

DESCARBONIZAÇÃO DO SENADO FEDERAL

Redução de emissões e retorno
financeiro com energia
renovável e frota sustentável

Túlio Augusto Castelo Branco Leal

Flávia L. Consoni

Márcio Almeida Có



DESCARBONIZAÇÃO DO SENADO FEDERAL: redução de emissões e retorno financeiro com energia renovável e frota sustentável

Túlio Augusto Castelo Branco Leal¹

Flávia L. Consoni²

Márcio Almeida Cór³

- ¹ Consultor Legislativo na área de Direito Tributário e Financeiro no Senado Federal. Doutorando em Política Científica e Tecnológica pela Universidade Estadual de Campinas. E-mail: tbleal@senado.leg.br.
- ² Livre Docente do Programa de Política Científica e Tecnológica da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), doutora em Política Científica e Tecnológica pela Unicamp. E-mail: fconsoni@unicamp.br.
- ³ Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo.

SENADO FEDERAL

DIRETORIA GERAL

Ilana Trombka – Diretora-Geral

SECRETARIA GERAL DA MESA

Danilo Augusto Barboza de Aguiar – Secretário Geral

CONSULTORIA LEGISLATIVA

Paulo Henrique de Holanda Dantas – Consultor-Geral

NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISAS

Rafael Silveira e Silva – Coordenação

Brunella Poltronieri Miguez – Revisão

João Cândido de Oliveira – Editoração

CONSELHO EDITORIAL

Eduardo Modena Lacerda

Pedro Duarte Blanco

Denis Murahovschi

Foto da Capa: Jonas Pereira/Agência Senado

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade dos autores e não representa posicionamento oficial do Senado Federal.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

Como citar este texto:

LEAL, Túlio Augusto Castelo Branco; CONSONI, Flávia L. & CÔ, Márcio Almeida. **Descarbonização do Senado Federal: redução de emissões e retorno financeiro com energia renovável e frota sustentável**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, Junho 2025 (Texto para Discussão nº 346). Disponível em: <www.senado.leg.br/estudos>. Acesso em: 10 de junho de 2025.

Núcleo de Estudos e Pesquisas
da Consultoria Legislativa



Conforme o Ato da Comissão Diretora nº 14, de 2013, compete ao Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa elaborar análises e estudos técnicos, promover a publicação de textos para discussão contendo o resultado dos trabalhos, sem prejuízo de outras formas de divulgação, bem como executar e coordenar debates, seminários e eventos técnico-acadêmicos, de forma que todas essas competências, no âmbito do assessoramento legislativo, contribuam para a formulação, implementação e avaliação da legislação e das políticas públicas discutidas no Congresso Nacional.

Contato:

conlegestudos@senado.leg.br

URL: www.senado.leg.br/estudos

ISSN 1983-0645

DESCARBONIZAÇÃO DO SENADO FEDERAL: REDUÇÃO DE EMISSÕES E RETORNO FINANCEIRO COM ENERGIA RENOVÁVEL E FROTA SUSTENTÁVEL

RESUMO

Edificações e transporte são responsáveis por significativo consumo de energia, com conseqüente impacto na emissão de gases de efeito estufa (GEE). Assim, apoiado na discussão sobre transição energética, uso de energias renováveis e de Sistemas Híbridos de Energia Renovável (SHER), este artigo desenvolve uma metodologia para permitir que grandes consumidores institucionais possam reduzir seu consumo de combustíveis fósseis (pela eletrificação e/ou utilização do etanol em veículos) e diminuir a intensidade carbônica do uso de eletricidade (por meio de geração própria de eletricidade fotovoltaica). A metodologia foi desenvolvida em função do tipo de dados que grandes consumidores institucionais informam ao programa A3P do Ministério do Meio Ambiente, e foi aplicada para o caso do Senado Federal brasileiro. Como resultados, as alternativas aqui propostas proporcionariam redução significativa de emissão de GEE do Senado (entre 16% e 20,3%) e teriam um tempo de *payback* relativamente rápido (entre 30 e 45 meses), o que demonstra não só sua viabilidade, como também suas vantagens ambientais, sociais e econômicas. Esses resultados se constituem em interessante caso que poderia ajudar a viabilizar e acelerar as mudanças institucionais necessárias para avançar na transição para uma economia de baixo carbono.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos. Etanol. Energia fotovoltaica. Gases de efeito estufa. Sistemas Híbridos de Energia Renovável.

ABSTRACT

Buildings and transportation are responsible for significant energy consumption, with a consequent impact on greenhouse gas (GHG) emissions. Thus, supported by the discussion on energy transition, use of renewable energies and Hybrid Renewable Energy Systems (SHER), this article develops a methodology to allow large institutional consumers to reduce their consumption of fossil fuels (through electrification and/or use of ethanol) and reduce the carbon intensity of electricity use (through their own generation of photovoltaic electricity). The methodology was developed based on the type of data that large institutional consumers report to the A3P program of the Ministry of the Environment, and was applied to the case of the Brazilian Federal Senate. As a result, the alternatives proposed here would provide a significant reduction in the Senate's GHG emissions (between 16% and 20.3%) and would have a relatively fast payback time (between 30 and 45 months), which demonstrates not only their feasibility, but also their environmental, social and economic advantages. These results constitute an interesting case which could help enable and accelerate the institutional changes necessary to advance the transition to a low-carbon economy.

KEYWORDS: Electric vehicles. Ethanol. Photovoltaic electricity. Greenhouse gases. Hybrid Renewable Energy Systems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	4
2.1.	CAPACIDADE DE GERAÇÃO LOCAL DE ENERGIA SOLAR.....	7
2.2.	ELETRICIDADE E ETANOL DEMANDADOS NAS TRÊS ALTERNATIVAS PROPOSTAS	8
2.3.	REQUISITOS ESPECÍFICOS DOS BEV.....	8
2.4.	ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DOS GEE NAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS ..	10
2.5.	ANÁLISE DE CUSTOS DAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS	11
2.5.1.	CUSTO DE INSTALAÇÃO DO PARQUE SOLAR	11
2.5.2.	CUSTO COM A DEMANDA PREVISTA DOS ENERGÉTICOS NAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS	12
2.5.3.	REDUÇÃO DO VALOR DA CONTA DE ENERGIA NAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS	12
2.5.4.	CUSTO ADICIONAL DO CONTRATO DE ALUGUEL NAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS	13
2.6.	TEMPO DE RECUPERAÇÃO DO INVESTIMENTO NAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS	13
3	RESULTADOS DAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE NO SENADO.....	14
4	DISCUSSÃO	19
5	CONCLUSÕES	20
	AGRADECIMENTOS	22
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas de origem antrópica representam um dos maiores desafios da atualidade. A principal autoridade científica no tema, o Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), estima que a emissão de gases de efeito estufa (GEE), principalmente decorrentes da atividade humana, foi responsável por uma elevação da temperatura da superfície global de 1,1 °C nos últimos 150 anos. Estima-se, também, que mantido o curso atual de emissões de GEE, a temperatura média do planeta se elevará em 2,8 °C até o fim deste século, o que deverá impactar negativamente a saúde, agricultura, moradia, segurança e trabalho ao redor do mundo (IPCC, 2023; ONU, 2023).

Nesse cenário, cientistas e representantes governamentais têm apontado para a necessidade de se limitar o aumento de temperatura média global a apenas 1,5°C ao fim do século (IPCC, 2023; IEA, 2022). Para isso, novas metas de emissão de GEE foram estabelecidas, sendo necessário reduzi-las pela metade até 2030, e atingir o *net zero* (ou seja, zerar as emissões de GEE, ou compensá-las com medidas de sequestro e estocagem desses gases) até 2050 (ONU, 2023).

Parte dessas emissões está relacionada ao uso da energia por uma diversidade de setores. O setor das construções, que envolve as edificações residenciais, comerciais e públicas, responde por mais de 40% do consumo de energia global (C. Z. Li *et al.*, 2020), e de cerca de 52% no Brasil (EPE, 2024). Do total de energia consumido ao longo do ciclo de vida do edifício, entre 80 e 90% são ligadas à operação, ou seja, são necessárias para manter o conforto e as rotinas prediais, e de 10 a 20% estão incorporadas diretamente ao processo de construção e demolição, ou de forma indireta na produção dos materiais e serviços utilizados (C. Z. Li *et al.*, 2020).

Existe uma tendência de aumento no uso da energia nos edifícios. Aumentando as áreas construídas, o tempo de permanência nas edificações e as demandas por conforto térmico também aumentam, em especial nos países em desenvolvimento (González-Torres *et al.*, 2022). Isso gera um desafio para o processo de descarbonização do ambiente urbano que envolve a redução pela demanda por energia, por meio da mudança de comportamento dos usuários e

da eficiência energética das edificações, e a descarbonização pelo incremento do uso de renováveis como fonte de eletricidade (Umdu *et al.*, 2024; NEP, 2021).

O sucesso da redução das emissões nos edifícios depende da melhoria de sua eficiência energética, do uso de energias renováveis conectadas ao sistema elétrico e da sua eletrificação completa, com a substituição do uso de combustíveis fósseis, como por exemplo o gás natural utilizado em sistemas de aquecimento de água, ou de conforto ambiental. (T. Li *et al.*, 2024). Essa eletrificação deve estar estrategicamente coordenada com o grau de descarbonização das redes para resultar em menores emissões (Zhong *et al.*, 2024). No Brasil, o grau de integração do Sistema Interligado Nacional (SIN) e a geração de eletricidade majoritariamente (mais de 90%) renovável (EPE, 2024) favorecem essa estratégia.

Edifícios comerciais e públicos abrigam grandes consumidores institucionais de energia, que incrementam suas emissões por meio do uso de combustíveis fósseis em suas frotas de veículos. Essas frotas, em geral, apresentam uso intenso e são geridas de forma centralizada, sendo vistas, portanto, como oportunidades eficazes para redução de emissões ligadas ao transporte quando se trata de adoção de veículos elétricos (Schmidt *et al.*, 2021).

Os Sistemas Híbridos de Energia Renovável (SHER), ao combinar fontes de energia renovável, como sistemas fotovoltaicos (PV) e baterias, integrados com a rede elétrica, demonstram ser eficazes na redução das emissões de GEE e economicamente viáveis para a demanda energética de edifícios comerciais (Adefarati *et al.*, 2024). Uma frota de veículos elétricos se encaixa nesse conceito, na medida em que podem se conectar de forma ativa à rede elétrica do edifício, ou simplesmente consumir eletricidade produzida por fonte renovável. Estudos de Khosravani *et al.* (2024) demonstram que a eletrificação de edifícios em escala urbana, quando integrada a sistemas híbridos de energia renovável, pode ser viável, mas é altamente sensível a fatores econômicos, como o preço dos combustíveis e subsídios. Além disso, em algumas situações, pode ser necessário dar destinação a possíveis excedentes de produção de energia solar PV, muito concentradas em determinadas horas do dia, tarefa para a qual a mobilidade elétrica está particularmente bem-posicionada para contribuir (Cavalcante *et al.*, 2023).

Especificamente no caso brasileiro, segundo dados do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), o setor de energia como um todo foi responsável por 46,0% do total de emissão de CO₂ em 2016, ao passo que somente o setor de transportes foi responsável por 22,9% do total (MCTI, 2020). Nesse contexto, deve-se lembrar que no Brasil predomina o regime da automobilidade, centrado no uso do automóvel particular, majoritariamente alimentado por combustível de origem fóssil (EPE, 2022a), e sustentado por instituições formais e informais que fortalecem estes arranjos (Corradi *et al.*, 2023).

Assim, para que o Brasil consiga cumprir seu compromisso de reduzir as emissões de GEE em 48,4% até 2025, em 53,1% até 2030 (ambas em relação ao montante de 2005), e atingir o *net zero* em 2050 (MMA, 2023), será necessário que tanto o setor de energia como o de transporte dependente do uso de combustível fóssil se adequem a esta nova realidade, de forma a reduzir seus impactos nas emissões globais. Portanto, é necessário acelerar uma transição que se oriente para a descarbonização, processo no qual a sociedade evolui de um sistema sociotécnico¹ de produção e consumo intensivo em carbono para outro mais sustentável, com menores emissões de GEE (Markard *et al.*, 2012). Tais sistemas operam no nível de domínios ou funções societais, entre os quais se incluem energia e transporte, considerando que no processo de transição são necessárias múltiplas mudanças e reconfigurações que envolvem tanto o desenvolvimento de novas tecnologias, mas também o seu uso e adoção pela sociedade (Geels e Schot, 2010).

De fato, esforços de redução da emissão de GEE somente se materializarão por meio de mudanças estruturais profundas, nas quais as inovações tecnológicas em campos como a energia ou os transportes deixem de ser específicas de nichos, e comecem a fazer parte dos regimes vigentes de produção e consumo (Geels, 2012; Markard, 2018). Promover tais mudanças implica enfrentar resistências impostas por regimes dominantes, aprisionados em sistemas que buscam manter a sua estabilidade em função de interesses econômicos já consolidados (Unruh, 2000; Geels, 2019).

¹ Aqui entendido como aquele que decorre da interação interdependente entre atores humanos, institucionais, artefatos tecnológicos e o conhecimento, produzindo resultados peculiares em função de sua dinâmica interna (Markard *et al.*, 2012).

A força deste estado de resistência, estabelecido pelo regime dominante, coloca questões críticas sobre quais seriam as estratégias que viabilizam a redução das emissões de GEE, que possam evidenciar a viabilidade técnica e econômica de ações voltadas à descarbonização. É no âmbito desta discussão que este artigo se insere. Propõe-se estruturar uma metodologia de cálculo, organizar dados e realizar uma avaliação técnico-econômica do uso de Sistemas Híbridos de Energia Renovável (SHER) que possa ser aplicada em grandes consumidores institucionais de eletricidade e de combustíveis fósseis para abastecer frota própria de veículos.

O Senado Federal foi escolhido como estudo de caso deste artigo em função da visibilidade que essa instituição tem. Caso esta proposta venha a ser efetivamente implantada, ela teria maior probabilidade de gerar mídia positiva no sentido de um exemplo exitoso de implantação de medidas efetivas, viáveis técnica e economicamente, e capazes de minorar emissões de GEE, constituindo-se, portanto, em importante modelo de ação que poderia estimular outras instituições a também se descarbonizarem, o que ajudaria a legitimar as mudanças necessárias para uma economia menos intensiva em carbono, e alinhadas com a agenda ambiental da administração pública.

Em seguida a esta Introdução, o artigo discute a metodologia utilizada, com menção ao acesso às informações e como obtê-las para outros casos, seguido da apresentação e discussão dos resultados, para, por fim, dar destaque às conclusões deste estudo, com recomendações que sinalizam para a viabilidade desta solução para a redução das emissões de GEE e sua replicabilidade em outras edificações públicas e comerciais.

2 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este estudo está estruturado com base em dados extraídos do programa denominado “Agenda Ambiental na Administração Pública (A3P)” do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2025), que tem como objetivo estimular os órgãos públicos do país a implementarem práticas de sustentabilidade. Nesse sentido, a metodologia aqui apresentada pode servir de base para replicar os mesmos cálculos nas demais 483 instituições participantes deste programa. Destaque-se, contudo, que embora o site da A3P não publique diretamente a

informação que é repassada pelas instituições participantes, quem as desejar poderá obtê-las mediante pedido fundamentado na Lei de Acesso à Informação (LAI). Ou seja, outras instituições públicas e comerciais podem ser analisadas utilizando-se as orientações extraídas deste trabalho.

Entre as informações que o MMA sugere serem levantadas pelas instituições participantes do A3P (MMA, 2025b), em termos de transporte e energia, estão a quantidade de veículos e o consumo de combustíveis da frota, bem como o consumo e o gasto com energia elétrica.

No caso do Senado Federal, cujos dados referem-se ao ano de 2023, identificou-se o consumo médio de energia elétrica de 1,49 milhões de kWh por mês, e a operação de uma frota de veículos dedicada ao uso dos senadores composta por 79 Nissans Sentras e uma KIA Carnival, os quais são abastecidos exclusivamente por gasolina (Senado Federal, 2023 e 2024b).

Para a implementação deste estudo, foram analisadas três possibilidades de SHER, a partir de indicadores econômicos e ambientais, que têm em comum a implantação de um parque de geração de energias renováveis com painéis fotovoltaicos no teto de edificações do Senado, mas que se diferenciam pela opção de troca da frota de veículos² por: elétricos a bateria (BEV, alternativa 1), híbridos elétricos movidos a etanol (HEV, alternativa 2), e convencionais *flex* movidos a etanol (ICEV, alternativa 3), como mostra o Quadro 1.

Quadro 1: Alternativas propostas para a redução das emissões de GEE no Senado

Situação atual (o)	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Eletricidade somente da rede pública	Eletricidade parcialmente fornecida por geração fotovoltaica		
ICEV movido somente a gasolina	BEV	HEV movido a etanol	ICEV movido a etanol

Fonte: elaboração própria.

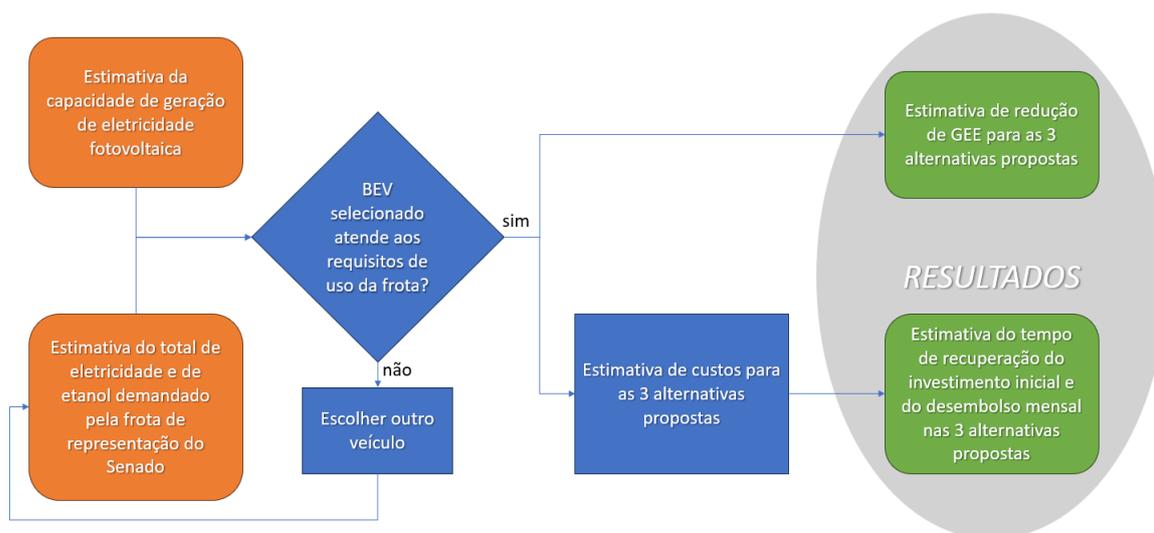
Portanto, a estratégia aqui proposta envolve duas ações: a substituição (parcial) da energia elétrica proveniente da rede pública por outra PV, a qual

² Assumiu-se, por simplicidade das modelagens, que a frota seja composta por 80 Sentras. Além disso, como não havia híbridos *plug-in* (PHEV) *flexfuel* ofertados no Brasil quando as simulações aqui apresentadas foram realizadas, não foram considerados neste trabalho.

apresenta intensidade carbônica quase três vezes menor que aquela (EPE, 2022a e 2022b). E também a substituição da gasolina que move a frota de veículos do Senado pela eletricidade advinda dos painéis PV (no caso dos BEV), ou por etanol de cana de açúcar (HEV e ICEV), o qual também apresenta grande capacidade de redução das emissões de CO_{2eq} (de 39% a 58%) em comparação com o combustível fóssil (Velandia Vargas *et al.*, 2022; Mera *et al.*, 2023; Gauto *et al.*, 2023).

A partir das informações levantadas na pesquisa bibliográfica e documental, onde constam o consumo de eletricidade e de gasolina da frota de representação, foram realizados os cálculos e estimativas condensados no fluxograma da Figura 1, que os apresenta na sequência em que foram elaborados, e que serão detalhados nos subitens seguintes.

Figura 1: Fluxograma dos cálculos estimativos realizados



Fonte: elaboração própria.

Para o desenvolvimento das alternativas, foram selecionados veículos de porte semelhante aos atuais. O BEV escolhido foi o JAC E-J7, por ter o menor custo de aquisição na categoria de sedãs elétricos, enquanto as opções com motor a combustão selecionadas foram o Toyota Corolla, tanto em sua versão convencional, como em sua versão híbrida, por ser o *flex* de menor preço da categoria que oferecia essas duas alternativas ao mesmo tempo.

2.1. CAPACIDADE DE GERAÇÃO LOCAL DE ENERGIA SOLAR

Para a estimativa de produção mensal de energia fotovoltaica foi considerado 60% da área total disponível de lajes de cobertura, suficiente para descontar possíveis interferências e a necessidade de espaçamento entre as fileiras de placas para evitar sombreamentos e dar-lhes manutenção. A Figura 2 mostra os possíveis locais de instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura de edificações do Senado. A escolha do tipo de painel se deu por meio da busca do menor custo do kWp no mercado nacional. A partir desse ponto, com dados da irradiação diária obtida no sítio eletrônico do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – Cresesb (2023), e considerando as perdas típicas dessas instalações (20%), chega-se à geração fotovoltaica anual em MWh, apresentada no Quadro 2.

Figura 2: Locais para instalação dos painéis PV nos edifícios do Senado



Fonte: elaboração própria a partir do Google Earth.

Quadro 2: Geração diária e mensal disponível do parque solar proposto

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Prod diária média disponível (MWh)	8,1	8,7	8,2	8,8	8,9	9,3	9,6	10,8	9,6	8,7	7,7	8,0	8,9
Prod mensal disponível (MWh)	251,5	244,7	254,0	263,2	276,9	277,7	297,4	333,3	288,3	270,5	230,3	248,0	269,6

Fonte: elaboração própria com dados de irradiação de Cresesb (2023).

2.2. ELETRICIDADE E ETANOL DEMANDADOS NAS TRÊS ALTERNATIVAS PROPOSTAS

A demanda por eletricidade ou etanol dos veículos pode ser obtida pelo quociente entre (i) a distância média percorrida mensalmente pela (ii) eficiência energética do veículo, declarada pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) do Inmetro (2024). Para esse estudo, a distância média percorrida (que não foi informada nas planilhas de entrada) foi determinada multiplicando-se o total de gasolina consumida pela eficiência energética, informada no PBEV, dos veículos atuais. Foram utilizados os dados do ano de 2023, primeiro ano de uso regular dos veículos pós-pandemia. A demanda total estimada por eletricidade e etanol para os três casos propostos é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3: Demanda total estimada por eletricidade e etanol para os três casos propostos

Mês	Nº Veícs	Consum (l) gas atual	Consum (l) etanol atual	Dist mês (km) percorr frota	Dem mês eletr (kWh) Alt 1	Dem mês etanol Alt 2 - HEV (l)	Dem mês etanol Alt 3 - ICEV (l)
Jan	67	9.177,3	0	100.950	14.021	7.887	11.738
Fev	76	12.454,1	0	136.995	19.027	10.703	15.930
Mar	76	17.201,9	0	189.221	26.281	14.783	22.002
Abr	76	13.692,8	0	150.620	20.919	11.767	17.514
Mai	79	15.264,7	0	167.912	23.321	13.118	19.525
Jun	79	12.049,9	0	132.548	18.409	10.355	15.413
Jul	79	8.835,0	0	97.185	13.498	7.593	11.301
Ago	79	17.195,4	0	189.150	26.271	14.777	21.994
Set	79	13.969,8	0	153.667	21.343	12.005	17.868
Out	79	14.926,0	0	164.186	22.804	12.827	19.091
Nov	79	15.776,1	0	173.537	24.102	13.558	20.179
Dez	79	12.919,3	0	142.113	19.738	11.103	16.525
Média		13.621,85	0	149.840	20.811	11.706	17.423

Fonte: elaboração própria.

Obs.: Em itálico estão os dados de entrada, os demais dados são estimativas dos autores.

2.3. REQUISITOS ESPECÍFICOS DOS BEV

Especificamente em relação à alternativa 1 (troca frota atual por BEV) é necessário verificar se o veículo escolhido é capaz de atender à autonomia necessária ao deslocamento dos senadores; e se a usina solar poderia alimentá-los

integralmente³ em relação à eventual potência necessária para múltiplas recargas semirrápidas ao mesmo tempo, e em relação à quantidade de energia produzida.

Quanto à autonomia necessária, o PBEV (Inmetro, 2024) informa que o JAC E-J7 é capaz de rodar 263 km com carga total na bateria, suficiente para atender a cerca do triplo da distância média percorrida em dias úteis (88 km), ou a mais do que o dobro no mês que teve a maior exigência, que foi março de 2023 (113 km). Por esse motivo, a princípio, não se previu a necessidade de recarga rápida nos cálculos que elaboramos, e foi especificada a instalação de 10 carregadores de corrente alternada (AC) de 22kW⁴ (1 a cada 8 veículos), os quais seriam mais que suficientes para abastecer a frota sob alguma forma de rodízio em sua utilização.

Em outra frente, ainda que seja produzido apenas 10% da geração de pico (de 2.012 kWp), em função de possíveis condições climáticas adversas, restaria uma potência útil disponível de 201,2 kW, a qual seria suficiente para continuar a usar os carregadores a até 91,5% de sua capacidade, mesmo acoplados a veículos capazes de carregamento AC de 22 kW. De todo modo, caso o Senado entenda necessário dispor de ainda mais potência para recargas em simultâneo durante períodos mais nublados, seria possível contar ainda com a folga que existe na demanda contratada com a concessionária de energia para instalação de outros carregadores e/ou carregadores rápidos de 40kW, sem incorrer em custos adicionais por ultrapassagem de demanda ou necessidade de renegociação contratual (Senado Federal, 2024a).

Por fim, em relação à *quantidade* de energia demandada mensalmente pelos BEV, trata-se de requisito plenamente atendido, pois o total estimado de geração do parque solar proposto (269,9 MWh) é quase 13 vezes, em média, maior que a demanda veicular (20,8 MWh). Ou seja, mesmo no caso da

³ Para aproveitar a sinergia entre os painéis PV e os BEV (custo marginal zero de abastecimento), bem como porque a energia assim gerada tem intensidade carbônica muito menor que aquela disponível na rede pública.

⁴ Embora a potência máxima de recarga do veículo escolhido seja de 7kW AC, especificamos essa configuração de carregador, porque sua diferença de preço é pequena para um de menor capacidade, e não será necessário substituí-los quando houver uma frota capaz de carregar a 22kW AC.

alternativa 1, haveria ampla sobra de eletricidade gerada localmente para ser utilizada pelas edificações do Senado.

2.4. ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DOS GEE NAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS

O cálculo das emissões de GEE baseou-se na Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), a qual é empregada para se quantificar o uso de recursos e emissões relacionadas a um produto ou serviço (Velandia Vargas *et al.*, 2022). Sinteticamente, estimou-se a quilometragem percorrida na operação da frota do Senado, bem como levantou-se a quantidade de energia consumida por suas edificações (ambas baseadas nos dados de 2023) e estas foram multiplicadas por índices de intensidade carbônica disponíveis na literatura.

Buscou-se, portanto, estudos que quantificassem as emissões do “berço ao túmulo”,⁵ segundo uma abordagem atributiva capaz de informar os valores médios para a intensidade de carbono (em gCO_{2eq}) emitida para cada kWh de eletricidade utilizada, e por km rodado.

No caso da geração elétrica, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima os valores de intensidade carbônica em 118,5 gCO_{2eq}/kWh para a energia disponibilizada na rede pública nacional (EPE, 2022a), e de 41 gCO_{2eq}/kWh para a eletricidade de origem fotovoltaica (EPE, 2022b).

No caso dos veículos, buscou-se estudos que usassem uma mesma metodologia para estimar a intensidade carbônica tanto daqueles com motor a combustão quanto elétricos. Os valores encontrados na literatura, entretanto, apresentam razoável variação, seja porque diferentes abordagens e pressupostos⁶ são utilizados quando de sua elaboração (Velandia Vargas *et al.*, 2022), seja porque o maior número das fontes levantadas baseia-se em etanol com intensidade carbônica diferente do nacional, e em diferentes proporções de

⁵ Segundo o Projeto de Avaliação do Ciclo de Vida do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict, 2024), as emissões do “berço ao túmulo” consideram todas as fases do ciclo de vida de um produto, ou seja, “todas as etapas de produção e uso do produto, relativas à extração das matérias-primas, passando pela produção, distribuição até o consumo e disposição final, contemplando também reciclagem e reuso quando for o caso”.

⁶ Tais como a vida útil assumida para os veículos, a forma de contagem da emissão decorrente da fabricação de seus componentes, baterias e combustíveis, etc.

suas misturas na gasolina (por exemplo: Ternel *et al.*, 2021; Bieker, 2021; Bieker *et al.*, 2022; Buberger *et al.*, 2022).

Mesmo no caso de estudos baseados no etanol brasileiro (Velandia Vargas *et al.*, 2022; Gauto *et al.*, 2023), eles foram baseados em gasolina E22 (22% de mistura de etanol), que já não é mais comercializada no Brasil. Em síntese, dentre os estudos levantados, apenas aquele produzido por Mera *et al.* (2023) foi baseado na gasolina E27, ora comercializada no País, e por esse motivo foi selecionado como base para os cálculos deste artigo.

No caso específico da alternativa 1 (BEV), que não utiliza eletricidade da rede pública, foi necessário um pequeno ajuste em relação aos valores apontados por Mera *et al.* (2023). Na prática, utilizou-se a informação desses autores no tocante à intensidade da fabricação (veículo mais bateria) e de manutenção do veículo, mas para o uso do energético, parte-se dos 41 gCO_{2eq}/kWh referentes à intensidade carbônica da eletricidade de origem solar fotovoltaica (EPE, 2022b) e da eficiência energética de 7,20 km/kWh do JAC E-J7 (Inmetro, 2024), as quais combinadas redundam em uma emissão de 5,7 gCO_{2eq}/km para esse componente do índice.

2.5. ANÁLISE DE CUSTOS DAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS

Para se determinar a viabilidade econômica das alternativas propostas, é necessário estimar, (a) os custos da instalação do parque solar proposto, mais seus carregadores veiculares, (b) a economia ou gasto adicional decorrente da troca da gasolina por eletricidade ou etanol, bem como (c) o valor adicional no aluguel dos veículos em função da especificação de modelos com preço diferente (mais caros) em relação aos atuais.

2.5.1. Custo de instalação do parque solar

Para as estimativas da instalação da usina solar foi elaborada uma regressão linear (com R² de 99,98%) estimada a partir dos dados publicados por Portal Solar (2024), que informam os preços médios de mercado para a instalação de usinas de geração PV em função de 13 capacidades (em kWp) diferentes. Aplicando-se o valor de pico previsto de 2.012 kWp a essa equação,

resulta em um custo de R\$ 5.768.495,20 para a instalação do parque PV proposto.

Especificamente para a alternativa 1, adicionalmente, foi estimado em R\$ 62.990,00 o custo de instalação de 10 carregadores veiculares de 22 kW, tomando-se por base produtos com ampla disponibilidade no mercado.

2.5.2. Custo com a demanda prevista dos energéticos nas alternativas propostas

Como ainda não se dispõe do preço médio dos combustíveis no corrente ano (2024), estabeleceu-se um preço projetado para a gasolina e para o etanol, que serviu de base para os cálculos deste trabalho. Começando pela gasolina, calculou-se o valor médio pago pelo Senado em 2023 (primeiro ano pós pandemia com uso normal da frota), e a esse valor foi aplicada a variação da inflação desse ano medida pelo IPCA (4,62%), que resultou no valor de R\$ 5,79 para a gasolina C utilizada nos cálculos deste artigo.

Quanto ao etanol, como seu preço sofre grandes variações tanto intra- anuais (safra/entressafra, fatores climáticos), como ao longo dos anos (dinâmicas dos mercados de etanol e açúcar, etc.), optou-se por definir seu valor projetado em função da média histórica da relação de seu preço com o da gasolina C nos postos do Distrito Federal (DF), conforme informado pela ANP (2023 e 2024). Aplicando-se esse índice ao valor sintético da gasolina C, chegou-se ao valor sintético de R\$ 4,57 para o litro do biocombustível no DF.

2.5.3. Redução do valor da conta de energia nas alternativas propostas

Grosso modo, a economia na conta de energia em todas as alternativas será proporcional à soma da redução do consumo de eletricidade da rede pública, combinado com o crédito decorrente do que eventualmente nela for injetado (isto é, o excedente de produção da usina PV que não for consumido pelas edificações do Senado ou por uma frota de BEV). O cálculo da alternativa 1 (BEV) diverge dos demais no sentido de que primeiro se deve descontar a energia elétrica necessária aos veículos elétricos do total produzido localmente, antes de se estimar a economia alcançada.

Ao custo médio de R\$ 0,82 por kWh consumido pelo Senado em 2023 (primeiro ano com consumo normal pós-pandemia), foi aplicado o índice médio de reajuste tarifário de 7,78% para consumidores em alta tensão (Neoenergia, 2023), o que resultou no valor médio de R\$ 0,89 por kWh estimado para o ano de 2024.

2.5.4. Custo adicional do contrato de aluguel nas alternativas propostas

O Senado gasta R\$ 377.893,00 por mês com o aluguel dos veículos que utiliza em sua frota de representação (Senado Federal, 2023). Nesse valor estão incluídos os combustíveis, a prestação de serviços de manutenção preventiva e corretiva dos veículos, lavagem automotiva, seguros, taxas e impostos (Senado Federal, 2023).

Assim, para se estimar os novos valores de aluguel que decorreriam das alternativas propostas, não basta simplesmente aumentá-los proporcionalmente ao preço (mais elevado) dos veículos escolhidos, pois há que se considerar as diferenças entre o que será gasto a mais ou a menos com os novos energéticos (eletricidade e etanol) e com o pagamento do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA), uma vez que esse valor não incide sobre veículos elétricos e híbridos no DF⁷. Quanto aos demais itens (como manutenção), considera-se que sua diferença entre os veículos ou seria pequena, ou seria proporcional ao valor dos veículos (como seguros), e, assim, optou-se por ignorá-los no cálculo aqui delineado.

2.6. TEMPO DE RECUPERAÇÃO DO INVESTIMENTO NAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS

Para se calcular o tempo de recuperação do investimento a ser realizado nas alternativas apontadas, considerou-se o investimento inicial correspondente à instalação da usina de geração solar (obtida em 2.5.1), e desta mais a instalação de carregadores veiculares na alternativa 1. A esse montante inicial, no primeiro mês de funcionamento das alternativas, adicionou-se os novos preços dos contratos automotivos (obtido em 2.5.4) mais o custo com o

⁷ Por força do inciso XIII, do art. 2º, da Lei Distrital nº 6.466, de 27 de dezembro de 2019 (Distrito Federal, 2019).

consumo dos energéticos (obtido em 2.5.2) e subtraiu-se a economia com a conta de energia elétrica (obtida em 2.5.3). A esse resultado, aplicou-se a taxa SELIC de 0,83%⁸ ao mês (Receita Federal, 2024).

Esse processo é, então, repetido para os meses subsequentes, até que o montante inicial seja zerado. Esse é o momento no qual há a recuperação do investimento para cada uma das alternativas propostas.

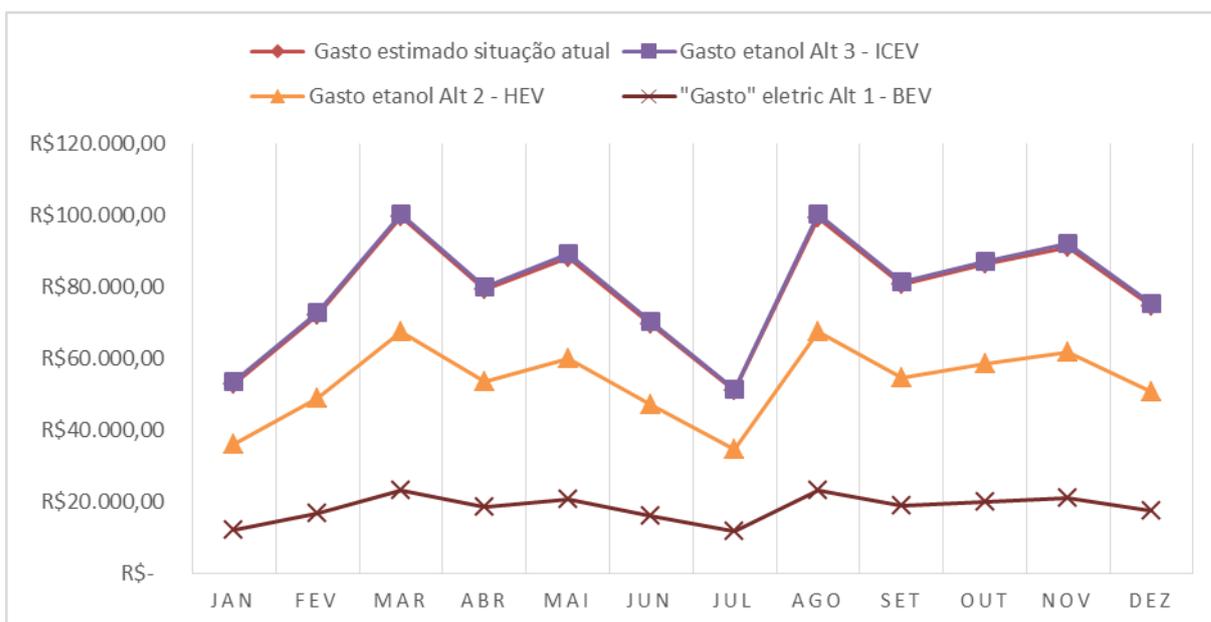
3 RESULTADOS DAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE NO SENADO

Os resultados da avaliação técnico-econômica do uso de Sistemas Híbridos de Energia Renovável, conforme cálculos apresentados na seção de metodologia, indicam que o Senado brasileiro faria uma boa escolha se optasse por qualquer uma das três alternativas apresentadas, já que haveria significativa redução na emissão de GEE em todas elas. A usina local de geração solar PV substituiria, parcialmente, o uso de eletricidade advinda da rede pública, que tem intensidade carbônica mais elevada, e os veículos propostos substituiriam uma frota que necessita, no caso do Senado, de mais de 13,6 mil litros mensais de gasolina para ser movimentada. O estudo, entretanto, sugere algumas especificidades com base nas três alternativas apresentadas que devem ser consideradas ao se reproduzir estes cálculos com outros consumidores institucionais.

A primeira reflexão é acerca do total que será gasto com o consumo dos energéticos pela frota de veículos (Figura 3). Perceba-se, primeiramente, que as linhas da situação atual e da alternativa 3 (ICEV etanol) são praticamente superpostas, o que indica que, para esse caso, o Senado gastaria praticamente os mesmos valores com etanol, em relação ao que hoje já desembolsa com gasolina.

⁸ Valor de março de 2024.

Figura 3: Gasto mensal estimado com energéticos para mover a frota de representação do Senado nas alternativas propostas



Fonte: elaboração própria.

Pode-se dizer que esse resultado já seria esperado, pois o preço desses dois energéticos segue uma dinâmica que tende ao equilíbrio em função de seus rendimentos em veículos com motorização flex semelhante. Digno de nota é o fato de que o Senado passaria a gastar por mês, em média, 67,8% na alternativa 2 (HEV) em comparação ao que paga hoje pela gasolina, e apenas 23,4% com eletricidade na alternativa 1 (BEV)⁹ (Quadro 3).

Quadro 3: Média mensal de gasto com energéticos para mover a frota de representação do Senado, e sua proporção em relação à situação atual

	Gasto estimado situação atual	"Gasto" eletric Alt 1 – BEV	Gasto estim etanol Alt 2	Gasto estim etanol Alt 3
Média mensal	R\$ 78.823,94	R\$ 18.446,45	R\$ 53.467,20	R\$ 79.579,09
Proporção em relação à situação atual		23,4%	67,8%	101,0%

Fonte: elaboração própria.

⁹ Embora os BEV sejam abastecidos a custo marginal zero com a energia da usina PV (a qual, após instalada, produz praticamente sem custos extras), ainda assim, indiretamente, pode-se inferir o custo da eletricidade utilizada subtraindo-se a estimativa da conta de eletricidade prevista na alternativa 1 daquela das alternativas 2/3.

O Quadro 4 apresenta as emissões mensais do consumo de eletricidade em função da instalação da usina solar PV nas três alternativas. Prevê-se uma redução anual da emissão de 231,4 toneladas de CO_{2eq} na alternativa 1 (que utiliza mais energia elétrica para mover a frota de BEV), e de 250,8 toneladas de CO_{2eq} no caso das alternativas 2 e 3.

Quadro 4: Emissões atuais e das alternativas propostas devido ao uso da eletricidade no Senado

Emissões consum eletr da rede (2023)			Emissões uso eletr da rede Altern 1 (BEV)	Emissões uso eletr da rede Altern 2 e 3 (HEV/ICEV)
Mês	Consumo (kWh)	Emissões (ton CO _{2eq})	Emissões (ton CO _{2eq})	Emissões (ton CO _{2eq})
Jan	1.406.170	166,6	148,2	147,1
Fev	1.451.511	172,0	154,5	153,0
Mar	1.420.786	168,4	150,7	148,7
Abr	1.620.610	192,0	173,3	171,6
Mai	1.415.531	167,7	148,1	146,3
Jun	1.540.751	182,6	162,5	161,1
Jul	1.296.220	153,6	131,6	130,6
Ago	1.274.123	151,0	127,2	125,2
Set	1.496.844	177,4	156,7	155,0
Out	1.553.049	184,0	164,8	163,1
Nov	1.705.551	202,1	186,1	184,3
Dez	1.682.347	199,4	181,7	180,1
TOTAL		2116,8	1885,4	1866,1
Redução			231,4	250,8

Fonte: elaboração própria.

O Quadro 5 apresenta os montantes de redução dos GEE que decorreriam da eletrificação e/ou da substituição da gasolina por etanol na frota do Senado. A alternativa 1 (BEV) apresenta significativa redução das emissões, de 265,7 toneladas de CO_{2eq}, enquanto as alternativas 2 (HEV) e 3 (ICEV *flex*) apresentam reduções também substanciais, de 160 e de 142 toneladas de CO_{2eq}, respectivamente. Em porcentagem, esses valores representam 79,5%, 47,8% e de 42,5% de redução para as alternativas 1, 2 e 3, respectivamente. Ou seja, nos casos de frotas maiores que as do Senado, a estratégia de associar a recarga de BEVs à instalação de usinas PV pode oferecer ganhos ainda mais expressivos que os expostos no Quadro 6, que consolida as reduções de GEE da substituição das frotas e da substituição parcial da eletricidade usada pelo Senado.

Quadro 5: Emissões atuais e das alternativas no uso da frota de representação do Senado

Emissões do uso veículos atuais (2023)		Emissões uso veículos Alternativa 1 (BEV)	Emissões uso veículos Alternativa 2 (HEV)	Emissões uso veículos Alternativa 3 (ICEV)
Mês	dist percor (km)	Emissões (ton CO2eq)	Emissões (ton CO2eq)	Emissões (ton CO2eq)
Jan	100.950	18,8	3,9	9,8
Fev	136.995	25,5	5,2	13,3
Mar	189.221	35,2	7,2	18,4
Abr	150.620	28,0	5,8	14,6
Mai	167.912	31,2	6,4	16,3
Jun	132.548	24,7	5,1	12,9
Jul	97.185	18,1	3,7	9,4
Ago	189.150	35,2	7,2	18,3
Set	153.667	28,6	5,9	14,9
Out	164.186	30,5	6,3	15,9
Nov	173.537	32,3	6,6	16,8
Dez	142.113	26,4	5,4	13,8
Total emissão veículos		334,4	68,7	174,4
Emissões evitadas			265,8	160,0
% de redução			79,5%	47,8%

Fonte: elaboração própria.

O Quadro 6, além de consolidar as informações dos Quadros 4 e 5, apresenta o tempo de *payback*, ou seja, de retorno dos investimentos, e atualiza os novos valores que o Senado pagaria mensalmente nas alternativas propostas devido ao aluguel dos veículos, à conta de energia elétrica e à aquisição de etanol (nas alternativas 2 e 3).

Quadro 6: Redução de emissões de GEE, tempo até o *payback*, e valor que o Senado pagaria mensalmente pelo aluguel, energia e etanol nas alternativas propostas

Emissões em tCO2eq	Presente	Altern 1 (BEV)	Altern 2 (HEV)	Altern 3 (ICEV)
Emissões eletricidade	2117	1885	1866	
Emissões veículos	334	69	174	192
Total emissões	2451	1954	2040	2058
Redução de emissões	-	497	411	393
	-	20,3%	16,8%	16,0%
Meses até o <i>payback</i>	-	45	31	30
aluguel+comb+eletr	R\$ 1.697.369,30	R\$ 1.541.203,39	R\$ 1.484.701,78	R\$ 1.477.061,36

Fonte: elaboração própria.

Ainda sobre o Quadro 6, verifica-se que as medidas propostas permitiriam reduções nas emissões de GEE de 16% (alternativa 3) a 20,3% (alternativa 1), pois, como apontado anteriormente, há expressivas reduções na intensidade carbônica tanto no uso da energia fotovoltaica em substituição à da rede pública (2,9 vezes, segundo EPE, 2022a, combinado com EPE, 2022b), como na utilização de eletricidade PV nos veículos em substituição à da rede pública (quase 3,5 vezes, a partir de Mera *et al.*, 2023, combinado com EPE, 2022b), e no emprego do etanol em substituição à gasolina nos veículos (pouco menos da metade, segundo Mera *et al.*, 2023).

Mesmo em relação ao *payback* do investimento inicial, as diferenças são pequenas, variando, respectivamente, de 30 e 31 meses para as alternativas 3 e 2, a 45 meses na alternativa 1. Além disso, em todas as alternativas, após o tempo necessário de *payback*, o Senado gastaria menos com essas fontes de dispêndio do que no caso atual, o que demonstra que adotar qualquer um deles significaria cumprir não só com as responsabilidades do órgão no tocante ao meio ambiente, como também se constituiria em opção sensata do ponto de vista econômico.

O maior tempo de *payback* da alternativa 1 merece um comentário adicional, no sentido de que embora apresente um custo muito baixo para a recarga veicular (cerca de R\$ 18,5 mil contra quase R\$ 79 mil de gasolina na situação atual), por outro lado, ele também teria o maior valor projetado para o pagamento mensal do contrato de aluguel dos veículos, em função do custo significativamente mais alto do E-J7 em relação aos Sentras atuais. Contudo, é de se registrar, também, a curiosidade positiva de que no decurso dos meses envolvidos nessa pesquisa e na elaboração deste artigo (desde o começo de 2023 até março de 2024), o tempo de *payback* da alternativa 1 se reduziu a menos da metade, em função da tripla redução ocorrida nesse período: de preço do automóvel JAC, dos custos médios da instalação da usina fotovoltaica e da taxa de juros.

A se continuar a tendência global de redução dos preços dos veículos elétricos (IEA, 2023), e o contínuo aumento de oferta e de queda no preço das placas PV (IEA, 2024), é de se esperar tempos de *payback* ainda mais curtos da

alternativa 1, o qual estimamos que seria igual ao da alternativa 3 caso, por exemplo, o BEV custasse cerca de R\$ 205.000.

Por outro lado, com a gradual majoração do Imposto de Importação (II) de veículos elétricos e de placas solares determinada ao fim de 2023, é possível que esse processo de redução de preços se torne um pouco mais lento no Brasil. Entretanto, ainda assim, é razoável supor que continue, não só pela contínua queda de preços apontada pela IEA (que podem compensar uma parte do aumento do II), mas também porque em breve haverá a produção de BEVs no Brasil ou em países com quem temos acordo comercial (como Argentina e México).

4 DISCUSSÃO

Este artigo propôs três alternativas para a descarbonização de grandes consumidores institucionais que envolvem a substituição parcial do consumo de eletricidade da rede pública por geração local PV e a substituição da gasolina da frota veicular por eletricidade e/ou etanol. Para testar a viabilidade destas alternativas, foi escolhido como caso de estudo o Senado Federal do Brasil por se considerar que o setor público deve assumir o protagonismo ao propor o uso consciente dos recursos energéticos, com vistas à redução da emissão de GEE, além de prezar pela economia dos recursos públicos.

Todas as três propostas foram desenvolvidas com base em dados reais e se mostraram plenamente factíveis, com potencial de redução das emissões de GEE do Senado Federal em até 20,3% em relação à situação atual. O nível mais elevado de redução seria atingido com a adoção da alternativa 1 (BEV), que, por outro lado, teria como desvantagem um tempo mais longo de *payback* do investimento inicial, e com menores economias de custeio após essa amortização. Por outro lado, as alternativas 2 e 3, que envolvem o uso de veículos movidos a etanol, demandariam menos tempo de *payback*, e permitiriam mais economias futuras com o custeio do Senado, ao passo que ofereceriam menores reduções nas emissões de GEE em relação à situação atual.

Apesar desta relação simbiótica já identificada entre geração PV local e frota de veículos menos dependente dos combustíveis fósseis (Zhou *et al.*,

2019), alguns cuidados são necessários a fim de evitar impactos negativos, seja na implantação de usinas solares PV, seja em função da integração dos veículos elétricos com a infraestrutura predial.

No caso da implantação da geração solar PV em edifícios, os benefícios variam conforme a região, como já havia demonstrado Silva *et al.* (2021) em seu estudo sobre a implantação de energia PV em edificações localizadas em diversas cidades do Piauí – o que não é de se estranhar, dado o fato de que apresentam latitude e condições climáticas diversas. Outro aspecto também apontado por Silva *et al.* (2021) é que o tipo e a quantidade de áreas disponíveis para a instalação dos painéis PV influenciam no resultado técnico e econômico de sua implantação; leia-se, para além da quantidade de áreas disponíveis, há que se considerar a angulação, o sombreamento que a área está sujeita e a direção das coberturas das edificações.

Ademais, os resultados apresentados neste estudo também podem variar em função do tamanho da frota de veículos a ser alterada, já que é neste quesito onde se encontram os maiores ganhos em potencial de redução de GEE da estratégia aqui delineada – quanto maior a quantidade de veículos a serem eletrificados ou movidos a etanol, maiores serão as reduções esperadas na emissão de GEE. Os riscos, neste caso, têm relação com os impactos não controlados dos veículos elétricos na infraestrutura predial. Para se antecipar a eventos deste tipo, é recomendável o gerenciamento mais eficaz dos recursos, o que passa por uma análise prévia do desempenho energético da edificação, com o emprego de estratégias que possibilitem gerenciar o comportamento dos veículos elétricos, monitorando sua demanda de energia em tempo real (Souza *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÕES

A crescente demanda por recursos energéticos nas edificações é uma realidade que requer atenção e a proposição de estratégias de mitigação de efeitos negativos. A geração distribuída de energia renovável, com usina solar PV, combinada com frotas de veículos com menor emissão de GEE (HEV e ICEV com uso do etanol, e BEV), resultam em soluções que podem ser incorporadas nas edificações de forma a promover a descarbonização. A demanda por

descarbonização se mostra particularmente necessária no caso dos grandes consumidores institucionais. No âmbito desta discussão, este artigo demonstrou que a combinação de soluções entre o setor de energia com a adoção de frotas de veículos mais sustentáveis promovem interações positivas para as edificações, se colocando como altamente necessárias face aos desafios atuais da transição energética. A integração entre os veículos elétricos com o sistema solar PV resulta, inclusive, em uma maior autossuficiência dos edifícios.

Naturalmente, tais resultados apresentados por este estudo são baseados na realidade dos custos levantados até março de 2024, os quais podem (e devem) mudar em função da continuidade esperada da dinâmica de redução de preço dos BEVs e das placas solares, que tendem a tornar esta opção a mais vantajosa não só na mitigação das emissões de GEE, mas também do ponto de vista econômico e de custos.

De todo modo, tais estratégias são passíveis de serem adotadas por grandes consumidores institucionais de eletricidade e de gasolina, os quais poderiam fazer uso das etapas aqui delineadas de instalação de usinas solares locais associadas à substituição de frotas por veículos com menor emissão de GEE, sejam eles elétricos ou movidos a etanol.

Ademais, como esses órgãos operam, em geral, durante o dia, o período de funcionamento coincide com o pico da geração solar. Em outras palavras, a geração local diretamente associada a uma demanda diurna ajuda a potencializar os benefícios da geração PV (menores emissões de GEE e menor custo por kWh) e dispensa a necessidade de armazenamento ou de transmissão de energia. Além disso, caso as frotas sejam substituídas por BEVs, para além dos menores índices de emissão carbônica em seu uso, essa alternativa poderia até ajudar a dar destinação a eventuais excessos de oferta de eletricidade da rede pública ao longo do dia.

Como limitações deste artigo, deve-se ponderar que, por se tratar de um exercício de cunho exploratório, as especificações aqui apresentadas foram baseadas nos pressupostos apontados ao longo do texto. Evidentemente, na eventualidade de sua implantação, os números efetivos podem (e devem) apresentar diferenças em relação aos resultados apresentados, em função das exatas especificações do projeto que venha a ser executado.

Por fim, como recomendação para estudos futuros, outros trabalhos poderiam explorar os montantes de redução de emissão de GEE em outros órgãos (ou mesmo em conjunto de órgãos) que decorreriam da estratégia aqui proposta. Além disso, seria interessante ter mais estimativas de intensidade carbônica no uso dos veículos para a realidade nacional, particularmente no uso de veículos híbridos movidos a etanol, modalidade que tende a crescer em nosso País ao longo dos próximos anos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Humberto Mendes de Sá Formiga, Rodrigo Foresta Wolffenbüttel e Rodrigo Ribeiro Novaes pela ajuda que nos permitiu levantar os dados e aperfeiçoar a redação deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adefarati, T., Obikoya, G. D., Sharma, G., Onaolapo, A. K., & Akindeji, K. T. (2024). Design and feasibility analysis of grid-connected hybrid renewable energy system: perspective of commercial buildings. *Energy Systems*, 15(1), 403–462. <https://doi.org/10.1007/s12667-023-00578-z>.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2023). *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2023*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. – Rio de Janeiro: ANP.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2024). *Levantamento de Preços de Combustíveis (últimas semanas pesquisadas)*. Recuperado em 28 de março de 2024, de: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>.

Bieker, G. (2021). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. *Communications*, 49(30), 847129-102.

Bieker, G.; Moll, C.; Link, S.; Plötz, P.; & Mock, P. (2022). More bang for the buck: A comparison of the life-cycle greenhouse gas emission benefits and incentives of plug-in hybrid and battery electric vehicles in Germany. *International Council on Clean Transportation*: Washington, WA, USA.

Cavalcante I, Júnior J, Manzolli JA, Almeida L, Pungo M, Guzman CP, Morais H. (2023). *Electric Vehicles Charging Using Photovoltaic Energy Surplus: A Framework Based on Blockchain*. *Energies*. 16(6):2694. <https://doi.org/10.3390/en16062694>.

Corradi, C.; Sica, E.; Morone, P. (2023). What drives electric vehicle adoption? Insights from a systematic review on European transport actors and behaviours. *Energy Research & Social Science*, 95, 102908. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102908>.

Cresesb (2023). Recuperado em 10 de abril de 2023, de: <http://www.cresesb.cepel.br/>.

Distrito Federal (2019). *Lei Distrital nº 6.466, de 27 de dezembro de 2019*. Recuperado em 15 de setembro de 2023, de: <https://dflegis.df.gov.br/ato.php?tipo=ficha&p=lei-6466-de-27-de-dezembro-de-2019>.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2022a). *Balanço Energético Nacional – Relatório Síntese 2022, ano Base 2021*. Brasília-DF, Ministério de Minas e Energia 67p.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2022b). *Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário – Intensidade de carbono das fontes de energia*. Nota Técnica. Brasília-DF, Ministério de Minas e Energia 32p.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2024). *Balanço Energético Nacional Interativo*. Recuperado em 3 de agosto de 2024, de: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/ben/>.

Gauto, M. A.; Carazzolle, M. F.; Rodrigues, M. E. P.; de Abreu, R. S.; Pereira, T. C.; & Pereira, G. A. G. (2023). Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. *Energy for Sustainable Development*, 76, 101261. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101261>.

Geels, F. W.; & Schot, J. (2010). The Dynamics of Transitions: A Socio-Technical Perspective¹. In J. Grin, J. Rotmans, & J. Schot (Eds.), *Transitions to Sustainable Development: New Directions in the Study of Long Term Transformative Change* (pp. 11-93)². Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203856598>.

Geels, F. W. (2012). A socio-technical analysis of low-carbon transitions: introducing the multi-level perspective into transport studies. *Journal of Transport Geography*, 24, 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.021>.

Geels, F. W. (2019). Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 39, 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.06.009>.

González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. In *Energy Reports* (Vol. 8, pp. 626–637). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.280>.

International Energy Agency (IEA). (2023). *Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions*. Recuperado em 26 de setembro de 2023, de: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.

International Energy Agency (IEA). (2024). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028* [PDF]. Recuperado em 17 de abril de 2024, de: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.

Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – Ibict. (2024). *O que é Avaliação do Ciclo de Vida*. Recuperado em 12/06/2024, de: <https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). (2024). *Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular*. Recuperado em 28/03/2024, de: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

JAC Motors (2023). *JAC E-J7*. Recuperado em 17 de junho de 2023, de: <https://www.jacmotors.com.br/veiculos/eletricos-detalhes/e-j7>.

Khosravani, A., DeHaan, M., Billings, B. W., & Powell, K. M. (2024). Electrification of residential and commercial buildings integrated with hybrid renewable energy systems: A techno-economic analysis. *Energy*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131893>.

Li, C. Z., Lai, X., Xiao, B., Tam, V. W. Y., Guo, S., & Zhao, Y. (2020). A holistic review on life cycle energy of buildings: An analysis from 2009 to 2019. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 134). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110372>.

Li, T., Shapiro, M. A., Heidarinejad, M., & Stephens, B. (2024). Ten questions concerning building electrification. *Building and Environment*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111653>.

Markard, J.; Raven, R.; & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955-967. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>.

Markard, J. (2018) The next phase of the energy transition and its implications for research and policy. *Nat Energy* 3, 628–633. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0171-7>.

Mera, Z.; Bieker, G.; Rebouças A. B.; Cieplinski, A. (2023). *Comparação das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida de Carros de Passeio a Combustão e Elétricos no Brasil*. International Council on Clean Transportation. Washington DC, EUA.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). (2020). *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC*. Recuperado em 7 de maio de 2024, de: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/4_com_nac_brasil_web.pdf.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). 2023. *3ª Atualização da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC)*. Recuperado em 7 de maio de 2024, de: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC>.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). 2025. *Programa Agenda Ambiental na Administração Pública (A3P)*. Disponível em: <http://a3p.mma.gov.br>. Acesso em: 31 jul. 2024.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). 2025b. *Indicadores de Desempenho da A3P*. Disponível em: http://a3p.mma.gov.br/wp-content/uploads/Como_Implantar_a_A3P/Documentos/tab-5-Indicadores-da-A3P-versao-final.pdf. Acesso em: 31 jul./2024.

Neoenergia (2023). *Aneel define índice de reajuste anual das tarifas da Neoenergia Brasília*. Recuperado em 10 de abril de 2024, de: <https://www.neoenergia.com/web/brasil/w/aneel-define-indice-reajuste-anual-tarifas-neoenergia-brasil>.

NEP (2021). *2021 Global status report for buildings and construction: Towards a zero emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Recuperado em 3 de agosto de 2023, de: <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>.

Nissan (2023). *Novo Nissan Sentra*. Recuperado em 3 de agosto de 2023, de: <https://www.nissan.com.br/veiculos/modelos/novo-sentra.html>.

Organização das Nações Unidas (ONU) (2023). *What Is Climate Change?* Recuperado em 3 de julho de 2023, de: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>.

Portal Solar (2024). *Painel Solar: preços e custos de instalação*. Recuperado em: 2 de abril de 2024, de: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>.

Receita Federal (2024). *Taxa de Juros SELIC*. Recuperado em 15 de abril de 2024, de: https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/pagamentos-e-parcelamentos/taxa-de-juros-selic#Taxa_de_Juros_Selic.

Senado Federal (2023). *Contrato nº 81, de 2023*. Recuperado em 14 de setembro de 2023, de: <https://www6g.senado.gov.br/transparencia/licitacoes-e-contratos/contratos/6773>.

Senado Federal. (2024a). *Pagamentos – Contrato 134/2016*. Recuperado em 26 de fevereiro de 2024, de: <https://www12.senado.leg.br/transparencia/licitacoes-e-contratos/contratos/ct-134-2016/pagamentos>.

Senado Federal (2024b). *Relatório Geral das Informações do Órgão*. Planilha em Excel contendo dados de consumo de combustíveis e de energia do Senado levantadas no âmbito do A3P e transmitida aos autores por meio eletrônico.

Schmidt, M., Staudt, P., & Weinhardt, C. (2021). Decision support and strategies for the electrification of commercial fleets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102894>.

Silva, O.A.V.O.L.; Moita Neto, J.M.; Lira, M.A.T.; Morais, F.H.M., (2021). Expansion of Photovoltaic Systems in Multicampi Higher Education Institutions: Evaluation and Guidelines. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)*, v. 56, (4), 697-709. <https://doi.org/10.5327/z217694781009>.

Souza, A.C.D.B.; Vasconcelos, F.M.; Moreira, G.A.M.; Alves, J.V.R.; Tabora, J.M.; Tostes, M.E.L.; Carvalho, C.C.M.; do Nascimento, A.A. (2024) Impact of Electric Vehicles Consumption on Energy Efficient and Self-Sufficient Performance in Building: A Case Study in the Brazilian Amazon Region. *Energies*, 17(16), 4060. <https://doi.org/10.3390/en17164060>

Ternel, C.; Bouter, A.; & Melgar, J. (2021). Life cycle assessment of mid-range passenger cars powered by liquid and gaseous biofuels: Comparison with greenhouse gas emissions of electric vehicles and forecast to 2030. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97, 102897. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102897>.

Toyota (2023). *Conheça as Versões – Corolla 2023*. Recuperado em 3 de agosto de 2023, de: <https://www.toyota.com.br/modelos/corolla>.

Umdü, E. S., Yildirim, N., Güzel, P., Alakavuk, E., & Cinar Umdü, D. (2024). Life cycle assessment and life cycle costing approach for building decarbonization by design choices: A case study. *Energy Storage*, 6(3). <https://doi.org/10.1002/est2.618>.

Unruh, G. C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, 28(11), 817-830. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7).

Velandia Vargas, J. E.; Capaz, R. S.; Souza, S. P.; Cavalett, O.; & Seabra, J. E. A. (2022). *Evaluating decarbonisation pathways in road transportation via life cycle assessment*. In C. R. Soccol, G. A. G. Pereira, C. G. Dussap, & L. P. S. Vandenberghe (Eds.), *Liquid Biofuels: Bioethanol, Biofuel and Biorefinery Technologies* (pp. 333–362). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-01241-9_15.

Zhong, Y., Li, R., & Cai, W. (2024). Coordinating building electrification with regional grid decarbonization: Comparison of carbon emissions of different scheduling strategies. *Energy*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131942>.

Zhou, Y., Cao, S., Hensen, J.L.M., Lund, P.D. (2019). Energy integration and interaction between buildings and vehicles: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114, 109337. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119305453>.

Missão da Consultoria Legislativa

Prestar consultoria e assessoramento especializados ao Senado Federal e ao Congresso Nacional, com o objetivo de contribuir com o aprimoramento da atividade legislativa e parlamentar, em benefício da sociedade brasileira.



Núcleo de Estudos e
Pesquisas

Consultoria
Legislativa

SENADO
FEDERAL



ISSN 1983-0645