transição para alternativas sustentáveis.

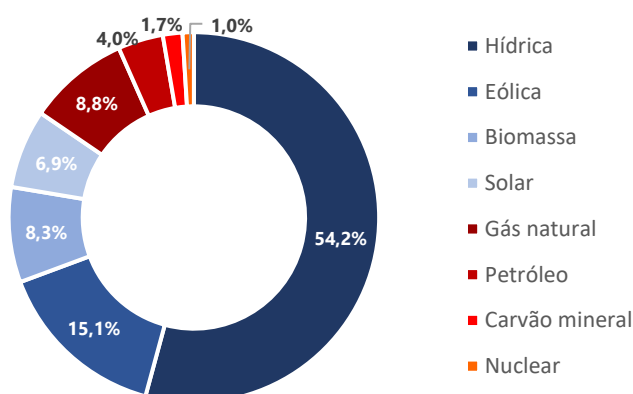
Se abastecidos com energias de fonte renovável², os veículos elétricos se apresentam como uma grande solução para redução das emissões de GEE e poluentes atmosféricos, porém, a manutenção do *carbon lock in* se apresenta como um grande impeditivo para a percepção destes benefícios, principalmente em países que a matriz energética é originária de combustíveis fósseis.

O Brasil possui um sistema interligado nacional (SIN) de grande porte, capaz de conectar os 4 grandes subsistemas (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e maior parte do Norte) por meio de malhas de transmissão, permitindo assim a transferência de energia entre eles. Através desse sistema é possível aproveitar os diferentes climas brasileiros e utilizar de sua complementariedade para garantir a entrega de energia ao mercado com segurança e economicidade.

Em março de 2024 o Brasil alcançou a marca de 200 gigawatts (GW) de potência instalada (ANEEL, 2024), sendo 84,5% correspondente a fontes renováveis e 15,5% de fontes não renováveis, provando seu protagonismo frente à transição energética. Dentre as fontes renováveis, destacam-se a hídrica, que é responsável por 54,2% da potência total, a eólica com 15,1% de participação e a de biomassa que representa 8,3% do total. Já entre as não renováveis temos 8,8% representados pelas de gás natural, 4,0% por petróleo e 1,7% por carvão mineral (ANEEL, 2024).

² As fontes de energia são consideradas renováveis quando são inesgotáveis, ou seja, suas quantidades são renovadas constantemente ao serem utilizadas. Alguns exemplos são a fonte hídrica, a solar, a eólica, a de biomassa, a geotérmica e a oceânica. Elas são consideradas fontes “limpas” pois sua geração é realizada com o mínimo de impacto ambiental e com baixa emissão de poluentes.

Gráfico 3 - Matriz Elétrica Brasileira por Fontes em 2024



Fonte: ANEEL, 2024.

Para que haja confiabilidade nas operações, o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) é responsável por coordenar e controlar a geração e a transmissão de energia elétrica no SIN. Mais da metade da matriz elétrica nacional é composta por energia firme³, sendo capaz de garantir a geração até mesmo nos picos de demanda que já atingiram patamares recordes de 102.478 MW (ONS, 2025). O processo para a geração de energia deve estar de acordo com o “Dilema do Operador” (Imagem 2). Se a decisão correta não for tomada o sistema poderá passar por vertimento de barragens, causando desperdício de água, ou por déficits, deixando o Estado passível de crises hídricas, podendo ocorrer o racionamento da energia ou até mesmo seu corte.

Imagem 2 - Dilema do Operador da ONS



Fonte: G2 Academy, 2023.

³ A energia firme atesta que uma fonte de energia é capaz de fornecer eletricidade de forma contínua e confiável ao longo do tempo, independentemente das condições climáticas ou da sazonalidade. No Brasil, elas são representadas pelas hidrelétricas, térmicas a gás natural e termelétricas nucleares.

Em 2021 o Brasil passou por um período de crise hídrica, apresentando escassez de chuvas e baixos volumes de reservatório. Estes fenômenos impactaram diversas esferas como o abastecimento de água, a agricultura e a indústria, mas o principal prejudicado foi o setor elétrico. Para suprir a geração de energia proporcionada pelas hidrelétricas foi necessário acionar o funcionamento das termelétricas, estas que além de possuírem custos mais elevados, não são consideradas fontes renováveis, contribuindo ainda mais para a emissão de poluentes relacionados ao efeito estufa.

Devido ao avanço do aquecimento global e estando frente a uma grande insegurança e imprevisibilidade climática, os recordes de demanda elétrica têm se tornado cada vez mais comuns atualmente devido às altas temperaturas registradas no país. Arelado a isso, o grande avanço da comercialização de carros elétricos no cenário nacional faz com que a demanda por energia elétrica aumente cada vez mais, causando impactos não só no setor elétrico, mas também diminuindo a demanda por etanol e impactando a indústria sucroalcooleira.

Frente a este cenário, é necessário fazer um questionamento: a matriz elétrica brasileira será capaz de suportar o avanço da eletrificação de veículos leves em larga escala e garantir a renovabilidade da energia entregue para todo o sistema interligado nacional?

2. Objetivo

O presente estudo visa elaborar projeções para a frota brasileira de veículos elétricos em três horizontes temporais: curto (2030), médio (2040) e longo (2050) prazo. Adicionalmente, o trabalho propõe-se a avaliar o impacto da demanda de energia para recarga dessas baterias sobre a matriz elétrica nacional, sob a condição de que esse suprimento energético não impacte em sua renovabilidade, consolidando assim, a premissa de um 'combustível' 100% verde e a contribuição da eletrificação para a descarbonização do transporte.

3. Revisão Bibliográfica

A presente revisão bibliográfica destina-se a fornecer os fundamentos de dados e as bases conceituais necessárias para embasar e sustentar as análises e discussões

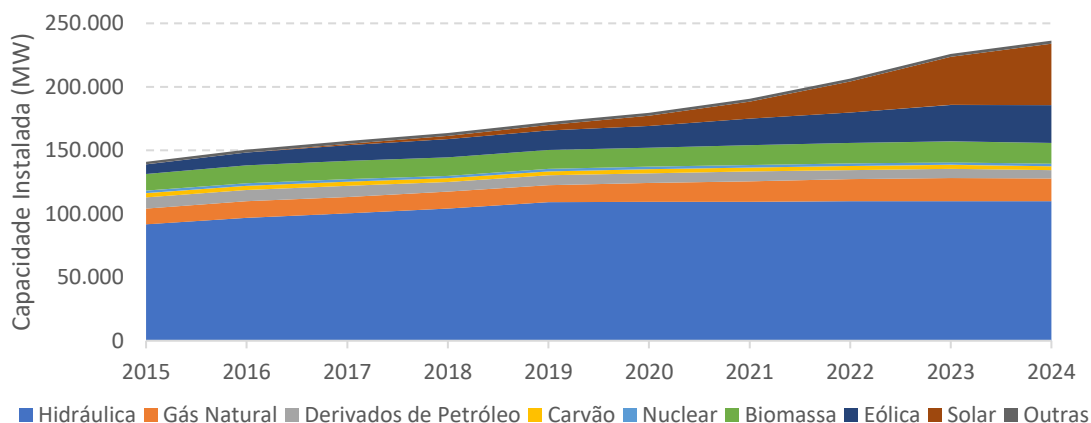
subsequentes deste estudo. Para tanto, será realizada uma abordagem aprofundada dos dados e conceitos essenciais que permeiam o cenário energético brasileiro e o avanço da eletromobilidade.

Serão detalhadas informações cruciais sobre a capacidade instalada e a geração de energia elétrica no Brasil, incluindo as emissões de gases associadas a cada fonte, bem como o perfil de consumo e a demanda horária de eletricidade, elementos indispensáveis para compreender a gestão da rede e a integração de novas cargas. Adicionalmente, será traçado um panorama da comercialização de veículos elétricos no país, contemplando os incentivos à eletromobilidade que impulsionam esse mercado e a evolução da infraestrutura de recarga necessária para seu desenvolvimento sustentável.

3.1 Capacidade Instalada

Entre 2015 e 2024, a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil cresceu de 140 GW para mais de 236 GW (EPE, 2025a), com destaque para o avanço das fontes renováveis, especialmente solar e eólica. Essa expansão foi impulsionada pelo avanço tecnológico, pela redução de custos e pela necessidade de diversificação diante das crises hídricas e das mudanças climáticas.

Gráfico 4 - Evolução da Capacidade Instalada Brasileira de 2015-2024



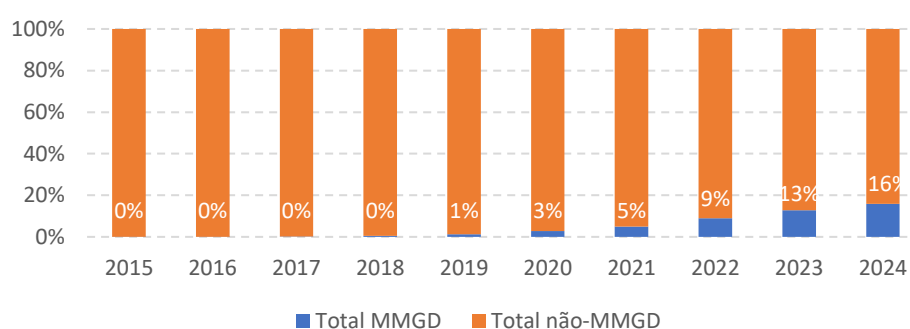
Fonte: EPE, 2025a

As hidrelétricas, que respondiam por 65% da capacidade em 2015, reduziram sua participação para 46% em 2024, mesmo com o aumento absoluto de 92 GW para 110 GW. A energia solar, praticamente inexistente em 2015, ultrapassou 48 GW (20% do total) em 2024, impulsionada pela geração distribuída e pela instalação de grandes usinas. A eólica também cresceu, alcançando 29 GW (12%). As termelétricas, sobretudo as

movidas a biomassa e gás natural, mantiveram participação estável entre 7% e 9%, contribuindo para a flexibilidade do sistema (EPE, 2025a).

A Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) também apresentou forte expansão. A capacidade solar passou de 0,013 GW em 2015 para mais de 36 GW em 2024, representando 15% da capacidade total e 74% da geração solar do país (Gráfico 5). O crescimento foi impulsionado pela popularização dos sistemas fotovoltaicos e por políticas de incentivo. As demais fontes — biomassa (0,197 GW), CGHs (0,058 GW) e eólica (0,017 GW) — tiveram evolução modesta (EPE, 2025a).

Gráfico 5 - Evolução da Representatividade de MMGD no Brasil de 2015-2024



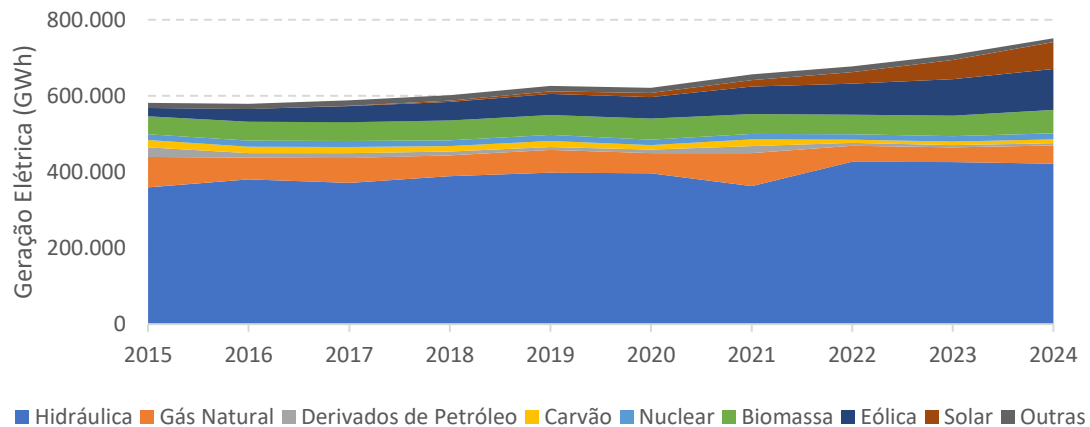
Fonte: EPE, 2025a

É importante ressaltar que os valores apresentados para a capacidade instalada refletem a potência total que as unidades de geração elétrica do Brasil podem gerar caso estivessem todas ligadas e funcionando em sua total eficiência ao mesmo tempo. O SIN foi projetado para operar com folgas, então a geração de energia nunca chegará à potência máxima instalada por diversos motivos, como fato de a demanda sempre ser menor que a oferta, pela existência de usinas não despacháveis, pela manutenção de usinas, pela sobrecarga de linhas de transmissão etc.

3.2 Geração de Energia Elétrica

O aumento da capacidade instalada refletiu-se na geração elétrica, que passou de 581 TWh em 2015 para mais de 751 TWh em 2024 (Gráfico 6), com mudanças significativas na participação das fontes. A descarbonização e a diversificação da matriz tornaram-se evidentes, com forte crescimento de solar e eólica, estabilidade das hidrelétricas e retração das fontes fósseis.

Gráfico 6 - Evolução da Geração Elétrica no Brasil de 2015-2024



Fonte: EPE, 2025a

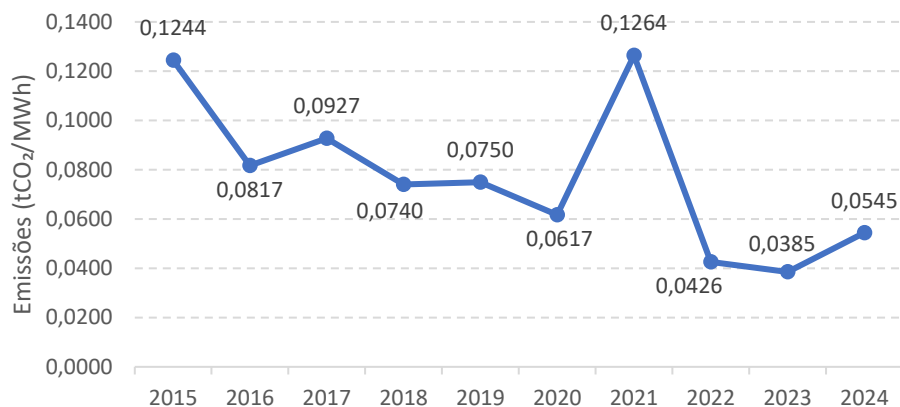
A energia hidráulica manteve-se como principal fonte, passando de 359 TWh para 421 TWh, mas sua participação relativa caiu devido à expansão de renováveis não hídricas e às variações por crises hídricas. A energia solar teve o maior crescimento, de 59 GWh para mais de 70 TWh, impulsionada pela geração distribuída e redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos. A energia eólica também avançou, de 21 TWh para 107 TWh, consolidando-se como a segunda maior fonte da matriz (EPE, 2025a).

A biomassa cresceu moderadamente, de 47 TWh para 61 TWh, mantendo relevância em regiões agroindustriais. As fontes fósseis sofreram retração: petróleo caiu de 25 TWh para 5,9 TWh, carvão de 19 TWh para 10 TWh e gás natural de 79 TWh para 48 TWh, refletindo menor uso em anos de maior disponibilidade hídrica e maior participação das renováveis. A geração nuclear permaneceu estável, entre 14 e 16 TWh (EPE, 2025a).

3.2.1 Emissões Associadas à Geração de Energia Elétrica

Entre 2015 e 2024, a matriz elétrica brasileira manteve predominância de fontes renováveis, especialmente hidrelétricas, mas passou por oscilações que impactaram o fator médio anual de emissões de CO₂ (tCO₂/MWh), indicador divulgado pelo MCTI que mede a intensidade de carbono equivalente por megawatt-hora gerado (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Emissão de tCO₂ por ano pela geração de energia elétrica de 2015-2024



Fonte: MCTI, 2025

Há correlação direta entre a geração elétrica e as emissões: menor disponibilidade hídrica leva ao acionamento de termelétricas fósseis, elevando as emissões, enquanto expansão de fontes renováveis, como solar e eólica, reduz a intensidade de carbono.

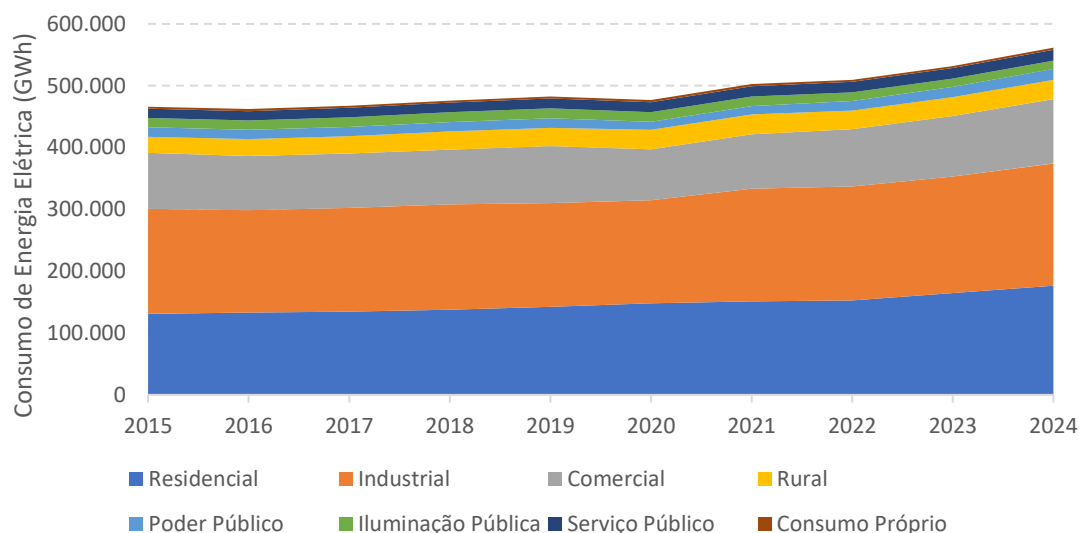
As crises hídricas de 2015 e 2021 reduziram significativamente a geração hidrelétrica, aumentando o uso de gás natural, derivados de petróleo e carvão. Como consequência, o fator de emissão atingiu 0,1244 tCO₂/MWh em 2015 e 0,1264 tCO₂/MWh em 2021, os maiores valores do período analisado.

Entre 2016 e 2020, a expansão de fontes renováveis não convencionais e a redução do uso de fósseis diminuíram o fator de emissão de 0,0817 para 0,0617 tCO₂/MWh. A partir de 2022, com a recuperação dos reservatórios e a entrada de novas fontes solar e eólica, as emissões caíram para 0,0426 tCO₂/MWh em 2022 e 0,0385 tCO₂/MWh em 2023. Em 2024, houve leve aumento na geração a gás e carvão, elevando o fator para 0,0545 tCO₂/MWh, ainda relativamente baixo em comparação com anos anteriores (MCTI, 2025).

3.3 Consumo de Energia Elétrica

Entre 2015 e 2024, o consumo de energia elétrica no Brasil refletiu crescimento populacional, retomada econômica e maior eletrificação de diversos setores (Gráfico 8). A demanda total aumentou de 466 TWh em 2015 para 532 TWh em 2023, aproximadamente 20% de crescimento, puxada principalmente pelos setores residencial e industrial (EPE, 2025b).

Gráfico 8 - Consumo de Energia Elétrica por Classe de 2015-2024



Fonte: EPE, 2025b

O consumo residencial cresceu de 131 TWh para 177 TWh em 2024, impulsionado pelo aumento populacional e maior presença de eletrodomésticos. O setor industrial, após quedas pontuais entre 2016 e 2020, voltou a crescer, atingindo 198 TWh em 2024, equivalente a 35,2% do consumo total.

O consumo comercial sofreu impacto da pandemia em 2020 (83 TWh), recuperando-se para 104 TWh em 2024, enquanto o setor rural avançou de 26 TWh para 31 TWh no mesmo período. Setores de poder público e serviços públicos tiveram variações menores, e o consumo com iluminação pública apresentou leve redução. O consumo próprio do setor elétrico permaneceu estável (EPE, 2025b).

3.3.1 Demanda Horária

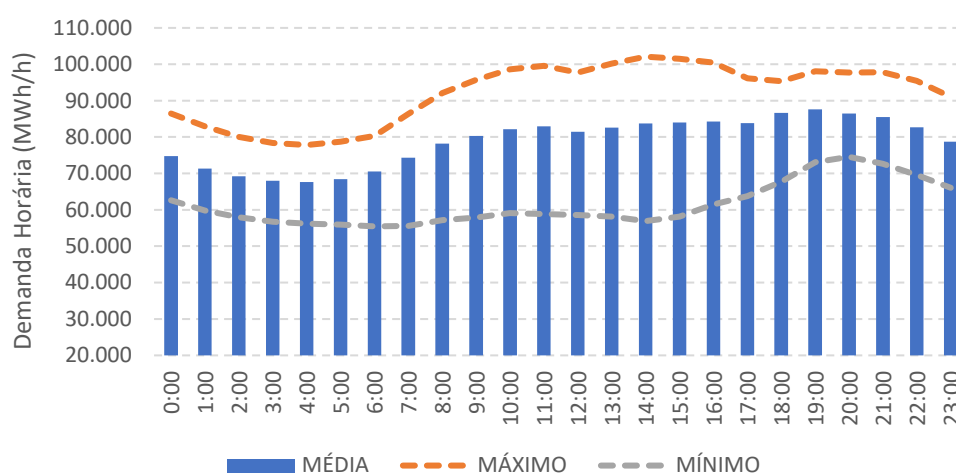
Os dados referentes à demanda horária fornecem uma visão clara sobre o comportamento do consumo de energia elétrica ao longo do dia, permitindo que operadores do sistema elétrico, planejadores e formuladores de políticas tomem decisões mais eficientes e seguras. Compreender como a demanda média, máxima e mínima se comporta em cada horário é essencial para garantir o equilíbrio entre oferta e consumo de energia, evitando sobrecargas e apagões.

O conhecimento desse perfil de demanda permite otimizar o despacho das usinas geradoras, reduzindo custos operacionais e promovendo o uso mais racional dos recursos energéticos. Por exemplo, em horários de baixa demanda, pode-se priorizar fontes

renováveis e menos custosas, enquanto nos horários de pico, é necessário acionar usinas de resposta rápida, muitas vezes mais caras ou poluentes.

De modo geral, o perfil diário indica uma demanda baixa durante a madrugada, crescimento constante ao longo do dia, e um pico de consumo no fim da tarde e início da noite, refletindo o comportamento típico do uso de energia elétrica por residências, comércios e indústrias.

Gráfico 9 - Curva de Carga Horária no Ano de 2024



Fonte: ONS, 2025

Durante a madrugada, entre 2:00 e 5:00, os valores médios são os mais baixos do dia, variando entre 67 e 69 GWh/h, o que indica um consumo reduzido nesse período. A partir das 6:00, observa-se um aumento progressivo na demanda média, que acompanha o início das atividades comerciais, industriais e residenciais (ONS, 2025).

Esse crescimento se intensifica ao longo da manhã e atinge seu auge entre 15:00 e 19:00. O maior valor de demanda média é registrado às 19:00, com 87,6 GWh/h, destacando o pico de consumo no início da noite, quando há maior uso simultâneo de energia em residências e empresas. Após esse horário, a média começa a diminuir gradualmente, fechando o dia com 78,7 GWh/h às 23:00 (ONS, 2025).

3.4 Panorama Brasileiro de Comercialização de Carros Elétricos

O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) é uma iniciativa coordenada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) em parceria com o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo

e do Gás Natural (Conpet). Esta iniciativa tem o objetivo de fornecer aos consumidores informações claras e confiáveis sobre todos os veículos comercializados no Brasil, classificando-os de forma tabular de acordo com seu desempenho ambiental e sua eficiência energética (consumo de combustível).

Com base na atualização de 31 de dezembro de 2024, a tabela abaixo apresenta a quantidade de modelos de veículos comercializados no Brasil de acordo com o tipo de propulsão:

Tabela 1 - Total de modelos de veículos por tipo de propulsão nos últimos 3 anos

Tipo de Propulsão	Quantidade de Modelos		
	2022	2023	2024
Elétricos (VE)	60	106	165
Plug-in (VEHP)	47	76	130
Híbridos	167	135	159
Flex	273	367	370
Gasolina	284	313	421
Diesel	169	175	236

Fonte: PBEV, 2025

Os dados revelam um crescimento expressivo no número de modelos eletrificados, especialmente os veículos elétricos a bateria (VE), que saltaram de 60 modelos em 2022 para 165 em 2024, representando um crescimento de mais de 175% em apenas dois anos. Os modelos plug-in (VEHP) também apresentaram uma evolução significativa, passando de 47 para 130 modelos no mesmo período.

Essa expansão indica um movimento claro do setor automotivo rumo à eletromobilidade, impulsionado por avanços tecnológicos, políticas de incentivo à descarbonização e uma crescente conscientização ambiental por parte dos consumidores.

Dos 165 modelos de veículos elétricos disponíveis para comercialização no país, a AUTOO — revista online especializada em notícias, avaliações e comparativos do setor automotivo — divulgou os modelos mais vendidos no Brasil em 2024. Com base nesses dados e nas informações do PBEV, apresentam-se as principais características dos 15 veículos elétricos com maior adesão no mercado.

Tabela 2 - Eficiência energética dos 14 modelos elétricos mais vendido no Brasil no ano de 2024

Vendas	Marca	Modelo	Cidade (km/l eq)	Estrada (km/l eq)	Consumo energético (MJ/km)	Autonomia no modo elétrico (km)
21.945	BYD	Dolphin Mini	58,6	41,9	0,41	280
15.201	BYD	Dolphin	51,9	43,5	0,42	291
6.326	GWM	Ora 03	42,4	36,5	0,51	319
3.522	BYD	Seal	34,9	30,5	0,62	372
2.870	BYD	Yuan Plus	39,8	33,1	0,56	294
2.748	Volvo	EX30	40,1	33,9	0,55	250
1.227	JAC	E-JS1	46,6	35,0	0,50	181
1.050	Renault	E-Kwid	52,7	39,6	0,44	185
804	Volvo	XC40	42,8	36,0	0,51	367
776	Volvo	C40	35,8	32,0	0,60	353
374	JAC	EJV5.5	38,0	27,4	0,63	260
362	Ford	E-Transit	22,5	16,9	1,04	193
351	Peugeot	e-2008	38,0	35,1	0,55	234
252	BMW	iX1	35,3	29,0	0,63	303

Fonte: AUTOO, 2025 / PBEV, 2025

A Tabela 2 apresenta os 14 modelos de veículos elétricos mais vendidos no Brasil em 2024, com destaque para a liderança da BYD, que ocupa quatro posições entre os cinco primeiros colocados — incluindo o Dolphin Mini, com 21.945 unidades comercializadas. Os dados mostram uma diversidade de marcas e desempenhos, evidenciando variações significativas em eficiência energética e autonomia.

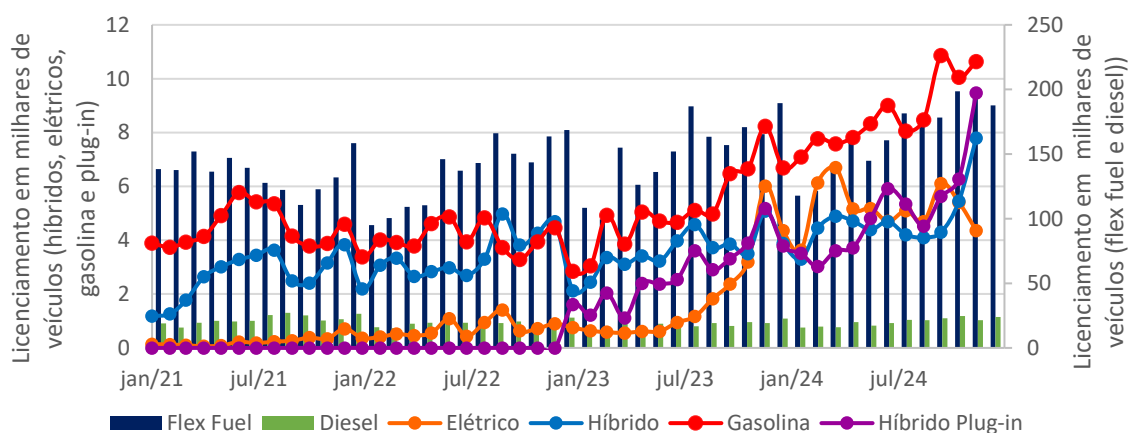
Complementando esse panorama, a ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores) desempenha um papel estratégico no desenvolvimento do setor automotivo brasileiro. Como entidade representativa da indústria, atua diretamente nas questões de regulamentação, políticas industriais, inovações tecnológicas, sustentabilidade e comércio exterior. Além disso, é responsável pela divulgação de dados mensais sobre produção, vendas, exportações e licenciamento de veículos, fornecendo subsídios essenciais para análises de mercado e formulação de políticas públicas voltadas à mobilidade e à transição energética no setor.

O licenciamento de um automóvel é um procedimento obrigatório no Brasil que permite que o veículo circule legalmente pelas vias públicas. Esse processo comprova que o veículo está em conformidade com as exigências de segurança, ambientais e fiscais

estabelecidas pelo governo. Logo, podemos considerar que um carro licenciado é um carro que circulará pelas vias públicas brasileiras.

A série histórica disponibilizada permite observar a quantidade de automóveis leves licenciados por tipo de combustível no Brasil desde 2012. Nos anos iniciais, entre 2012 e 2020, os dados referentes a veículos híbridos e elétricos eram apresentados de forma agregada, em razão da ainda limitada participação dos modelos totalmente elétricos no mercado.

Gráfico 10 - Licenciamento de Veículos Jan/21 – Dez/24



Fonte: ANFAVEA, 2025

O Gráfico 10 evidencia a evolução do licenciamento acumulado de veículos leves no Brasil entre janeiro de 2021 e dezembro de 2024, com destaque para as diferentes tecnologias de motorização: gasolina, diesel, flex fuel, híbridos, híbridos plug-in e elétricos.

Os combustíveis tradicionais, flex fuel e diesel, continuam representando os maiores volumes de licenciamento. O flex fuel lidera amplamente, com crescimento constante desde 2021 e atingindo cerca de 7 milhões de unidades acumuladas ao longo do período. O diesel, embora em menor volume, também apresenta expansão contínua, alcançando aproximadamente 950 mil unidades no mesmo intervalo de tempo. Já os veículos a gasolina apresentam crescimento mais modesto, totalizando 265 mil unidades ao final da série.

No segmento de veículos eletrificados, observa-se uma tendência clara de aceleração, especialmente a partir de 2023. Os híbridos convencionais somam 172 mil unidades acumuladas de janeiro de 2021 até o final de 2024, sendo os mais representativos

entre os eletrificados. Já os híbridos plug-in apresentam uma curva de crescimento mais intensa nos dois últimos anos que totalizam 92 mil unidades.

Os veículos elétricos puros apresentaram uma trajetória de expansão significativa, alcançando também a marca de 92 mil unidades licenciadas ao final do período analisado. Esse salto se torna ainda mais relevante ao se observar a intensificação do crescimento a partir do segundo semestre de 2023. Esse comportamento da curva indica que essa tecnologia vem conquistando espaço de forma cada vez mais acelerada, impulsionada por fatores como redução de custos, ampliação da infraestrutura de recarga, incentivos governamentais e uma crescente demanda por soluções ambientalmente responsáveis.

3.4.1 Incentivos à Eletromobilidade no Brasil

A eletromobilidade no Brasil tem se beneficiado de uma série de incentivos fiscais, que visam estimular a aquisição e o uso de veículos elétricos e híbridos. Esses incentivos, predominantemente de caráter estadual e municipal, buscam reduzir a carga tributária e, conseqüentemente, o custo final desses veículos para o consumidor, bem como os custos operacionais associados.

Um dos principais mecanismos de desoneração é o Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) que ocorre em alguns estados como Alagoas, Amapá, Maranhão, Minas Gerais, Pernambuco, entre outros (MONTIOIA, 2025). No âmbito federal, o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) também foi objeto de incentivos (BRASIL, 2018). Por meio do programa Rota 2030⁴, são concedidos benefícios fiscais para montadoras que investem na produção de veículos com menor emissão de CO₂, o que inclui os veículos elétricos e híbridos.

3.4.2 Infraestrutura de Recarga

Apesar da crescente expansão da mobilidade elétrica no Brasil, o país ainda não possui uma padronização formal para os conectores de veículos elétricos. Atualmente, o mercado nacional apresenta uma variedade de tipos, incluindo CCS Tipo 1, Tipo 2, GB/T e CHAdeMO (PNME, 2024).

⁴ O Programa Rota 2030 é uma política industrial de longo prazo do governo brasileiro, criada em 2018, com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento, a competitividade e a sustentabilidade do setor automotivo e sua cadeia de valor no Brasil. O programa estabelece metas e incentivos para o setor, visando a modernização da indústria automotiva e a sua integração em escala global.

Tabela 3 - Tipos de Carregadores para VEs

Tipo de Carregador	Potência	Velocidade de recarga	Padrão do Carregador	Características	Popularidade
Tipo 1 (SAE J1772)	3.7 kW (CA) ou 7.4 kW (CA)	Lenta		Conector de três pinos, construído para energia AC monofásica e bifásica.	Estados Unidos
Tipo 2 (IEC 62196)	De 7 kW até 22 kW (CA)	Lenta a Semi rápida		Possui mais pinos que o Tipo 1 para permitir o carregamento trifásico.	Europa
GB/T	Até 22 kW (CA) Até 250 kW (CC)	Semi rápida (CA) Ultrarrápida (CC)		Aparência similar ao Tipo 2, mas não é compatível.	China
CHADEMO	Até 400 kW (CC)	Ultrarrápida		Um dos primeiros padrões de carregamento rápido.	Japão

Fonte: PNME, 2024 / MOURA, 2023

De acordo com o PNME (2024), até agosto de 2024 o Brasil contava com 10.622 estações de recarga públicas e semipúblicas para veículos elétricos. Esse número representa um aumento significativo em comparação com as 350 estações disponíveis em dezembro de 2020.

No país, a maioria dessas estações, 89% (9.506 unidades), são do tipo CA (corrente alternada), que oferece recarga lenta, enquanto 11% (1.109 unidades) são do tipo CC (corrente contínua), para recarga rápida.

A distribuição geográfica dos eletropostos no Brasil é desigual. As regiões metropolitanas, como São Paulo, e a Região Sul concentram a maior parte das estações de recarga. Em São Paulo, há 27,25 eletropostos públicos para cada 1 milhão de habitantes, e na Região Sul, 32,50. Por outro lado, a Região Sudeste (excluindo São Paulo) tem 14,90 eletropostos por milhão de habitantes, o Nordeste apenas 7,4, e as regiões Norte e Centro-Oeste juntas somam 7,8 eletropostos por milhão de habitantes.

3.4.3 Recarga Inteligente

A adoção em larga escala de veículos elétricos exige a disponibilidade de uma infraestrutura de carregamento robusta e, crucialmente, o gerenciamento eficiente da carga para evitar sobrecarregar a rede elétrica. A recarga não coordenada, na qual os VEs

são carregados simultaneamente durante os horários de pico, pode ter efeitos prejudiciais na rede de energia, como instabilidade de tensão, distorções harmônicas e perdas de energia (DEB, 2022).

A recarga inteligente é uma solução eficaz para esse problema, pois oferece um controle adaptável sobre o processo de carregamento. Um carregador inteligente pode ajustar a potência de carregamento com base na disponibilidade de energia da rede, nas necessidades do usuário e até mesmo fornecer serviços de suporte à rede em emergências. Essa abordagem permite que os VEs atuem como recursos flexíveis para a rede, oferecendo serviços de suporte e ajudando a mitigar os impactos negativos do carregamento em massa.

4. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem predominantemente quantitativa, buscando analisar de forma sistemática os dados relacionados à capacidade instalada brasileira, à geração e consumo de energia elétrica, e ao panorama da eletromobilidade no país.

Para tanto, a metodologia empregada foi estruturada de modo a permitir a compilação, o tratamento e a interpretação de dados secundários, essenciais para a fundamentação dos cálculos e embasamentos teóricos. Esses dados subsidiarão a realização de projeções futuras, viabilizando uma posterior análise do impacto da eletromobilidade na matriz energética e na demanda por energia elétrica a curto, médio e longo prazo, e contribuindo para uma visão estratégica do desenvolvimento sustentável no setor.

4.1 Estimativa da Capacidade Instalada Brasileira

Para estimar a capacidade instalada do sistema elétrico brasileiro nos horizontes de 2030, 2040 e 2050, serão aplicadas duas metodologias distintas e complementares. Cada uma dessas abordagens foi selecionada com base em seu grau de robustez analítica, sua aderência à realidade energética brasileira e seu reconhecimento em instituições de planejamento energético e na literatura especializada.

As duas metodologias serão utilizadas de forma complementar para construir um conjunto robusto e transparente de projeções da capacidade instalada elétrica brasileira. A primeira abordagem oferece uma visão quantitativa baseada em cenários

parametrizados, enquanto a segunda traz a perspectiva oficial de planejamento de longo prazo.

4.1.1 Metodologia Simples por Cenários

A primeira abordagem consiste em uma modelagem simples baseada na definição de cenários projetivos. Essa metodologia utiliza como variável-chave a demanda anual de energia elétrica, cuja evolução é projetada com base em cinco cenários macroeconômicos: regressão, estacionário, conservador, base e acelerado. Cada cenário define um intervalo de taxa de crescimento anual, permitindo maior flexibilidade para captar incertezas e oferecer uma análise de sensibilidade mais realista. A seguir, apresenta-se a definição dos cinco cenários considerados.

Tabela 4 - Cenários para Projeção da Capacidade Instalada

Cenário	Justificativa	Taxa Anual Média de Crescimento
Regressão	Contração estrutural ou crise prolongada	Menor que -0,6%
Estacionário	Estagnação econômica, maturidade de consumo	De -0,5% a 0,5%
Conservador	Crescimento econômico lento	De 0,6% a 1,5%
Base	Crescimento moderado e políticas de continuidade	De 1,6% a 3,5%
Acelerado	Eletrificação e transição energética aceleradas	Maior que 3,5%

Fonte: Elaboração própria

A definição dos intervalos foi realizada com base em estudos prospectivos nacionais e internacionais, priorizando a coerência com projeções oficiais, dados históricos do setor elétrico e referências da literatura especializada. Assim, cada cenário abrange uma faixa de valores possível, contemplando variações de contexto econômico, grau de eletrificação da economia, maturidade de consumo e tendências de transição energética.

O cenário Base adota um intervalo de crescimento anual entre 1,6% e 3,5%, alinhado com as projeções médias do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (EPE, 2024) e do Plano Nacional de Energia 2050 (MME/EPE, 2020), elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Estes documentos projetam um crescimento consistente da demanda na faixa de 2,5% ao ano, considerando a continuidade das políticas públicas e a manutenção do desempenho histórico do setor elétrico brasileiro.

Para o cenário Conservador, o intervalo selecionado varia de 0,6% a 1,5% ao ano, o que representa uma expansão modesta da demanda elétrica, abaixo da média histórica. Esse patamar é suficiente para análises de sensibilidade em contextos de baixo dinamismo econômico, com investimentos limitados e menor projeção de consumo.

Já o cenário Acelerado foi definido com uma faixa de crescimento acima de 3,5% ao ano, superior às médias históricas, refletindo estudos e cenários internacionais que consideram uma forte aceleração da eletrificação, maior penetração de tecnologias limpas e a ampliação de políticas de descarbonização em setores intensivos em energia, como transporte e indústria (IEA, 2024b). O International Energy Agency (IEA), no relatório Net Zero by 2050 (IEA, 2021), também aponta taxas semelhantes para trajetórias alinhadas a metas climáticas mais ambiciosas.

Além disso, são previstos dois cenários adicionais para ampliar o intervalo de análise. O cenário Estacionário cobre uma faixa entre -0,5% e 0,5%, representando estagnação econômica de longo prazo ou maturidade de consumo. Já o cenário Regressão explora os extremos negativos, simulando uma forte contração estrutural da demanda ou a ocorrência do descomissionamento de usinas, com impactos significativos sobre a geração de energia elétrica de determinada fonte. Para esse caso, a faixa projetada situa-se abaixo de -0,5% ao ano. A utilização desses cinco cenários permite avaliar de forma ampla os possíveis caminhos da expansão elétrica brasileira até 2050, oferecendo um intervalo robusto para projeções e análises de risco associadas ao setor.

A equação utilizada para estimar a capacidade instalada futura é uma fórmula amplamente empregada em projeções de crescimento, derivada do conceito de crescimento composto, conhecido como Crescimento Composto Anual (CAGR – Compound Annual Growth Rate). Essa fórmula é frequentemente aplicada em estudos econômicos, financeiros e de energia para representar a evolução de uma variável ao longo do tempo com base em uma taxa constante de crescimento anual. O uso deste modelo permite projetar de forma simplificada, mas consistente, o crescimento acumulado da capacidade instalada ao longo dos anos, considerando a variação percentual anual.

$$Capacidade\ Instalada_{ano} = Capacidade\ Base \times (1 + g)^n \quad (Equação\ 1)$$

Onde:

Capacidade Base = capacidade instalada de referência (neste estudo, o ano-base é 2025)

g = taxa de crescimento da capacidade instalada por fonte

n = quantidade de anos necessária para chegar até a projeção desejada

A aplicação da fórmula será feita individualmente para cada fonte de geração e a taxa de crescimento aplicada terá como fundamentação o perfil histórico nos últimos 10 anos.

4.1.2 Metodologia Baseada no PDE 2034 e no PNE 2050

A segunda metodologia fundamenta-se na combinação das projeções apresentadas pelo PDE 2034 e pelo PNE 2050. O PDE oferece uma visão detalhada de curto e médio prazo para o setor elétrico brasileiro, enquanto o PNE amplia esse horizonte para o longo prazo, consolidando diretrizes estratégicas para a matriz elétrica nacional. Entre os materiais disponibilizados pelo PNE, destaca-se o caderno técnico Oferta de Energia Elétrica, que apresenta 64 cenários distintos de evolução da capacidade instalada, considerando diferentes ritmos de crescimento econômico, restrições regulatórias, inovações tecnológicas e políticas energéticas.

Para este estudo, será utilizada como base a série histórica e prospectiva fornecida pelo PDE 2034, à qual se aplicará a técnica de interpolação polinomial com o objetivo de estender as projeções até 2050 para cada fonte de geração analisada (hidráulica, gás natural, derivados do petróleo, carvão, nuclear, biomassa, eólica, solar centralizada e solar MMGD). A interpolação polinomial foi escolhida por ser uma ferramenta capaz de captar variações não lineares e dinâmicas de longo prazo, oferecendo uma estimativa mais fiel das trajetórias de crescimento de cada tecnologia. Entre os tipos de interpolação existentes, destaca-se pela flexibilidade em ajustar curvas a padrões mais complexos de dados históricos, evitando distorções que poderiam ocorrer com métodos lineares ou médias simples.

Além disso, o grau de cada polinômio (linear, quadrático, cúbico ou exponencial) será definido considerando o comportamento observado nas projeções oficiais do PNE 2050, buscando alinhamento entre a base estatística ajustada e as expectativas setoriais de longo prazo. Dessa forma, assegura-se que as curvas de projeção reflitam tendências realistas de evolução tecnológica, expansão de capacidade e restrições setoriais, servindo de base robusta para estimativas futuras da matriz elétrica nacional.

4.2 Estimativa da Geração de Energia Elétrica

Após a análise da evolução da capacidade instalada no sistema elétrico brasileiro, torna-se necessário estimar a quantidade de energia que será efetivamente gerada ao longo dos períodos projetados. Essa estimativa é fundamental para avaliar a segurança energética, o atendimento à demanda futura e o papel de cada fonte na matriz elétrica nacional.

Para realizar essa projeção de forma robusta e metodologicamente consistente, serão utilizadas duas abordagens complementares. A primeira baseia-se no desempenho histórico das usinas por meio do fator de capacidade, enquanto a segunda utiliza dados de referência internacionais disponibilizados pelo World Energy Outlook 2024, da IEA. A seguir, cada metodologia será detalhada.

4.2.1 Estimativa de Geração de Energia com Base no Fator de Capacidade Histórico

A primeira metodologia adotada para estimar a geração de energia nos períodos em análise será fundamentada no cálculo do fator de capacidade das usinas nos últimos dez anos. O fator de capacidade representa a relação entre a energia efetivamente gerada por uma usina e a energia máxima que poderia ser produzida caso esta operasse continuamente em sua capacidade nominal.

Para cada fonte de geração, será calculada a média histórica dos fatores de capacidade no período mencionado. Em seguida, estes índices médios serão aplicados aos dados de capacidade instalada projetados no tópico anterior, permitindo a obtenção de uma estimativa da energia gerada por fonte ao longo do horizonte temporal estudado. Esta abordagem proporciona uma estimativa baseada no desempenho real das usinas, considerando as particularidades operacionais e as limitações práticas de cada tecnologia.

4.2.2 Projeção de Geração de Energia com Base em Relatórios Internacionais

A segunda abordagem adotada para estimar a geração de energia elétrica no Brasil baseia-se nas projeções disponibilizadas pelo World Energy Outlook 2024 (WEO, 2024), publicação oficial da Agência Internacional de Energia (IEA). O relatório apresenta dados consolidados de geração total de eletricidade por divisões geográficas, bem como sua discriminação por principais fontes energéticas para os anos de 2030, 2035 e 2050.

No caso brasileiro, o relatório apresenta projeções detalhadas para fontes específicas, como energia solar, eólica, gás natural, carvão mineral e nuclear. Além disso, indica o montante total de geração proveniente de fontes renováveis de forma agregada. No entanto, não há distinção explícita para as fontes hidráulica, biomassa e derivados de petróleo.

Para contornar essa limitação, adotou-se o seguinte procedimento metodológico: a parcela da geração renovável que não está associada à energia solar ou eólica foi atribuída ao conjunto formado por hidrelétricas e biomassa. A divisão interna entre essas duas fontes considerou a proporção observada na capacidade instalada nacional em 2024, na qual aproximadamente 87% correspondem à fonte hidráulica e 13% à biomassa. Quanto à geração a partir de derivados de petróleo, esta foi estimada como o volume residual, após subtrair do total de geração os valores associados às fontes renováveis, gás natural, carvão e nuclear.

Como o objetivo do estudo contempla, além dos anos de 2030 e 2050, também o ano de 2040 — não diretamente disponibilizado no relatório —, foram ajustadas curvas de tendência para cada uma das fontes com base nos dados fornecidos. A partir dessas curvas, foi possível estimar os valores intermediários para 2040, preservando a coerência com o comportamento projetado pela IEA.

4.3 Estimativa de Emissões de CO₂eq

Para estimar as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) relacionadas à geração de energia elétrica no horizonte projetado, será utilizada a projeção anual de geração por fonte em cada um dos cenários descritos anteriormente. As emissões totais são obtidas pela multiplicação da geração projetada (em kWh) pelos respectivos fatores de emissão medianos de CO₂eq de cada fonte de energia elétrica.

Os valores medianos de emissão utilizados foram extraídos de uma consolidação de estudos e relatórios técnicos, abrangendo diferentes abordagens de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), incluindo o Sixth Assessment Report do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), o relatório Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment (UNECE, 2022) e o Informativo Técnico nº 11/2022 da EPE. Essa combinação de fontes garante maior robustez metodológica e representatividade dos fatores de emissão utilizados. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Fator de Emissão de CO₂eq por Fonte de Energia

Fonte	Fator de Emissão [tCO ₂ eq/MWh]
Hidráulica	0,005
Gás Natural	0,490
Derivados de Petróleo	0,600
Carvão	0,820
Nuclear	0,012
Biomassa	0,080
Eólica	0,012
Solar Centralizada	0,027

Fonte: Elaboração própria

4.4 Capacidade da Bateria e Consumo de Energia Elétrica

A autonomia de um carro elétrico é uma estimativa da distância que ele pode percorrer utilizando um ciclo completo de recarga de bateria levando em consideração uma rota mista (urbana e intermunicipal). Ela pode variar devido a diversos fatores:

- Capacidade da bateria: A capacidade da bateria é o principal fator determinante da autonomia de um veículo elétrico. Quanto maior sua capacidade de armazenamento de energia, maior será a distância que o veículo poderá percorrer;
- Eficiência do veículo: Veículos mais eficientes consomem menos energia por quilômetro percorrido. Nos dados fornecidos pelo PBEV, este valor é fornecido em [MJ/km].
- Condições de condução: Fazer acelerações rápidas, conduzir em altas velocidades e frenagens abruptas são fatores que tendem a consumir maior quantidade de energia. Conduzir de forma suave e linear ajuda a maximizar a autonomia;
- Condições climáticas: Temperaturas muito extremas tendem a reduzir a eficiência da bateria no dia a dia;
- Uso de acessórios: A utilização de ar-condicionado, aquecedor e sistemas de entretenimento também causam um pouco de impacto na eficiência.

Sabendo a autonomia e o consumo energético dos veículos elétricos, é possível estimar o consumo energético por ciclo (em kWh) de cada modelo comercializado no Brasil. Para isso, basta converter o consumo energético tabelado no PBEV em consumo de energia elétrica e multiplicar pela autonomia do modelo, como apresentado na equação a seguir.

$$CPC = \frac{CE \times A}{3,6} \quad (\text{Equação II})$$

Onde:

CPC – Consumo Por Ciclo [kWh]

CE – Consumo energético [MJ/km]

A – Autonomia [km]

O consumo por ciclo fornece o quanto de energia elétrica será necessário para realizar uma recarga de ciclo completa em cada modelo. Para descobrir o impacto da quantidade de energia elétrica consumida no SIN, é necessária uma métrica que defina a periodicidade que as recargas são realizadas.

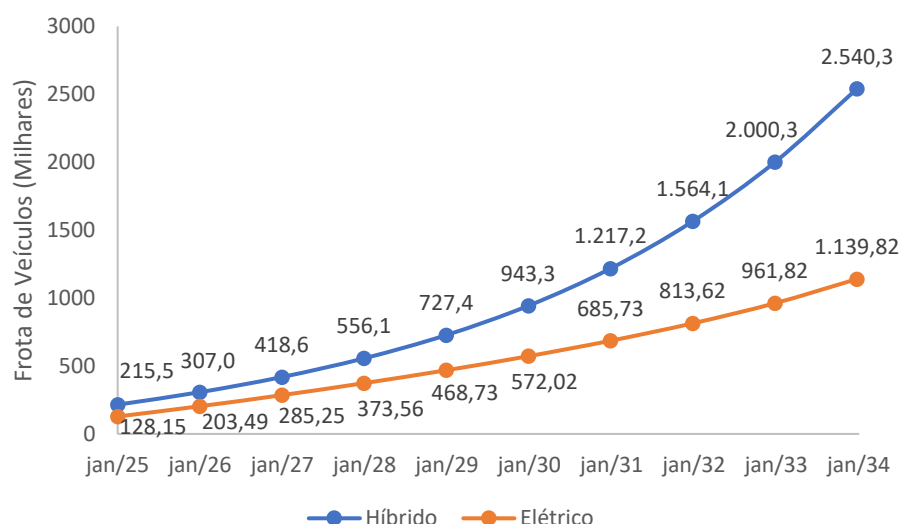
Segundo notícia publicada em 2019 pela empresa KBB Brasil (MERCANTIL, 2019), empresa especializada em pesquisas no setor automotivo, os brasileiros costumam percorrer em média cerca de 12.900km no primeiro ano de utilização do veículo.

Dessa forma, para estimar a demanda energética anual para recarga da frota de veículos elétricos no Brasil, será primeiramente determinado o consumo energético médio ponderado de cada modelo, considerando sua respectiva participação na frota. Com base neste consumo médio e nos 12.900 km anuais percorridos pelos brasileiros, será então calculado o consumo total de energia necessário para atender à demanda de recarga desses veículos no período de um ano.

4.5 Projeção de Veículos Elétricos

De acordo com o Caderno de Demanda de Energia dos Veículos Leves: 2025–2034 (MME/EPE, 2024), o licenciamento de veículos híbridos e elétricos deverá apresentar crescimento expressivo ao longo dos próximos anos, alcançando, em 2034, uma participação estimada de 5,3% e 2,4% da frota total de veículos leves no Brasil, respectivamente.

Gráfico 11 - Projeção da Frota de Veículos Híbridos e Elétricos de 2024 – 2033



Fonte: MME/EPE, 2024

Ao comparar o cenário mais recente divulgado em 2024 com a projeção realizada pela EPE em 2023 (MME/EPE, 2023b), observa-se que as expectativas foram superadas. Na versão anterior, a projeção indicava uma frota de aproximadamente 408 mil veículos elétricos para janeiro de 2033. No entanto, no mesmo período, o novo estudo aponta uma frota real de cerca de 961 mil veículos eletrificados, representando uma variação de 135%. O crescimento exponencial da frota de veículos elétricos, impulsionado por incentivos governamentais e o custo-benefício dos VEs, está sempre superando as projeções feitas e vêm tornando desafiadora a previsão futura desse mercado.

Para ampliar essas estimativas até 2050, assim como na metodologia aplicada para a capacidade instalada, será empregada a técnica de interpolação polinomial. Essa abordagem nos permitirá obter equações gráficas que representam de forma mais precisa a dinâmica esperada desse crescimento, fornecendo uma base robusta para a comparação entre diferentes cenários e a análise de seus respectivos coeficientes R-Quadrados.⁵

Para a análise, serão gerados dois polinômios distintos: um derivado apenas dos dados de licenciamento registrados até dez/24, conforme apresenta Gráfico 10, e outro a

⁵ R-quadrado (ou coeficiente de determinação, representado como R^2) é uma medida estatística utilizada para avaliar a qualidade do ajuste de um modelo de regressão em relação aos dados observados. Ele indica a proporção da variação total de uma variável dependente que pode ser explicada pelas variáveis independentes no modelo. Quanto mais próximo de 1 (ou 100%), maior será a precisão do ajuste.

partir das projeções já realizadas pela EPE, de acordo com o Gráfico 11, sendo necessário apenas estender as projeções até o período de 2050.

Paralelamente a essas curvas de crescimento brasileiras, será incorporado como comparativo a trajetória de vendas de veículos elétricos a bateria na China. Este país foi escolhido como parâmetro por ser amplamente reconhecido como uma referência global no avanço e na massificação de veículos elétricos, oferecendo um cenário robusto para avaliar o potencial e as tendências do mercado brasileiro.

5. Resultados

Esta seção apresenta os resultados detalhados obtidos a partir da aplicação da metodologia definida. Serão expostas as estimativas relativas à capacidade instalada brasileira e à geração de energia elétrica. Além desses dados, como foco central, e principal parâmetro que definirá o real impacto na matriz energética, será calculada a projeção da frota de veículos elétricos e o consumo de energia associado à recarga de suas baterias, onde serão apresentadas as curvas modeladas, incluindo os polinômios desenvolvidos a partir de diferentes fontes de dados, e sua comparação com a trajetória de crescimento do mercado chinês. Esses resultados quantificam e ilustram os dados cruciais que fundamentarão a discussão e as conclusões do presente estudo.

5.1 Projeção da Capacidade Instalada

A projeção da capacidade instalada para as diferentes fontes de geração de energia no Brasil ao longo dos períodos analisados foi realizada com base nas premissas metodológicas previamente estabelecidas. As estimativas foram construídas de forma a refletir tanto as tendências históricas quanto as perspectivas de expansão do setor, considerando cenários consistentes com o contexto nacional e internacional. Os resultados apresentados a seguir possibilitam avaliar a evolução esperada da matriz elétrica brasileira, fornecendo subsídios para as análises subsequentes relacionadas à geração de energia e à participação de cada fonte no atendimento à demanda futura.

5.1.1 Simples por Cenário

Para a projeção da capacidade instalada futura das diferentes fontes de geração no Brasil, foi realizada uma análise baseada no comportamento histórico de expansão entre os anos de 2014 e 2024. Embora as taxas médias anuais de crescimento possam ser

obtidas por cálculos estatísticos diretos, este estudo adota taxas anuais variáveis conforme os cenários estabelecidos. Essa abordagem garante coerência com referências oficiais, assegura a comparabilidade entre as trajetórias simuladas e reflete as particularidades do setor energético brasileiro.

Além disso, dado que a geração distribuída é composta majoritariamente por sistemas solares fotovoltaicos (mais de 99%), optou-se por desagregar a energia solar em Solar MMGD e Solar Centralizada, permitindo um maior detalhamento técnico das projeções.

Abaixo segue o detalhamento da escolha da taxa de crescimento para cada uma das fontes.

- Hidráulica – 1,0% (Conservador): A expansão da geração hidrelétrica caminha para um estágio de consolidação, em virtude de restrições socioambientais, aumento da complexidade de licenciamento e altos custos para novos grandes empreendimentos. O crescimento tende a ocorrer de forma lenta, focado na modernização de usinas existentes, reabilitação de equipamentos e incremento de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs).
- Gás Natural – 3,5% (Acelerado): O gás natural deve manter expansão mais expressiva em comparação com outras fontes fósseis, principalmente por seu papel de fonte de transição na matriz elétrica brasileira. Sua utilização como backup justifica uma taxa de crescimento mais elevada, embora ainda na contramão do contexto de redução gradual de emissões.
- Derivados de Petróleo – -5,5% (Regressão): O uso de derivados de petróleo para geração elétrica tende a reduzir-se drasticamente, refletindo o descomissionamento de plantas obsoletas, o elevado custo operacional, os compromissos climáticos assumidos pelo país e a competição com fontes mais limpas e baratas.
- Carvão – -2,5% (Estacionário): A geração termelétrica a carvão mineral também sofrerá uma tendência de declínio em função de metas de descarbonização, mas com uma taxa menos acentuada que os derivados de petróleo. Isso porque essa fonte é opção mais estável e barata para compor a geração de base.
- Nuclear – 0,0% (Estacionário): O setor nuclear brasileiro segue em ritmo constante, com capacidade instalada inalterada no horizonte de curto e médio

prazo. Novos projetos enfrentam longos prazos de maturação e altos custos de implantação, justificando a manutenção da taxa estacionária.

- Biomassa – 2,5% (Base): biomassa continuará a ter papel importante como fonte renovável complementar, especialmente em regiões agrícolas com disponibilidade de resíduos. A expansão será estável, impulsionada por oportunidades de cogeração, mas limitada pela concorrência com outras fontes renováveis e pela disponibilidade de matéria-prima.
- Eólica – 5,5% (Acelerado): A energia eólica permanece como uma das fontes mais promissoras da matriz elétrica, impulsionada por forte expansão no mercado onshore e perspectivas de avanço em projetos offshore. Tecnologias mais eficientes, queda de custos e grande potencial ainda inexplorado justificam a aplicação da maior taxa de crescimento.
- Solar Centralizada – 5,0% (Acelerado): A geração solar centralizada, que impulsionou grande parte do crescimento renovável na última década, continuará em expansão robusta. A tendência é de consolidação de novos grandes projetos fotovoltaicos, integração ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e ampliação de leilões de energia de reserva.
- Solar MMGD – 4,0% (Acelerado): A geração solar distribuída, especialmente no segmento de micro e minigeração, deve continuar crescendo de forma acelerada, impulsionada pelo interesse dos consumidores em reduzir custos, pela expansão do crédito e pelas políticas de incentivo à geração descentralizada.

Com as taxas definidas, aplicou-se a Equação I para estimar a capacidade instalada (em MW) de cada fonte nos anos de referência, projetando diferentes cenários de expansão coerentes com as tendências do setor energético brasileiro.

Tabela 6 - Projeção Simples da Capacidade Instalada em MW por Cenários

Fonte	2030	2040	2050
Hidráulica	116.685	128.893	142.378
Gás Natural	22.020	31.062	43.816
Derivados de Petróleo	4.679	2.658	1.509
Carvão	2.651	2.058	1.598
Nuclear	1.990	1.990	1.990
Biomassa	19.067	24.407	31.243
Eólica	40.745	69.598	118.883
Solar Centralizada	16.853	27.452	44.717
Solar MMD	45.415	67.225	99.510
Total	270.105	355.343	485.644

Fonte: Elaboração própria

5.1.2 Com Base no PNE 2050

Com base na combinação das projeções do PDE 2034 e das informações de longo prazo do PNE 2050, foi possível obter uma estimativa mais robusta da evolução da capacidade instalada no Brasil para as próximas décadas. A aplicação de técnicas de interpolação polinomial a permitiu projetar a partir de 2034, de forma ajustada ao comportamento recente e às expectativas oficiais, os valores para cada tipo de fonte de geração elétrica.

Dessa forma, a Tabela 7 apresenta os resultados consolidados para os anos de 2030, 2040 e 2050, refletindo uma estimativa alinhada às tendências setoriais, aos avanços tecnológicos e às restrições regulatórias que podem influenciar a expansão ou a estabilidade de cada tecnologia ao longo do período analisado.

Tabela 7 - Projeção da Capacidade Instalada com Base no PDE 2034 e no PNE 2050

Fonte	Polinômio de Projeção	Capacidade Instalada (MW)		
		2030	2040	2050
Hidráulica	$y = 0,0223x^2 + 91,53x - 93940,03$	116.410	125.096	129.741
Gás Natural	$y = 1,843x - 3816,09$	24.375	43.209	61.637
Derivados de Petróleo	$y = -0,01189x + 24,68$	537	425	306
Carvão	$y = 1,611 \cdot 10^{86} \cdot 0,906998^x$	1.202	529	199
Nuclear	$y = -0,0082x^2 + 33,42x - 34093,13$	3.395	3.395	3.395
Biomassa	$y = 0,011x^2 - 44,88x + 45335,80$	17.641	21.124	26.771
Eólica	$y = 0,1667x^2 - 675,23x + 683,679,13$	37.516	71.488	138.437
Solar Centralizada	$y = 0,07x^2 - 283,55x + 287521,5$	21.094	32.853	43.101
Solar MMGD	$y = -0,057x^2 + 232,32x - 238608,58$	57.987	80.177	91.446
Total	-	280.158	378.297	495.033

Fonte: Elaboração própria

5.2 Projeção da Geração de Energia Elétrica

As estimativas de geração de energia elétrica no Brasil para os períodos analisados são apresentadas. As projeções foram elaboradas com base nas metodologias previamente descritas, considerando tanto aspectos históricos quanto cenários de referência internacionais. A seguir, os resultados são organizados de acordo com cada abordagem adotada, permitindo uma análise comparativa entre diferentes perspectivas de projeção.

5.2.1 Com Base no Fator de Capacidade Histórico

Os resultados foram obtidos a partir da aplicação dos fatores de capacidade médios históricos às projeções de capacidade instalada das duas metodologias aplicadas. Essa metodologia possibilita estimar a geração de energia considerando o desempenho operacional real das usinas ao longo da última década, o que contribui para uma avaliação mais aderente à realidade do sistema elétrico brasileiro. A Tabela 8 a seguir detalhada o fator de capacidade associado a cada fonte, bem como seus respectivos resultados de geração.

Tabela 8 - Projeção da Geração de Energia Elétrica em GWh com Base no Fator de Capacidade

Fonte	Fator de Capacidade	Simples por Cenários			PDE 2034 / PNE 2050		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Hidráulica	42,8%	437.283	483.033	533.569	436.255	468.807	486.211
Gás Natural	20,0%	38.580	54.421	76.766	42.704	75.703	107.989
Derivados de Petróleo	16,5%	6.747	3.832	2.176	775	612	441
Carvão	49,2%	11.435	8.877	6.892	5.185	2.284	860
Nuclear	87,0%	15.173	15.173	15.173	25.885	25.885	25.885
Biomassa	39,9%	66.568	85.213	109.079	61.591	73.749	93.466
Eólica	38,6%	137.782	235.352	402.015	126.864	241.744	468.136
Solar Centralizada	14,9%	22.063	35.939	58.541	27.615	43.009	56.425
Solar MMGD	14,9%	59.455	88.007	130.272	75.913	104.964	119.716
Total	-	795.087	1.009.847	1.334.483	802.788	1.036.756	1.359.129

Fonte: Elaboração própria

5.2.2 Com Base nos Relatórios Internacionais

A geração de energia elétrica projetada com base no World Energy Outlook 2024 reflete as expectativas globais e regionais da Agência Internacional de Energia para o setor elétrico brasileiro. As estimativas fornecidas abrangem a geração total e sua distribuição entre fontes específicas, sendo estruturadas sob dois cenários distintos: Stated Policies e Announced Pledges.

O cenário Stated Policies considera apenas políticas já implementadas ou formalmente aprovadas, sendo assim mais conservador. Já o cenário Announced Pledges incorpora metas climáticas e compromissos públicos assumidos pelos países, mesmo que ainda não tenham sido regulamentados, representando um cenário mais ambicioso de transição energética.

As curvas de tendência traçadas individualmente para cada fonte de geração permitiram estimar os valores correspondentes ao ano de 2040, não originalmente contemplado no relatório da IEA, assegurando a coerência com o ritmo de crescimento projetado.

A tabela a seguir apresenta as estimativas consolidadas de geração de energia elétrica por fonte, de acordo com abordagem detalhada anteriormente. Esses resultados complementam a projeção realizada com base no fator de capacidade histórico e contribuem para o entendimento do possível perfil de geração no horizonte analisado.

Tabela 9 - Projeção da Geração de Energia Elétrica em TWh com Base no WEO 2024

Fonte	Stated Policies				Announced Pledges			
	Linha de Tendência	2030	2040	2050	Linha de Tendência	2030	2040	2050
Hidráulica	$y = 0,07x^2 - 283,55x + 287521,5$	378	392	419	$y = \frac{131x^2}{300} + 1776,25x - 1806697,83$	370	380	477
Gás Natural	$y = \frac{-x^2}{60} + 67,95x - 69214,83$	42	43	41	$y = \frac{x^2}{300} - 14,15x + 15008,167$	20	14	9
Derivados de Petróleo	$y = \frac{x^2}{300} - 13,55x + 13776,167$	6	6	7	$y = \frac{-x^2}{60} + 67,95x - 69254,83$	2	3	1
Carvão	$y = -0,4x + 824$	12	8	4	$y = 0$	0	0	0
Nuclear	$y = 2,92028 \cdot 10^{-23} \cdot e^{0,0271887x}$	24	36	45	$y = 7,749 \cdot 10^{-19} \cdot e^{0,022176x}$	24	34	41
Biomassa	$y = \frac{37x^2}{3000} - 50,015x + 50762,6167$	57	58	63	$y = \frac{199x^2}{3000} - 269,845x + 274487,6167$	55	57	71
Eólica	$y = 0,25x^2 - 1006,65 + 1013435,5$	161	270	428	$y = \frac{103x^2}{300} - 1382,45x + 1391698,167$	167	316	534
Solar	$y = \frac{x^2}{15} - 285,8x + 264976,3$	129	184	253	$y = 6,283 \cdot 10^{-32} \cdot e^{0,038026x}$	197	307	440
Total	-	809	997	1.260	-	835	1.112	1.573

Fonte: Elaboração própria

5.3 Projeção dos Fatores de Emissão de CO₂eq

Os resultados obtidos permitem visualizar de forma clara a participação de cada fonte de energia elétrica na geração de emissões de CO₂eq ao longo do horizonte estudado. A aplicação dos fatores de emissão consolidados possibilita avaliar o impacto potencial da evolução da matriz elétrica nacional, indicando o peso relativo de cada tecnologia — renovável ou não renovável — na emissão total projetada de gases de efeito estufa.

A tabela a seguir apresenta, de forma organizada, os valores anuais estimados dos fatores de emissões de CO₂eq para cada um dos cenários estudados, permitindo identificar tendências de redução ou aumento das emissões em função da expansão de tecnologias de baixo carbono.

Tabela 10 - Estimativa dos Fatores de Emissão de CO₂eq por Cenário

Cenário	Fator de Emissão [tCO ₂ eq/MWh]		
	2030	2040	2050
Simples por Cenários	0,05510	0,05121	0,04936
PDE 2034 / PNE 2050	0,04648	0,05273	0,05463
Stated Policies	0,05693	0,04670	0,03728
Announced Pledges	0,02970	0,02484	0,02009

Fonte: Elaboração própria

5.4 Quantificação do Consumo Médio Anual de Energia por Veículo Elétrico

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, foi possível quantificar o consumo energético anual médio de um veículo elétrico considerando os modelos mais vendidos no Brasil em 2024. Essa análise amplia a compreensão sobre a demanda de energia associada à expansão da frota elétrica nacional, permitindo uma avaliação prática do impacto sobre o sistema elétrico.

Inicialmente, foi calculada o consumo energético por ciclo de cada modelo a partir da Equação II, que relaciona o consumo energético específico ao valor de autonomia informado para cada veículo. Essa etapa é essencial para traduzir os dados de eficiência energética em termos de capacidade de armazenamento, parâmetro indispensável para estimar o volume de energia demandado em cada recarga completa.

A obtenção do consumo por ciclo possibilita estabelecer uma relação direta entre o consumo energético e a autonomia operacional de cada automóvel. Isso ocorre porque

a autonomia efetiva está vinculada à quantidade de energia que a bateria é capaz de fornecer em um ciclo de descarga total.

Dessa forma, conhecendo-se o consumo energético necessário para percorrer a autonomia total, torna-se viável projetar o consumo anual de cada modelo por meio de uma simples correlação matemática entre a distância percorrida em um ciclo completo e a quilometragem média anual, estimada em 12.900 km. Esse procedimento assegura uma estimativa realista do volume de energia requerido por veículo ao longo de um ano de uso.

Em seguida, o valor de consumo energético anual foi multiplicado pela quantidade de veículos vendidos de cada modelo, permitindo assim obter o consumo total por modelo. Essas etapas resultaram na elaboração da Tabela 11, que consolida os dados de consumo anual individual e agregado.

Tabela 11 - Consumo Anual de Energia dos Veículos Elétricos Mais Vendidos no Brasil em 2024

Marca	Modelo	Vendas	Consumo Por Ciclo (kWh)	Consumo Anual em Recarga (kWh)	Consumo Anual dos VEs Vendidos (kWh)
BYD	Dolphin Mini	21.945	32	1.469	32.240.863
BYD	Dolphin	15.201	34	1.505	22.877.505
GWM	Ora 03	6.326	45	1.828	11.560.765
BYD	Seal	3.522	64	2.222	7.824.710
BYD	Yuan Plus	2.870	46	2.007	5.759.133
Volvo	EX30	2.748	38	1.971	5.415.850
JAC	E-JS1	1.227	25	1.792	2.198.375
Renault	E-Kwid	1.050	23	1.577	1.655.500
Volvo	XC40	804	52	1.828	1.469.310
Volvo	C40	776	59	2.150	1.668.400
JAC	EJV5.5	374	46	2.258	844.305
Ford	E-Transit	362	56	3.727	1.349.053
Peugeot	e-2008	351	36	1.971	691.763
BMW	iX1	252	53	2.258	568.890
Total		58.044	-	-	96.750.215

Fonte: Elaboração própria

Por fim, basta somar o consumo anual total da frota — que corresponde a 96.750.215 kWh — e dividir esse montante pelo número total de veículos vendidos (58.044 unidades).

$$\frac{96.750.215}{58.044} \cong 1.666,84 \text{ kWh/veículo}$$

Este indicador sintetiza o perfil de demanda elétrica individual, oferecendo subsídios relevantes para a projeção do consumo energético ao longo do horizonte abordado neste estudo.

5.5 Projeção de Veículos Elétricos e Respetivo Consumo

A compreensão da evolução da frota de veículos elétricos no Brasil revela-se estratégica para estimar demandas energéticas futuras e orientar políticas públicas e privadas voltadas à mobilidade sustentável. Com respaldo na fundamentação metodológica já estabelecida, foram desenvolvidas projeções distintas que quantificam cenários de expansão, permitindo identificar tendências e possíveis desafios para o setor automotivo nacional.

As projeções foram obtidas por meio do ajuste de um polinômio de segundo grau aplicado a dois conjuntos de dados: o primeiro, derivado da evolução histórica do licenciamento de veículos elétricos, e o segundo, a partir das estimativas publicadas pela EPE. A Tabela 12 apresenta a consolidação desses resultados:

Tabela 12 - Projeção do Frota de Veículos Elétricos

Cenário	Linha de Tendência	R-Quadrado	Frota Acumulada de Veículos Elétricos		
			2030	2040	2050
Projeção Histórica	$y = 0,07420x^2 - 6614,49x + 1,47 \times 10^8$	0,966852	628.155	3.195.985	7.744.562
Projeção EPE	$y = 5,6768x^2 - 22932,32x + 2,32 \times 10^7$	0,999238	572.673	2.293.748	5.150.213

Fonte: Elaboração própria

Na projeção histórica, observa-se um coeficiente de determinação (R-Quadrado) de 0,966852, valor que, embora inferior ao da projeção EPE, demonstra excelente aderência do modelo aos dados reais. Tal resultado evidencia que, mesmo sujeito a variações econômicas, políticas e tecnológicas, o ajuste polinomial se mostra robusto, conferindo confiabilidade às estimativas futuras baseadas em tendências observadas.

Por sua vez, a projeção construída com os dados da EPE apresentou um R-Quadrado de 0,999238, reflexo de uma base consolidada em premissas projetadas previamente, o que resulta em uma série mais ajustada e alinhada a cenários oficiais para

o setor. Dessa forma, ambas as abordagens oferecem subsídios relevantes e complementares para a avaliação do avanço da eletromobilidade no país.

Para enriquecer a análise, conforme dados disponibilizados pelo Global EV Outlook 2025 (IEA, 2025) e pela YCharts (2024), foi realizado uma comparação com a trajetória da frota chinesa, reconhecida mundialmente como referência na transição para veículos elétricos. Para fins comparativos, o marco inicial chinês (2010) foi ajustado para coincidir com o primeiro ano da série brasileira (2021), igualando a base temporal. Nesse contexto, observa-se que, no décimo quinto ano da série chinesa (2024), o total de veículos elétricos atingiu 6,4 milhões de unidades, ao passo que, no mesmo marco temporal (ano 15, equivalente a 2035), as projeções para o Brasil indicam uma frota de 1.931.194 veículos elétricos na projeção histórica e 1.291.273 unidades na projeção da EPE.

Com base nos dados consolidados na Tabela 12 e considerando o consumo elétrico médio anual estimado por veículo, foi calculado o consumo anual associado única e exclusivamente às recargas de veículos elétricos no horizonte analisado, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Projeção do Consumo de Energia Elétrica Associado à Recarga de VEs

Cenário	Consumo de Energia Elétrica (GWh)		
	2030	2040	2050
Projeção Histórica	1.047,036	5.327,205	12.908,966
Projeção EPE	954,495	3.823,318	8.584,595

Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, os resultados expostos delineiam de maneira quantitativa não apenas o crescimento projetado da frota elétrica nacional, mas também os impactos diretos sobre o consumo de energia elétrica, evidenciando a relevância desse segmento para o planejamento e para a transição energética.

6. Discussão

A partir dos resultados apresentados, torna-se possível refletir sobre as implicações da expansão da frota de veículos elétricos no Brasil, considerando não apenas a viabilidade técnica e energética, mas também os desafios e oportunidades que emergem

da necessidade de garantir um suprimento elétrico integralmente renovável. Ao projetar cenários de crescimento para o setor de mobilidade elétrica e relacioná-los à capacidade instalada e à geração de energia, busca-se compreender em que medida a infraestrutura elétrica nacional está preparada para absorver essa nova demanda, sem comprometer metas de sustentabilidade e descarbonização. Assim, a seguir, discutem-se os principais achados, suas limitações e suas possíveis repercussões para a matriz elétrica brasileira e para a formulação de políticas públicas voltadas à transição energética no setor de transportes.

6.1 Capacidade Instalada

A projeção da capacidade instalada para os diferentes horizontes temporais revela tendências importantes para o equilíbrio entre fontes renováveis e não-renováveis no Brasil. Observa-se que, tanto no cenário simples quanto no cenário definido pelo PDE 2034 e pelo PNE 2050, há uma clara predominância de fontes renováveis na expansão prevista, refletindo o alinhamento do setor elétrico nacional às diretrizes de transição energética e aos compromissos de descarbonização.

6.1.1 Capacidade Instalada em 2030

A análise da capacidade instalada em 2030 revela uma convergência entre os cenários, indicando que o cenário simples, baseado em projeções históricas, oferece uma base sólida e realista para o comportamento do setor elétrico brasileiro. O cenário simples projeta uma capacidade total de 270,1 GW, enquanto o cenário da EPE aponta para 280,2 GW. Essa proximidade demonstra que as tendências históricas são confiáveis, especialmente para fontes maduras como a energia hidráulica. Com 116,7 GW no cenário simples e 116,4 GW pela EPE, a hidráulica confirma seu papel como o principal pilar da matriz energética.

As fontes renováveis intermitentes também mostram resultados promissores. A energia eólica, com projeções de 40,7 GW (cenário simples) e 37,5 GW (EPE), demonstra seu potencial de crescimento. Já a energia solar apresenta uma diferença maior, com 45,4 GW na geração distribuída (MMGD) pelo cenário simples e 58 GW pela EPE. Essa divergência era esperada, pois o cenário simples adota uma taxa de crescimento mais conservadora, prevendo uma possível desaceleração no longo prazo. O gás natural também se destaca entre as fontes fósseis, com 22 GW (cenário simples) e 24,4 GW

(EPE), atuando como fonte de suporte para a intermitência das renováveis e reforçando o movimento de transição energética.

6.1.2 Capacidade instalada em 2040

No horizonte de 2040, a diferença entre o cenário simples (355,3 GW) e a projeção polinomial (378,3 GW) se torna mais expressiva, mostrando a influência de políticas públicas e novos investimentos no médio prazo. A energia hidráulica mantém a coerência entre as duas abordagens, mas outras fontes revelam divergências importantes. O gás natural, por exemplo, avança significativamente na projeção polinomial (43,2 GW) em relação ao cenário simples (31,0 GW), refletindo uma maior aposta no seu papel de apoio à segurança energética durante a transição.

O crescimento das fontes renováveis é consistente. A eólica (69,6 GW no cenário simples e 71,5 GW no polinomial) e a biomassa mantêm a coerência, com projeções próximas. No entanto, a energia solar, tanto centralizada quanto distribuída, mostra uma expansão mais acelerada na projeção polinomial. Isso se deve a políticas de incentivo e marcos regulatórios que impulsionam o setor, superando o ritmo histórico. Já as fontes fósseis como carvão e derivados de petróleo aparecem mais elevadas no cenário simples, pois a projeção oficial considera uma redução mais incisiva, alinhada às metas de descarbonização.

6.1.3 Capacidade Instalada em 2050

Para 2050, as projeções do cenário simples (485,6 GW) e da projeção polinomial (495 GW) voltam a convergir, indicando que no longo prazo as abordagens tendem a se aproximar. O cenário simples se consolida como uma referência confiável, pois as tendências estruturais do setor se tornam mais claras e menos suscetíveis a flutuações de curto prazo. A energia hidráulica é uma exceção, com o cenário simples projetando 142,4 GW, enquanto o polinômio aponta 129,7 GW. Essa diferença ocorre porque o cenário histórico não captura as restrições ambientais e físicas que devem desacelerar a expansão da fonte no futuro.

A energia eólica confirma seu crescimento expressivo, com projeções de 118,9 GW (cenário simples) e 138,4 GW (polinômio), impulsionada por novos projetos e inovações como a tecnologia offshore. Já a energia solar, tanto centralizada quanto distribuída, mantém uma notável proximidade entre as duas abordagens, confirmando seu

papel como uma das principais formas de geração no país. O gás natural apresenta uma diferença significativa, com 61,6 GW no polinômio e 43,8 GW no cenário simples. Essa discrepância levanta a questão do alinhamento do setor com as metas de descarbonização, onde o cenário simples oferece uma estimativa mais conservadora e alinhada às exigências ambientais de longo prazo.

6.2 Geração Elétrica e Respectivas Emissões de CO₂

Ao analisar os resultados para 2030, observa-se que a geração total de energia elétrica prevista se mantém bastante semelhante entre os quatro cenários, variando entre aproximadamente 795 e 835 TWh. Ainda assim, chama atenção que o World Energy Outlook 2024, especialmente no cenário Announced Pledges, projeta uma expansão um pouco mais acelerada da geração no curto prazo em comparação aos cenários baseados em projeções nacionais (PDE/PNE) e na metodologia do cenário simples. No caso do gás natural, nota-se que os cenários Simples, PDE/PNE e Stated Policies indicam valores semelhantes, em torno de 38 a 42 TWh, reforçando o papel dessa fonte como base para compensar a intermitência de renováveis. Já no cenário Announced Pledges, essa geração é cerca de 50% menor, sinalizando uma estratégia de redução mais agressiva das emissões fósseis no curto prazo.

Ainda em 2030, é relevante destacar o comportamento diferenciado da energia solar, que no Announced Pledges supera a geração eólica, alcançando 197 TWh, enquanto a eólica se mantém em 167 TWh. Essa inversão não se repete nos outros três cenários, nos quais a eólica permanece dominante entre as novas renováveis. Por outro lado, a biomassa mostra um padrão mais estável: aparece com valores próximos em todos os cenários, variando entre 55 e 66 TWh, o que demonstra que, apesar de sua importância para a matriz renovável, sua participação não deve sofrer grandes saltos, mantendo-se como uma fonte de apoio complementar, sem expansão tão acelerada como solar e eólica. Em contrapartida, a geração proveniente de derivados de petróleo e carvão apresentam uma acentuada tendência de declínio, evidenciando o peso de compromissos climáticos na expectativa de produção elétrica. Para a energia nuclear, no relatório internacional a fonte apresenta um pequeno avanço em todos os anos, enquanto no cenário simples e PDE/PNE fica estagnado em todo o período analisado.

Para 2040, nota-se que os cenários Simples, PDE/PNE e Announced Pledges ultrapassam os 1.000 TWh de geração total, enquanto o Stated Policies se aproxima dessa

marca, alcançando 996 TWh. Nesse período intermediário, a fonte eólica consolida-se como a principal geradora renovável (depois da hidráulica) em todos os cenários, refletindo sua expansão contínua e o papel essencial para diversificar a matriz. Já a energia solar aparece com maior participação no Announced Pledges, ultrapassando 300 TWh, enquanto nos demais cenários seus valores permanecem mais próximos entre si, com destaque para o Stated Policies, que projeta uma expansão mais acentuada da solar em comparação aos cenários Simples e PDE/PNE.

Comparando a evolução da geração por biomassa entre 2030 e 2040, nos cenários descritos pela WEO não haverá muita diferença, distintamente do que acontece nos cenários do PDE/PNE e cenário simples, que projetam certo um avanço. No caso do gás natural em 2040, observa-se um movimento divergente: os cenários Simples e PDE/PNE indicam aumento da geração, chegando a 54 TWh e 75 TWh, respectivamente, enquanto o Announced Pledges e o Stated Policies projetam uma estagnação ou leve redução, com a geração permanecendo abaixo de 45 TWh. Essa diferença reforça o entendimento de que essa fonte seguirá sendo usada para mitigar a variabilidade de renováveis, mas com tendência de retração em cenários de maior compromisso climático. Essa variação explica a diferença nos fatores de emissão: o cenário PDE/PNE apresenta um fator mais elevado (0,05273 tCO₂/MWh) devido ao aumento proporcional do gás natural, já que sua projeção foi ajustada por uma curva de crescimento exponencial, elevando o peso de uma fonte de maior intensidade carbônica.

Ao projetar o cenário de 2050, torna-se evidente que a matriz elétrica brasileira deverá alcançar patamares de geração ainda mais robustos, com projeção mínima de 1.260 TWh no cenário Stated Policies e máxima de 1.573 TWh no Announced Pledges. Esse resultado indica a viabilidade de uma expansão intensa apoiada majoritariamente em fontes renováveis. Em ambos os cenários apresentados pela WEO, a geração eólica ultrapassa a hidráulica. Mais de 50% da geração nesses cenários advém de fontes eólica e solar, ambas intermitentes, e se somadas a participação da geração hidráulica, esse valor fica próximo aos 90%. Tal configuração representa uma dependência acentuada de fatores climáticos e hidrológicos, o que é positivo do ponto de vista ambiental, mas também evidencia um cenário otimista e que exigirá robustez técnica para garantir estabilidade do sistema.

Já os cenários Simples e PDE/PNE permanecem como alternativas mais conservadoras, com geração total entre 1.334 e 1.359 TWh, seguindo com maior

participação hidráulica, seguida da eólica e em terceiro a solar. Eles também mantêm uma contribuição relevante do gás natural — 76 TWh e 107 TWh — e da biomassa – 109 TWh e 93 TWh, respectivamente — para assegurar flexibilidade ao sistema diante da alta participação de renováveis. Nos cenários da WEO 2024 essas duas fontes apresentam comportamentos diferentes: no Announced Pledges o gás natural fica abaixo dos 10TWh e a biomassa atinge os 71TWh, enquanto no Stated Policies o gás natural se mantém estável com 41TWh e a biomassa com pouco mais de 62TWh. Assim, conclui-se que o cenário Announced Pledges utiliza a fonte de biomassa para assegurar o sistema, enquanto o Stated Policies utiliza o gás natural.

Quanto ao fator de emissão de CO₂, para os cenários Announced Pledges, Stated Policies e Simple observa-se uma queda gradual ao longo do tempo, indicando uma descarbonização da matriz energética. No entanto, o cenário PNE/PDE apresenta um aumento com a passagem do tempo, muito provavelmente devido a um superdimensionamento da capacidade instalada de gás natural, que, ao aplicar o fator de carga, fez com que a geração desta fonte tivesse maior participação, elevando consequentemente as emissões associadas.

6.3 Consumo Elétrico para Recarga de Baterias de Veículos Elétricos

Observa-se que, para o ano de 2030, a participação de veículos elétricos na frota nacional permanece relativamente modesta, com estimativas indicando cerca de 600 mil unidades em circulação. O consumo anual de energia elétrica associado à recarga das baterias dessa frota situa-se em torno de 1 TWh, o que equivale a cerca de 0,12% da geração total de energia elétrica projetada para o país nesse mesmo ano. Embora este percentual seja relativamente baixo em termos absolutos, ele já sinaliza a necessidade de atenção do ponto de vista do planejamento energético e da infraestrutura de distribuição, especialmente em relação à adequação da rede elétrica para suportar o aumento progressivo da demanda por recarga veicular concentrada em áreas urbanas. Além disso, mesmo que o impacto direto na matriz energética seja inicialmente pequeno, a expansão da mobilidade elétrica representa um vetor relevante para a redução de emissões de gases de efeito estufa, quando comparada a veículos com motores a combustão interna.

No horizonte de 2040, projeta-se uma expansão significativa da frota elétrica nacional, que pode quadruplicar ou até quintuplicar em relação ao total estimado para 2030, atingindo um patamar superior a 2 milhões de unidades, dependendo do cenário

analisado. Com isso, o consumo de energia elétrica destinado exclusivamente à recarga das baterias pode alcançar até 5,3 TWh, valor que corresponderia a aproximadamente 0,54% da geração total projetada para o país nesse período. Ainda que este percentual continue relativamente baixo frente ao volume global de geração, a concentração espacial e temporal desse consumo — sobretudo em centros urbanos — poderá demandar investimentos em modernização da rede de distribuição, em estações de recarga de alta potência e em mecanismos de gestão de carga, visando garantir a estabilidade do sistema elétrico e evitar sobrecargas nos horários de pico. Do ponto de vista ambiental, essa expansão reforça o papel estratégico da eletrificação da frota como instrumento para redução de emissões setoriais e diversificação da matriz de transporte nacional.

No longo prazo, para 2050, as projeções indicam uma frota de veículos elétricos que poderá alcançar uma frota próxima de 7,7 milhões de unidades. Nessa perspectiva, o consumo anual de energia elétrica associado exclusivamente à recarga das baterias ultrapassaria a marca de 12,9 TWh, o que representaria cerca de 1% da geração total de energia elétrica nacional projetada para o mesmo ano. Esse percentual evidencia que, diferentemente das décadas anteriores, a mobilidade elétrica tende a se consolidar como um componente relevante na estrutura de demanda energética do país. Assim, torna-se imprescindível que políticas públicas, investimentos em infraestrutura de recarga, incentivos regulatórios e integração com fontes renováveis de geração sejam continuamente fortalecidos, a fim de maximizar os benefícios ambientais da eletromobilidade e mitigar potenciais impactos sobre o equilíbrio da matriz energética.

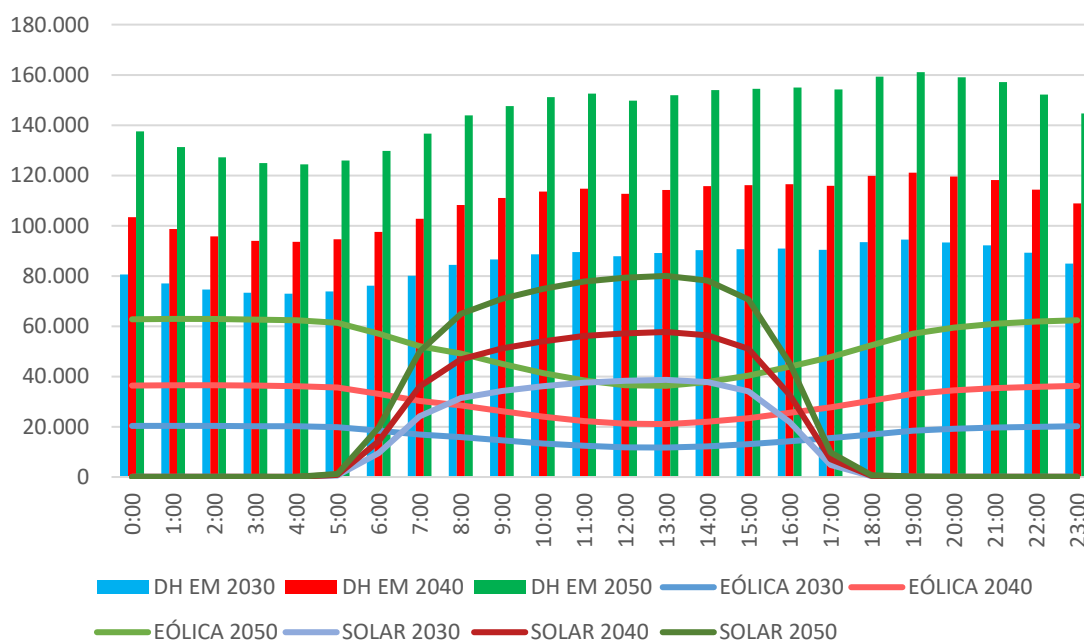
Ao comparar esses resultados com o cenário chinês, observa-se que, mesmo nos horizontes mais otimistas, os números absolutos projetados para o Brasil permanecem significativamente inferiores aos verificados na China em períodos equivalentes. Essa diferença pode ser atribuída a uma série de fatores estruturais e conjunturais, como a penetração mais tardia da tecnologia de veículos elétricos no mercado brasileiro, a menor dimensão populacional do Brasil — que corresponde a aproximadamente 15% da população chinesa —, além do fato de a China figurar como maior emissor de gases de efeito estufa do mundo, o que intensifica a pressão para adoção acelerada de tecnologias de mitigação, como a mobilidade elétrica. Ressalta-se ainda que, desde 2020, a China comercializa anualmente mais de 1 milhão de veículos elétricos, fenômeno impulsionado por políticas robustas de incentivo, subsídios e metas governamentais ambiciosas. Caso o Brasil avance na adoção de medidas semelhantes de fomento, é plausível projetar que

o consumo de energia elétrica para recarga veicular possa crescer ainda mais nas próximas décadas podendo, assim, reforçar a integração de novas tecnologias ao sistema energético e ampliar os benefícios socioambientais decorrentes de uma matriz de transporte menos dependente de combustíveis fósseis.

6.4 Aplicação da Recarga Inteligente

A partir das 4 diferentes projeções de geração de energia realizadas neste estudo, obteve-se uma média simples total de 810.469 GWh em 2030, 1.038.901 GWh em 2040 e 1.381.653 GWh em 2050. Com base na distribuição percentual de demanda horária (DH), foi possível estimar o consumo energético em cada hora do dia para os diferentes horizontes temporais. De forma complementar, calculou-se a média de geração das fontes eólica e solar, aplicando-se a proporção horária observada em 2024, o que permitiu construir o gráfico de distribuição de geração apresentado. Optou-se por considerar apenas essas duas fontes por serem as principais impulsionadoras da transição energética no Brasil e, ao mesmo tempo, por apresentarem caráter intermitente, fator que reforça a importância do planejamento e da gestão do uso da energia, especialmente diante da expansão da mobilidade elétrica.

Gráfico 12 - Projeção da geração horária das fontes solar e eólica e da demanda média brasileira



Fonte: Elaboração própria

Ao analisar o perfil horário de geração eólica e solar, percebe-se uma complementariedade entre as duas fontes. A geração eólica tende a ser mais elevada durante os períodos noturnos e de menor consumo, enquanto a geração solar atinge seu pico entre 11h00 e 14h00. A partir dessa constatação e que o maior consumo elétrico ocorre entre 09h00 e 23h00, a recarga inteligente surge como estratégia essencial para evitar sobrecargas no sistema.

Os carregadores residenciais, de potências entre 3,7 kW e 7,4 kW (sendo o primeiro o mais comum), representam a solução mais adequada do ponto de vista energético e operacional. Eles permitem programar o carregamento em horários de menor demanda, especialmente entre 23h00 e 06h00, período em que os a maior parte dos veículos permanecem estacionados e com a possibilidade de estarem conectados à rede. Considerando as projeções de consumo associados à recarga da bateria dos veículos elétricos, o total de energia destinada à recarga diária foi estimado em aproximadamente 2.869 MWh em 2030, 14.595 MWh em 2040 e 35.367 MWh em 2050. Com base nesses valores, foram avaliados dois cenários distintos de comportamento de recarga:

- Cenário 1: o usuário realiza carregamentos diários para repor a energia gasta no deslocamento médio de 35,4 km por dia, o que representa um consumo de cerca de 4,6 kWh/dia. Nesse caso, o tempo médio de recarga em um carregador de 3,7 kW é de aproximadamente 1h14min.
- Cenário 2: considera-se uma estratégia de preservação da vida útil da bateria, em que o carregamento é realizado apenas quando o nível de carga chega a cerca de 20%, sendo interrompido ao atingir 80% da capacidade, evitando assim a degradação prematura do sistema de armazenamento. Isso corresponde a uma recarga de 23 kWh a cada cinco dias, demandando cerca de 6h07min de conexão.

Para o primeiro cenário, em que as recargas são curtas e diárias, recomenda-se priorizar janelas entre 02h00 e 06h00, de modo a distribuir as cargas em horários de baixa utilização do sistema. No segundo cenário, com recargas mais longas, o período ideal se estende das 23h00 às 09h00, permitindo uma melhor sincronia com a geração eólica noturna e reduzindo a pressão sobre o sistema.

Em situações em que o carregamento residencial não é viável, o ideal é que as recargas em locais públicos ou corporativos ocorram no máximo até às 14h00, período em que a demanda não é tão crítica e a geração solar apresenta um crescimento até atingir

seu pico. Já o uso entre 14h00 e 23h00 deve ser altamente evitado, principalmente para os carregadores de alta potência, pois é neste período em que a geração solar declina e a eólica ainda não atingiu seu ponto máximo, o que aumenta o risco de sobrecarga na rede.

Destaca-se que, em 2050, o consumo energético diário associado à recarga de veículos elétricos poderá alcançar cerca de 35.367 MWh, equivalente a aproximadamente 25% da demanda horária média projetada para o país. Isso evidencia a necessidade de um sistema de recarga altamente estruturado e bem distribuído, com ampla adoção de mecanismos de recarga inteligente. Caso contrário, a concentração de carregamentos em horários inadequados poderá exigir o acionamento de usinas termelétricas, elevando as emissões de gases de efeito estufa e comprometendo os avanços ambientais da mobilidade elétrica. A gestão eficiente da recarga será fundamental para garantir a sustentabilidade e a estabilidade da matriz elétrica brasileira principalmente no longo prazo.

7. Conclusão

O presente estudo, ao projetar a evolução da frota de veículos elétricos e analisar a capacidade de absorção da matriz elétrica brasileira até 2050, permite consolidar a viabilidade técnica da transição, desde que esta seja acompanhada por uma rigorosa gestão estratégica. As projeções indicam uma aceleração robusta no crescimento da capacidade instalada em fontes eólica e solar, que, impulsionadas por políticas e queda de custos, consolidam-se como os principais vetores de expansão da matriz ao longo de todo o período analisado. No entanto, este crescimento é acompanhado pelo aumento da capacidade de geração a gás natural, que atua como garantidor da segurança energética e da flexibilidade do SIN para compensar a intermitência das demais fontes, conforme observado nos cenários, principalmente no PDE 2034 e PNE 2050.

Apesar de a matriz manter sua estrutura majoritariamente renovável (com a hidráulica ainda como pilar), a dependência crescente de fontes intermitentes introduz uma vulnerabilidade na geração efetiva. A eventual ausência de recursos eólicos e solares ou a passagem por crises hídricas pode exigir o acionamento das usinas termelétricas a gás natural, elevando o fator de emissão de CO₂eq. Este risco comprometeria os ganhos ambientais da eletrificação.

Simultaneamente, a análise de mercado confirma uma aceleração significativa no licenciamento de veículos elétricos, superando projeções anteriores da EPE em mais de 135% em alguns períodos. A projeção baseada na série histórica mostrou-se a mais aderente para capturar este crescimento exponencial, situando o Brasil em uma trajetória de adoção tecnológica que, proporcionalmente, acompanha a vivenciada por mercados maduros como o da China.

Embora o consumo de energia para recarga seja marginal no curto prazo (cerca de 0,12% da geração total em 2030), ele se torna um fator estrutural no longo prazo. Em 2050, a demanda anual para recarga de baterias pode corresponder a cerca de 1% da geração total de energia elétrica, um volume que, por sua magnitude, exige intervenção e planejamento setorial para sua integração. O ponto crítico, contudo, reside na concentração temporal da demanda, que, se não gerenciada, pode gerar picos de sobrecarga na infraestrutura de distribuição.

Portanto, a implementação da recarga inteligente é uma condição essencial para o sucesso desta transição e para a mitigação de riscos. A programação da recarga para períodos de menor demanda do sistema — preferencialmente durante a madrugada (23h00 às 06h00) — maximiza a utilização da geração eólica noturna e minimiza o estresse sobre a rede. Sem esta gestão coordenada, a demanda diária de energia para recarga poderá alcançar, em 2050, cerca de 25% da demanda horária média projetada. Tal concentração, se não administrada, resultará em um colapso no sistema de distribuição, forçando o acionamento de térmicas poluentes e, em última instância, ameaçando a segurança operacional e os objetivos ambientais de todo o setor elétrico nacional.

Cabe destacar, ainda, que este estudo se limita à análise da eletrificação da frota de veículos leves totalmente elétricos, não contemplando veículos híbridos, híbridos plug-in e outras categorias de transporte, como caminhões e ônibus. Embora essa delimitação tenha sido adotada para manter o escopo da pesquisa compatível com seus objetivos, a inclusão dessas categorias em estudos futuros poderá indicar uma demanda adicional de energia elétrica ainda mais significativa, reforçando a necessidade de planejamento da expansão da geração, da infraestrutura de distribuição e da gestão da recarga para garantir a segurança e a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional.

REFERÊNCIAS

ANFAVEA, 2025. Dados estatísticos para download. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/edicoes-em-excel/>. Acesso em: 12 abril 2025.

ANEEL, 2024. *Sistema de Informações de Geração da Aneel*. Brasília, 2024. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 5 maio 2024.

AUTOO, 2025. Carros mais vendidos do Brasil em 2024. Disponível em: <https://www.autoo.com.br/emplacamentos/veiculos-mais-vendidos/2024/>. Acesso em: 24 maio 2025.

BRASIL, 2018. Decreto nº 9.442, de 6 de julho de 2018. Altera as alíquotas do Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI incidente sobre veículos equipados com motores híbridos e elétricos. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2018.

DEB, S., PIHLATIE, M., AL-SAADI, M., 2022. “Smart Charging: A Comprehensive Review”, **IEEE Access**, v. 10, p. 134690-134703, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3227630.

EPE, 2022. *Informativo Técnico nº 11/2022 – Fatores de Emissão Utilizados para as Estimativas de GEE*. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Informativo-Tecnico-n-11-2022>. Acesso em: 08 jul. 2025.

EPE. 2024. Plano Decenal de Expansão de Energia 2034: Relatório Síntese. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-PDE>. Acesso em: 14 junho 2025.

EPE, 2025a. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 29 março 2025.

EPE, 2025b. Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em 29 março 2025.

GUO, J., LI, Y., PEDERSEN, K., STROE, D. “Lithium-Ion Battery Operation, Degradation, and Aging Mechanism in Electric Vehicles: An Overview”, **Energies**, v. 14, n. 17, p. 5220, 2021. DOI: 10.3390/en14175220.

G2 ACADEMY, 2023. Dilema do Operador – Operação do Sistema. Disponível em: <https://www.g2academy.com.br/dilemadooperador-2/>. Acesso em: 29 junho 2025.

HAUSER, A., KUHN, R. “High-voltage battery management systems (BMS) for electric vehicles”, In: **Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles**, p. 265-282, maio 2015.

IEA, 2020. *Energy Technology Perspectives Special Report on Clean Energy Innovation*. In: *Energy Technology Perspectives 2020*, Paris, julho 2020.

IEA, 2021. *Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris, maio 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 14 junho 2025.

IEA, 2024a. *CO₂ Emissions in 2023*. Paris, fevereiro 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>. Acesso em: 1 maio 2024.

IEA, 2024b. *World Energy Outlook 2024*. Paris, outubro 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 14 junho 2025.

IEA, 2025. *Global EV Outlook 2025: Driving the Transition to Electric Mobility*. Paris, maio 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 29 junho 2025.

IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 08 julho 2025. DOI: 10.1017/9781009157926.026

MCTI, 2025. Fator médio – Inventários corporativos. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 18 maio 2025.

MERCANTIL, M., 2019. Brasileiro roda média de 12,9 mil km no primeiro ano de uso do veículo. Disponível em: <https://monitormercantil.com.br/brasileiro-roda-media-de-12-9-mil-km-no-primeiro-ano-de-uso-do-veiculo/>. Acesso em: 15 junho 2025.

MME/EPE, 2020. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 4 fevereiro 2024.

MME/EPE, 2023a. *Balanco Energético Nacional 2023*. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 22 junho 2025.

MME/EPE, 2023b. *Demanda de Energia dos Veículos Leves: 2024-2033*. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-694/NT-EPE-DPG-SDB-2023-04_Demanda_Ve%C3%ADculos_Leves_2024-2033.pdf. Acesso em: 1 maio 2024

MME/EPE, 2024. *Demanda de Energia dos Veículos Leves: 2025-2034*. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-739/NT-EPE-DPG-SDB-2024-10_Demanda%20de%20energia%20veiculos%20leves_2025-2034_R1.pdf. Acesso em: 15 junho 2025.

MONTOIA, V., 2025. Isenção de IPVA: saiba quais estados liberam carros híbridos e elétricos do imposto. G1, 8 fevereiro 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/carros/noticia/2025/02/08/isencao-de-ipva-saiba-quais-estados-liberam-o-imposto-de-carros-hibridos-e-eletricos.ghtml>. Acesso em: 25 maio 2025.

MOURA, E., 2023. Conheça os carregadores de veículo elétrico disponíveis no mercado brasileiro. Portal Solar, 22 agosto 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/mobilidade-eletrica/conheca-os-carregadores-de-carro-eletrico-disponiveis-no-mercado-brasileiro>. Acesso em: 24 maio 2025.

NEOCHARGE. Conheça os tipos de carros elétricos. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Acesso em: 14 abril 2024.

NOCE, T., 2009. *Estudo do Funcionamento de Veículos Elétricos e Contribuições ao seu Aperfeiçoamento*, Tese de M.Sc., Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2009.

ONS, 2025. Curva de Carga Horária. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx. Acesso em: 21 maio 2025.

ONU, 2015. *Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President*. Paris, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/9064>. Acesso em: 14 abr 2024.

PBEV, 2025. Veículos Automotivos. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>. Acesso em: 28 maio 2025.

PNME, 2024. *4º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica: desafios, oportunidades e políticas públicas para a mobilidade elétrica no Brasil*. Brasília, 2024. Disponível em: <https://lnkd.in/dvCh4sRR>. Acesso em: 18 maio 2025.

SEEG, 2023. *Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil 1970-2022*. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 28 abril 2024.

SEEG, 2025. *Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil 1970-2024*. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 28 abril 2024.

UNECE, 2022. *Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources*. Geneva, 2022. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/4020227?v=pdf>. Acesso em: 08 julho 2025.

VAZ, L., BARROS, D., CASTRO, B. 2015. “Veículos híbridos e elétricos: Sugestões de políticas públicas para o segmento”, **BNDES Setorial**, n. 41, p. 295-344, 2015.

YCHARTS, 2024. China Battery Electric Vehicle Sales: Cars. Disponível em: https://ycharts.com/indicators/china_battery_electric_vehicle_sales_cars. Acesso em: 29 junho 2025