

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Eduardo Isaia Casara

**PEGADA DE CARBONO RELACIONADA AOS CONSUMOS
ELÉTRICOS DE RESIDÊNCIAS NO BRASIL: CENÁRIO
ATUAL E PROJEÇÕES**

Porto Alegre
Outubro de 2022

EDUARDO ISAIA CASARA

**PEGADA DE CARBONO RELACIONADA AOS CONSUMOS
ELÉTRICOS DE RESIDÊNCIAS NO BRASIL: CENÁRIO
ATUAL E PROJEÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ana Carolina Badalotti Passuello
Coorientadora: Ludimila Mallmann Schmalfluss

Porto Alegre
Outubro de 2022

EDUARDO ISAIA CASARA

**PEGADA DE CARBONO RELACIONADA AOS CONSUMOS
ELÉTRICOS DE RESIDÊNCIAS NO BRASIL: CENÁRIO
ATUAL E PROJEÇÕES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 17 de outubro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Ana Carolina Badalotti Passuello (UFRGS)
Eng. Civil, Doutora pela Universitat Rovira i Virgili (URV, Espanha)
Orientadora

MSc. Ludimila Schmalfuss, (UFRGS)
Eng. Civil, Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela UFPEL
Co-orientadora

Dra. Ruane Fernandes de Magalhães (UFRGS)
Eng. Civil, Doutora em Engenharia pela UFRGS

MSc. Roseana Bonotto Ruivo (UFRGS)
Arquiteta, Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela UFPEL

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Suzana Aita Isaia e ao meu pai Daniel Casara por todo amor e incentivo incondicional que recebi ao longo da vida para chegar até aqui, e por terem sido as pessoas que me permitiram realizar sonhos, e à minha irmã Laura Isaia Casara pelo companheirismo e conexão imensa que sempre compartilhamos ao longo da vida.

Agradeço à minha namorada Helena Krauzer por todo o nosso amor e parceria, por ser a pessoa que me dá forças todos os dias e quem me ofereceu todo o seu apoio neste final de curso, além da paciência e compreensão muitas vezes necessárias.

Agradeço aos meus padrinhos Eunice Aita Isaia Kindel e Andreas Kindel por me apresentarem o valor da educação enquanto exemplos vivos.

Agradeço à minha orientadora Ana Carolina Badalotti Passuello e à minha co-orientadora Ludimila Mallmann Schmalfluss pelos conhecimentos compartilhados, além do apoio e da disponibilidade oferecidos para que eu pudesse desenvolver este trabalho com tranquilidade e segurança.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à CentraleSupélec por terem me proporcionado sete anos de formação de alta qualidade, abrindo meus horizontes para a grandeza do mundo (ver página seguinte) e para o nosso papel como engenheiros e cidadãos na construção de um futuro melhor para as pessoas.

Agradeço aos grandes amigos que fiz ao longo desta jornada, com quem compartilhei ótimas experiências e que espero levar para o resto da vida.

Embora haja uma vasta diferença entre nós no que diz respeito aos fragmentos que conhecemos, somos todos iguais no infinito da nossa ignorância.

Karl Popper

RESUMO

Esta pesquisa busca estudar diferentes cenários de mudança da matriz elétrica brasileira nas próximas décadas e os perfis socioeconômicos de consumo elétrico das famílias brasileiras, visando projetar as pegadas de carbono por família e *per capita* devidas ao consumo elétrico residencial no país em diferentes horizontes temporais. Inicialmente, foram avaliados alguns dos principais cenários possíveis quanto à mudança da matriz elétrica brasileira nos horizontes 2030, 2040 e 2050 e calculadas as pegadas de carbono das fontes de emissão de cada cenário. Em seguida, foram calculados os fatores de emissão da energia elétrica segundo cada cenário e horizonte temporal. Por fim, se estudaram-se os perfis de consumo de eletricidade residencial por classe socioeconômica e calculadas as pegadas de carbono do consumo de eletricidade em função de cada cenário futuro, de cada horizonte temporal e de cada classe socioeconômica brasileira. Os resultados mostraram uma projeção de queda entre 43% e 68% nas pegadas de carbono das residências brasileiras entre 2015 e 2050, indicando que um cenário de expansão da matriz elétrica que exclui a construção de novas usinas abastecidas por combustíveis fósseis representaria a melhor situação do ponto de vista de redução da pegada de carbono do consumo de eletricidade nas residências brasileiras, que passaria de 165 kgCO₂eq ao ano em 2015 para 52 kgCO₂eq ao ano em 2050. Também foi observada relação direta entre renda e pegada de carbono devida ao consumo elétrico residencial familiar.

Palavras-chave: Pegada de carbono. Energia elétrica. Consumo energético. Residências. Matriz elétrica. Emissões. Gases de efeito estufa. Mudanças climáticas.

ABSTRACT

This research seeks to study different scenarios of the evolution of the Brazilian electricity matrix in the coming decades and the socioeconomic profiles of electricity consumption of Brazilian families, aiming to foresee the carbon footprints per family and *per capita* due to residential electricity consumption in the country at different time horizons. Initially, some of the main possible scenarios regarding the evolution of the Brazilian electricity matrix in the horizons 2030, 2040 and 2050 were evaluated and the carbon footprints of the emission sources of each scenario were calculated; then, the emission factors of electric energy were calculated according to each scenario and time horizon; finally, the residential electricity consumption profiles by socioeconomic class were studied and the carbon footprints of electricity consumption were calculated as a function of each future scenario, each time horizon and each Brazilian socioeconomic class. The results showed a projected drop between 43% and 68% in the carbon footprints of Brazilian households between 2015 and 2050, indicating that a scenario of expansion of the electricity matrix that excludes the construction of new plants fueled by fossil fuels would represent the best situation from the point of view of reducing the carbon footprint of electricity consumption in Brazilian households, which would go from 165 kgCO₂eq per year in 2015 to only 52 kgCO₂eq per year in 2050. A direct relationship was also observed between income and carbon footprint due to residential household electricity consumption.

Keywords: Carbon footprint. Electricity. Energy consumption. Households. Electricity matrix. Emissions. Greenhouse gases. Climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento do estudo	19
Figura 2 – Tarifa real média da energia elétrica, ano base 2021 (R\$/MWh)	21
Figura 3 – Participação de cada setor no consumo de energia elétrica no Brasil entre 1970-2021 (%)	22
Figura 4 – Consumo de energia elétrica <i>per capita</i> nos setores comercial e residencial no Brasil (kWh/hab)	23
Figura 5 – Consumo final no setor residencial no Brasil (tep)	24
Figura 6 – Mudança histórica dos consumos anuais de (1) energia total <i>per capita</i> e de (2) eletricidade <i>per capita</i> no setor residencial brasileiro	25
Figura 7 – Consumo anual médio de eletricidade por residência, por região (kWh)	27
Figura 8 – Consumo anual médio de eletricidade por residência, por classe socioeconômica (kWh)	27
Figura 9 – Mudança da capacidade instalada no Brasil entre 1974-2021	31
Figura 10 – Mudança da geração hidrelétrica anual nos cenários em estudo	44
Figura 11 – Mudança da geração solar fotovoltaica anual nos cenários em estudo	45
Figura 12 – Mudança da geração eólica anual nos cenários em estudo	46
Figura 13 – Mudança da geração anual por biomassa nos cenários em estudo	47
Figura 14 – Mudança da geração distribuída anual nos cenários em estudo	48
Figura 15 – Mudança da geração anual por gás natural nos cenários em estudo	49
Figura 16 – Mudança da geração anual por carvão mineral nos cenários em estudo	49
Figura 17 – Mudança da geração nuclear anual por nos cenários em estudo	50
Figura 18 – Pegadas de carbono das principais fontes de geração elétrica do Brasil.....	51
Figura 19 – Mudança dos fatores de emissão da rede elétrica por cenário	52
Figura 20 – Mudança da pegada de carbono residencial <i>per capita</i> por classe socioeconômica, no cenário “Estagnação”	58
Figura 21 – Mudança da pegada de carbono residencial <i>per capita</i> por classe socioeconômica, no cenário “Matriz Elétrica com expansão a partir de tecnologias não emissoras de GEE”	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estrato socioeconômico ao qual pertencem as famílias estudadas pela PPH 2019	26
Tabela 2 – Número médio de moradores (habituais + ocasionais) por residência	26
Tabela 3 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW)	30
Tabela 4 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh)	30
Tabela 5 – Cenários de mudança da matriz elétrica selecionados para este estudo	36
Tabela 6 – Cenários de mudança da matriz elétrica selecionados para este estudo	42
Tabela 7 – Matriz G de cenários de geração elétrica brasileira em 2030 (TWh)	42
Tabela 8 – Matriz G de cenários de geração elétrica brasileira em 2040 (TWh)	43
Tabela 9 – Matriz G de cenários de geração elétrica brasileira em 2050 (TWh)	43
Tabela 10 – Geração elétrica brasileira em 2015 (TWh)	43
Tabela 11 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica em 2015 (kgCO ₂ eq)	54
Tabela 12 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2030 (kgCO ₂ eq)	54
Tabela 13 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2040 (kgCO ₂ eq)	55
Tabela 14 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2050 (kgCO ₂ eq)	55
Tabela 15 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica em 2015, por habitante (kgCO ₂ eq)	56
Tabela 16 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2030, por habitante (kgCO ₂ eq)	56
Tabela 17 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2040, por habitante (kgCO ₂ eq)	57
Tabela 18 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2050, por habitante (kgCO ₂ eq)	57

LISTA DE SIGLAS

GEE – Gases de efeito estufa

CO₂ – Dióxido de carbono

EUI – Energy use intensity (intensidade de uso de energia)

GLP – Gás liquefeito de petróleo

PPH – Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo de Energia

UHE – Usina hidrelétrica

PCH – Pequena central hidrelétrica

CGH – Central geradora hidrelétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

PNE – Plano Nacional de Energia

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

PIB – Produto Interno Bruto

UC – Unidade de Conservação

TI – Terra Indígena e Quilombola

CAPEX – Capital expenditure (despesas de capital)

IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)

GD – Geração distribuída

LISTA DE SÍMBOLOS

G' – Geração anual de eletricidade por cenário i por fonte j (MW médio.ano)

G – Geração anual de eletricidade por cenário i por fonte j (TWh)

b_j – Fator de emissão por fonte j (MtCO₂eq/TWh)

a_i – Emissão por cenário i (MtCO₂eq)

g_i – Geração de eletricidade total por cenário i (TWh)

d_i – Fator de emissão da eletricidade por cenário i (kgCO₂eq/kWh)

c_k – Consumo anual padrão de uma residência do tipo k (kWh)

r_{ik} – Emissão anual de uma residência do tipo k por cenário i (kgCO₂eq)

h_k – Número médio de habitantes por residência do tipo k

h_{ik} – Emissão anual de uma pessoa de classe k por cenário i (kgCO₂eq)

kgCO₂eq – Quilograma de dióxido de carbono equivalente

tCO₂eq – Tonelada de dióxido de carbono equivalente

MtCO₂eq – Megatonelada de dióxido de carbono equivalente

EJ – Exajoule

GW – Gigawatt

TWh – Terawatt-hora

tep – Tonelada equivalente de petróleo

kW – kilowatt

kWh – kilowatt-hora

MW – Megawatt

GWh – Gigawatt-hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 DIRETRIZES	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	18
2.2 OBJETIVOS DE PESQUISA	18
2.2.1 Objetivo geral	18
2.2.2 Objetivos específicos	18
2.3 DELINEAMENTO	19
3 DEMANDA ENERGÉTICA DE UM EDIFÍCIO	20
3.1 ENERGIA ELÉTRICA	20
3.1.1 Preço	21
3.1.2 Consumo de energia elétrica setorial	21
3.2 CONSUMO RESIDENCIAL	23
3.2.1 Panorama da eletricidade no consumo residencial	23
3.2.2 Hábitos de consumo em residências	25
4 EMISSÕES DE CO2 ASSOCIADAS À ENERGIA ELÉTRICA	29
4.1 FONTES DE ENERGIA DA MATRIZ ELÉTRICA	29
4.2 PEGADA DE CARBONO DA ENERGIA ELÉTRICA	31
4.3 PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050	32
5 MÉTODO	34
5.1 FATORES DE EMISSÃO NAS PRÓXIMAS DÉCADAS	35
5.1.1 Matriz elétrica por cenário do PNE 2050	35
5.1.2 Fatores de emissão por fonte	37
5.2 CONSUMO MÉDIO RESIDENCIAL	38
5.3 CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO	39
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
6.1 MUDANÇA DA MATRIZ ELÉTRICA	41
6.1.1 Hidrelétricas	44

6.1.2 Renováveis: solar e eólicas	44
6.1.3 Biomassa	46
6.1.4 Geração distribuída	47
6.1.5 Combustíveis fósseis	48
6.1.6 Nuclear e outras fontes	50
6.2 FATORES DE EMISSÃO DA ELETRICIDADE	51
6.3 PEGADAS DE CARBONO RESIDENCIAIS	54
6.3.1 Pegada de carbono por residência	54
6.3.2 Pegada de carbono por habitante	56
6.3.3 Diferenças socioeconômicas	58
6.4 LIMITAÇÕES DOS RESULTADOS E PONTOS DE ATENÇÃO	59
6.4.1 Diferenças no cálculo de pegada de carbono	60
6.4.2 Diferenças entre fontes de dados	60
6.4.3 Evoluções tecnológicas e demográficas	60
7 CONCLUSÕES E TENDÊNCIAS FUTURAS	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são o processo através do qual o aumento médio da temperatura da atmosfera terrestre gera alterações nos padrões climáticos existentes, aumentando a energia presente na atmosfera e gerando uma tendência de potencialização de fenômenos climáticos muitas vezes catastróficos (ONU, 2022). Secas, ondas de calor, inundações, tempestades e o aumento do nível dos oceanos são algumas das principais consequências do acréscimo das temperaturas do globo. No período 2011-2020, a temperatura média da atmosfera esteve aproximadamente 1,09°C acima da média do período 1850-1900, considerado como referência de temperatura dos níveis pré-industriais. Já é possível observar um crescimento no número de catástrofes climáticas nas últimas duas décadas e associá-las ao aumento da temperatura global (IPCC, 2021).

Hoje, entende-se que o principal responsável pelo aumento destas temperaturas é a ação antrópica, especificamente devido à emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera em função das atividades humanas. Estes gases retêm a energia solar refletida pela superfície terrestre, provocando o chamado “efeito estufa” e aumentando as temperaturas da atmosfera (TAYLOR, 1991). O principal responsável pelo efeito estufa antropogênico é o dióxido de carbono (CO₂), devido ao volume muito importante de emissões do gás ao redor do mundo, sendo oriundo principalmente da queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2021). Apesar de as emissões de CO₂ terem apresentado pico na última década, é considerada fundamental a redução de suas emissões na direção de se atingir um patamar de emissões líquidas nulas globalmente em 2050. A comunidade científica entende que isto poderia limitar o aquecimento da atmosfera em até 1,5°C ou, no máximo, 2°C, evitando modificações do clima que poderiam ser catastróficas em termos socioeconômicos e socioambientais (IPCC, 2021). Esta limitação no aumento da temperatura da atmosfera constitui o objetivo do Acordo de Paris (ONU, 2015).

Aliado a isso, o consumo energético em edificações residenciais e comerciais é um importante responsável pelas emissões globais de CO₂. No Brasil, isto é especialmente devido ao aquecimento de água, refrigeração de alimentos e à climatização de ambientes habitáveis (LAMBERTS, 2014). A nível global, o uso final de energia em edificações aumentou de 118 EJ em 2010 para quase 130 EJ em 2019 em uma taxa anual de aproximadamente 1% ao ano, enquanto as áreas habitáveis cresceram em uma taxa de aproximadamente 2% ao ano (IEA,

2021a). Isso indica que o aumento bruto no consumo de energia veio associado a uma melhor gestão dos recursos energéticos em edificações.

No Brasil, a maior parte da energia consumida em edificações provém da matriz elétrica. Isto se deve principalmente ao clima majoritariamente tropical do país e à consequente baixa necessidade de aquecimento de ambientes internos. Por outro lado, o consumo de energia pelo uso de ar-condicionado para resfriamento de ambientes teve forte crescimento de demanda na última década, principalmente pelo aumento de renda da população e mudanças demográficas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018) e, possivelmente, pelo aumento de ondas de calor no país devido aos efeitos já em curso das mudanças climáticas. Globalmente, o setor residencial vem sendo estudado devido à sua importante participação e ao crescimento no consumo de energia elétrica (ABRAHÃO; SOUZA, 2021).

O Brasil é um dos países de matriz elétrica mais limpa do mundo, principalmente em função do potencial hidrelétrico instalado nos rios do país. No entanto, a participação da fonte hidrelétrica tem reduzido nos últimos anos com o aumento do consumo, que foi suprido pelo aumento das fontes renováveis, como fotovoltaica e eólica, além de fontes não renováveis, como termelétricas a gás (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a). Em 2021, o Brasil contava com uma capacidade instalada de geração de 181,6 GW, da qual 60,2% era hidráulica, 23,5% térmica, 11,4% eólica, 2,6% solar, 1,1% nuclear e 1,2% de demais fontes (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a).

Assim, é importante entender que a matriz elétrica brasileira está em constante modificação devido a fatores econômicos, políticos e climáticos ao longo dos anos. Nesse sentido, é fundamental traçar cenários futuros relativos à matriz elétrica pensando em planejamento estratégico para governos e para empresas consumidoras de energia, com fins de se projetar tanto os custos financeiros, como a pegada de carbono do consumo energético das atividades humanas nas próximas décadas.

O foco deste trabalho será, portanto, analisar cenários futuros de fontes de eletricidade e pegada de carbono da matriz elétrica brasileira em diferentes horizontes temporais, e discutir os efeitos destes cenários no consumo energético de residências de diferentes classes socioeconômicas no Brasil.

2 DIRETRIZES

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho visa responder à seguinte pergunta: como a mudança da matriz elétrica brasileira afetará a pegada de carbono relacionada ao consumo elétrico das residências no futuro?

2.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

2.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é a determinação de projeções futuras da pegada de carbono relacionada aos consumos elétricos de diferentes tipos de residência, em função de classe socioeconômica, a partir do estudo de cenários de mudança da matriz elétrica brasileira, incluindo análise por habitante.

2.2.2 Objetivos específicos

De modo mais detalhado, a pesquisa tem por objetivos:

- a. Estudar tendências históricas da geração elétrica brasileira, relacionando-as com a matriz atual do parque gerador e com as possibilidades de mudança futura de maneira qualitativa.
- b. Comparar cenários de mudança da matriz elétrica brasileira em horizontes de curto, médio e longo prazo.
- c. Avaliar o consumo médio residencial de eletricidade para cada classe socioeconômica, relacionando-o à pegada de carbono destas residências no futuro.

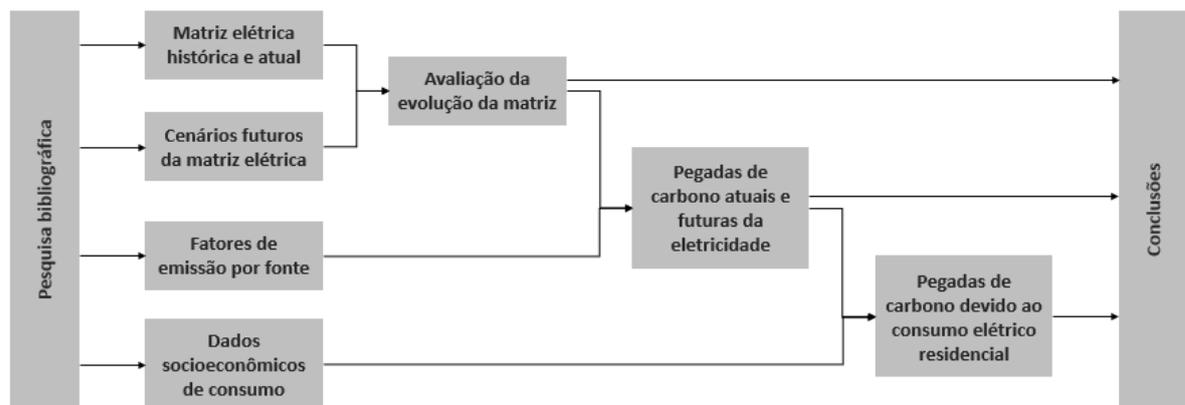
2.3 DELINEAMENTO

Para o cumprimento dos objetivos, a pesquisa se desenvolveu através dos seguintes passos:

- I. Pesquisa bibliográfica;
- II. Definição de objetivo e escopo;
- III. Levantamento de dados históricos e atuais;
- IV. Levantamento de cenários futuros;
- V. Cálculo das pegadas de carbono;
- VI. Interpretação dos resultados;
- VII. Considerações finais.

Conforme apresentado na Figura 1, a pesquisa bibliográfica permitiu a aquisição de dados de diversas fontes, apoiando as demais etapas do estudo, através da seleção de trabalhos e estudos prévios sobre a temática, em base de dados relevantes da área, buscando conhecer os conceitos básicos em relação ao tema e aos principais métodos de cálculo de pegada de carbono. Por se tratar de pesquisa baseada no cruzamento de dados, as etapas intermediárias forneceram informação relevante para um melhor entendimento do resultado principal. Em outras palavras, ao se discutirem os resultados, foram contextualizados os diversos fatores que levaram a cada resultado obtido: a mudança da matriz, as pegadas de carbono atuais e futuras das fontes e as pegadas de carbono devido ao consumo elétrico residencial.

Figura 1 – Delineamento do estudo



(fonte: elaboração do autor)

3 DEMANDA ENERGÉTICA DE UM EDIFÍCIO

O edifício é um sistema dimensionado para a presença e habitabilidade das pessoas, dentro do qual diversos subsistemas existem para garantir o desempenho final. Os principais sistemas de serviços de um edifício não-industrial, como residências e comércios, são os de locomoção, como corredores, escadas e elevadores; sistemas de proteção contra incêndio, como portas corta-fogo, extintores, mangueiras e sinalização luminosa de saída; sistemas de cozimento de alimentos, como fornos e fogões; sistemas de iluminação, como janelas e pontos de luz artificial; sistemas de climatização, como ar-condicionado, climatização central e calefação.

A maioria dos sistemas de um edifício necessita de energia para operar. Dentre os mais comuns, destacam-se elevadores, iluminação artificial, sistemas de cozimento e sistemas de ar-condicionado ou aquecimento central, cujas importâncias em termos energéticos variam em função do país. Globalmente, sabe-se que edifícios comerciais tendem a apresentar maior consumo energético do que edifícios residenciais. Para o Brasil, BELUSSI *et al.* (2019) apresentam um consumo específico médio, o chamado de “*Energy Use Intensity*” (EUI), de 79,0 kWh/m²/ano para edifícios residenciais e 285,6 kWh/m²/ano para edifícios comerciais. A tendência a valores de consumo energético específico maiores em edifícios comerciais é observada na maioria dos países, como EUA (respectivamente 135,6 kWh/m²/ano e 317,1 kWh/m²/ano) e países da União Europeia (respectivamente 177,2 kWh/m²/ano e 223,0 kWh/m²/ano), mas percebe-se que essa diferença tende a ser mais acentuada no Brasil (BELUSSI *et al.*, 2019). Isso pode ser explicado pela ausência de uma cultura de climatização nas residências brasileiras, principalmente aquelas consideradas mais humildes.

Embora entenda-se que a pegada de carbono específica (por unidade de área) em edificações comerciais seja superior àquela em edificações residenciais no Brasil, o foco deste trabalho se encontra no setor residencial devido à quantidade mais expressiva deste tipo de edificação no país.

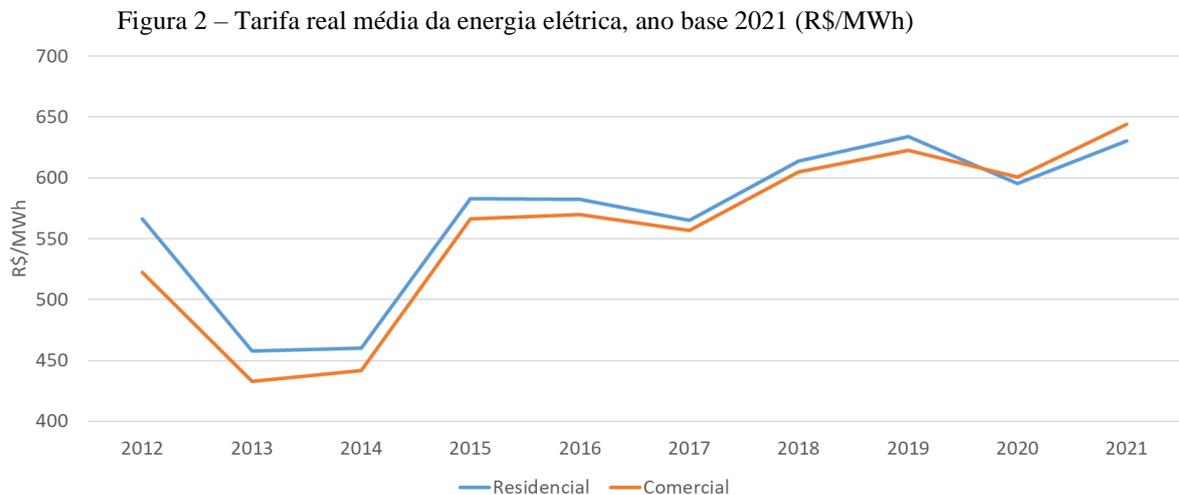
3.1 ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica representa cerca de 20% de toda energia final consumida no planeta, a frente de fontes como a queima direta de gás natural, lenha ou resíduos, e atrás apenas da queima

direta de derivados de petróleo, que representa cerca de 40% da energia consumida globalmente (IEA, 2021b).

3.1.1 Preço

É interessante observar a mudança do preço da energia elétrica no Brasil para os usos comercial e residencial ao longo dos anos, em especial pelo seu caráter bastante volátil, conforme se pode observar na Figura 2.



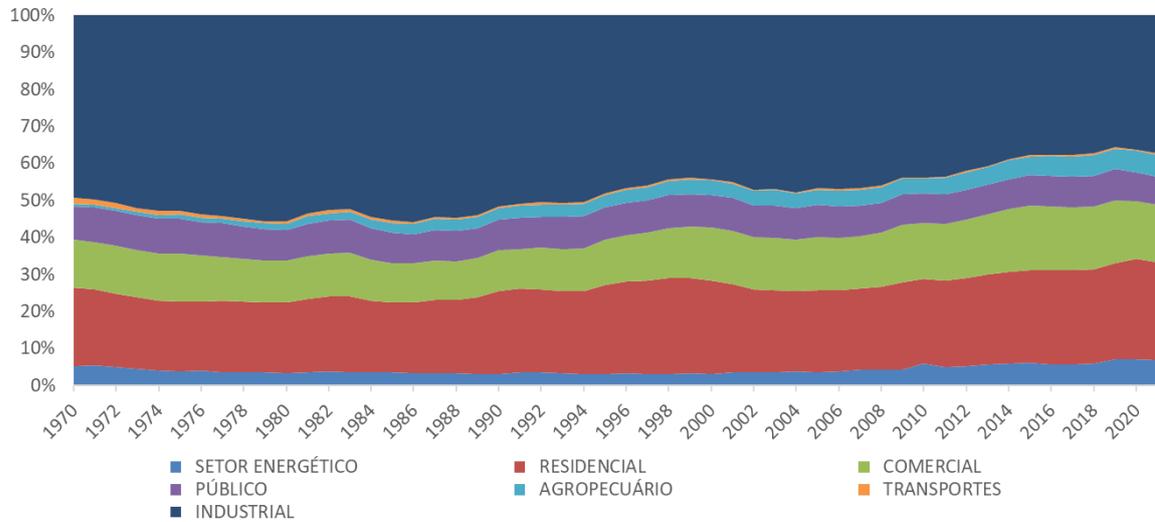
(fonte: elaboração a partir de dados de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a e IBGE, 2022)

O gráfico apresentado na Figura 2 já é corrigido pela inflação anual a partir do preço base do ano de 2021 e apresenta a mudança das tarifas reais de energia elétrica médias no Brasil. Percebe-se que as tarifas tiveram crescimento médio acima da inflação no período entre 2012-2021, o que pode ser explicado pelas sucessivas crises hídricas e pelo aumento da participação de fontes de operação mais onerosas, como as termelétricas.

3.1.2 Consumo de energia elétrica setorial

A distribuição dos setores que mais consomem energia elétrica no Brasil sofreu modificações importantes nas últimas cinco décadas, conforme se pode observar na Figura 3.

Figura 3 – Participação de cada setor no consumo de energia elétrica no Brasil entre 1970-2021 (%)

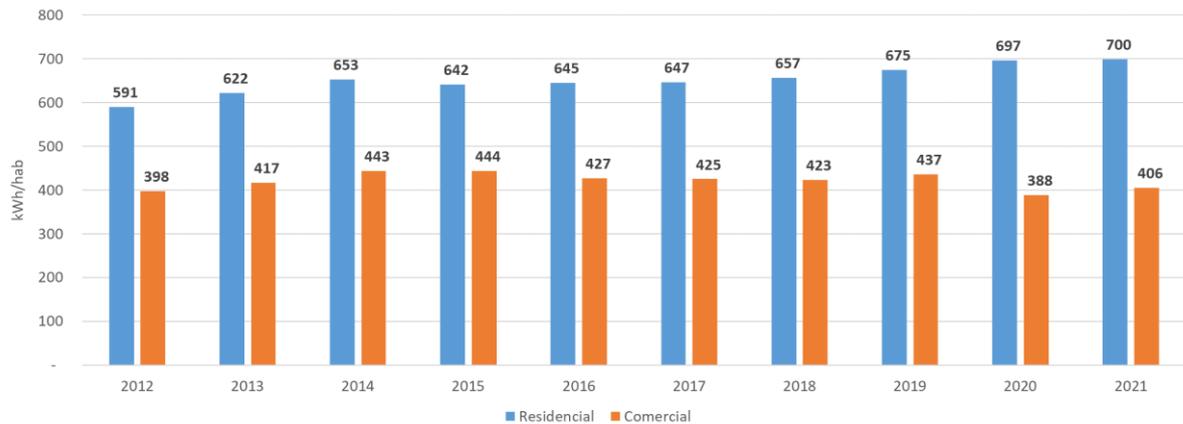


(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022b)

Como pode ser visto no gráfico da Figura 3, o setor industrial – maior consumidor de energia elétrica do país – reduziu sua participação no consumo de 49,2% em 1970 para 37,4% em 2021, com pico de 55,8% em 1986. Com isso, os setores residencial e comercial tomaram importância como grandes consumidores de energia elétrica. O setor residencial brasileiro aumentou sua participação no consumo de energia elétrica de 21,1% em 1970 para 26,4% em 2021, enquanto o setor comercial passou de 13,0% em 1970 para 15,7% em 2021 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022b). Sendo assim, o consumo total de energia elétrica no Brasil alcançou 570,9 TWh em 2021, dos quais 150,5 TWh (26,4%) em edificações residenciais e 89,6 TWh (15,7%) em edificações comerciais (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022b). Espera-se um crescimento deste valor nos próximos anos, com a tendência de eletrificação das atividades humanas, tanto industriais quanto residenciais e comerciais.

Como mostra o gráfico da Figura 4, se observa uma tendência de aumento do consumo *per capita* de energia elétrica no setor residencial brasileiro entre 2012-2021, enquanto, no setor comercial, este consumo oscilou sem apresentar tendência clara de crescimento. Especificamente no setor comercial, houve uma queda no consumo *per capita* no ano de 2020, explicada pelo início da pandemia de Covid-19, período em que muitos comércios suspenderam, reduziram ou transferiram suas atividades para a modalidade remota, passando parte do consumo para o setor residencial.

Figura 4 – Consumo anual de energia elétrica *per capita* nos setores comercial e residencial no Brasil (kWh/hab)



(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a)

3.2 CONSUMO RESIDENCIAL

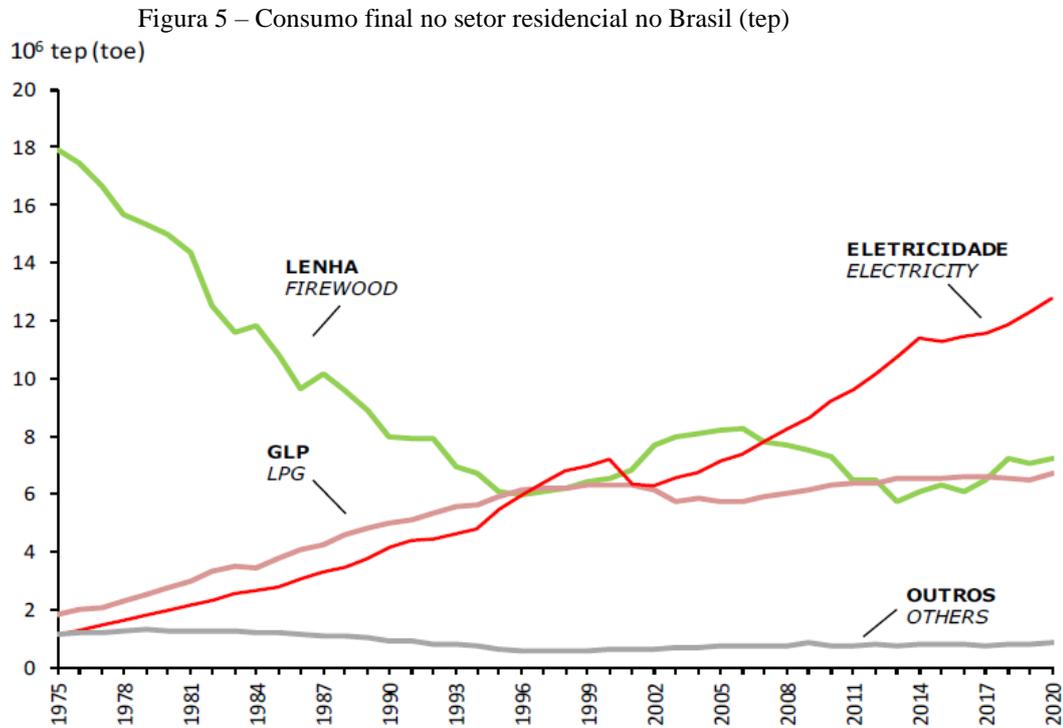
Nesta seção, são apresentados mais detalhes sobre o perfil de consumo da energia elétrica nas residências brasileiras, inclusive comparando a fonte elétrica com outras fontes como lenha e gás liquefeito de petróleo (GLP).

3.2.1 Panorama da eletricidade no consumo residencial

No ano de 2020, um terço da energia consumida em edifícios no mundo foi oriunda de eletricidade (IEA, 2021a). A alta proporção de fontes não-elétricas se dá pelo uso de carvão vegetal, gás e outras fontes, ainda muito elevado em países de clima frio. O Brasil, contudo, apresenta um cenário muito diferente. Aqui, a eletricidade representou 46,6% da energia total consumida no setor residencial e 91,3% no setor comercial em 2021 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022b). Isso se justifica pelo clima quente e, portanto, a baixa necessidade de sistemas de aquecimento nos edifícios, que em países frios tendem a envolver fontes não-elétricas de energia como lenha e gás natural.

Essa configuração, porém, não vem de longa data. Ao longo do último quarto do século XX, houve grande redução no consumo de lenha como fonte primária de energia em residências no país, cedendo espaço ao GLP (conhecido como “gás de cozinha”) e, principalmente, à eletricidade, de modo que os três dividiam praticamente a mesma importância na energia primária consumida nas residências brasileiras no ano 2000, conforme mostra a Figura 5. A mesma figura evidencia que, no avançar do século XXI, a eletricidade seguiu sua tendência

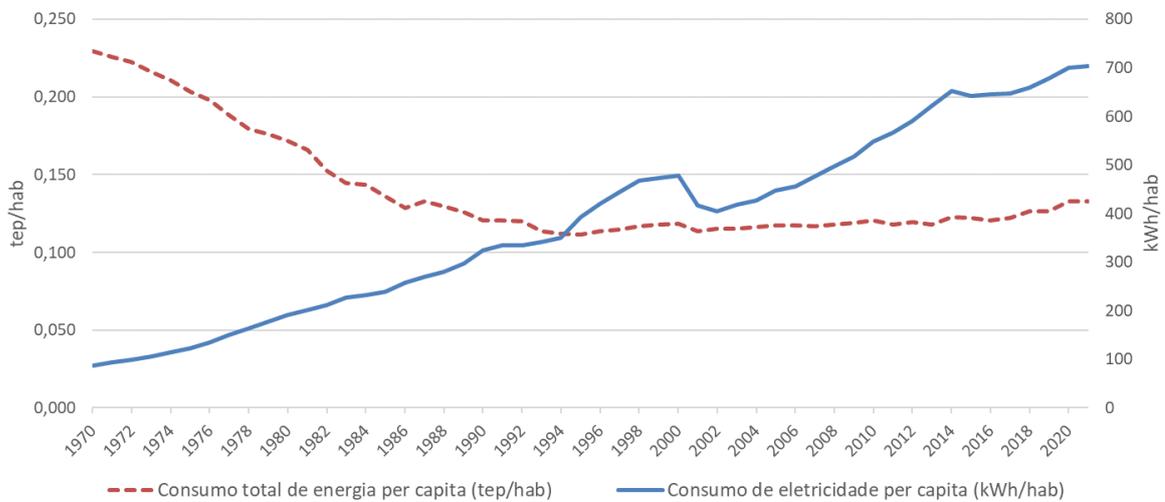
natural de aumento de consumo e despontou como principal fonte de energia para o setor. De todo modo, as três fontes ainda compartilham participação alta no consumo energético residencial e nenhuma delas pode ser desprezada em uma análise setorial.



(fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021)

Analisando-se séries históricas longas no setor residencial, um fenômeno notável que se pode observar é a baixa correlação entre os consumos *per capita* de energia total e de eletricidade. Entre 1970 e 2021, o consumo total de energia *per capita* nas residências reduziu em 42%. Neste mesmo período, o consumo de eletricidade *per capita* nas residências cresceu impressionantes 708% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022b). O gráfico da Figura 6, abaixo, apresenta curva semelhante no que diz respeito ao consumo residencial de energia elétrica, porém *per capita*. Um ponto interessante é observar o consumo total de energia *per capita* (linha vermelha tracejada) e como este se relaciona com o consumo de eletricidade *per capita* e com os consumos absolutos apresentados no gráfico da Figura 5.

Figura 6 – Mudança histórica dos consumos anuais de (1) energia total *per capita* e de (2) eletricidade *per capita* no setor residencial brasileiro



(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022b)

Por mais contraintuitivo que possa parecer, a redução no consumo de energia bruta *per capita* ocorre principalmente graças aos ganhos em eficiência energética ocorridos com a substituição da lenha por eletricidade e GLP como fontes primárias nas residências brasileiras. Nesse período, a eletrificação dos sistemas fez o consumo de eletricidade disparar e alcançar valor 8 vezes maior que cinco décadas antes, sem que isso representasse um aumento proporcional na energia bruta consumida.

É importante ressaltar que houve recentemente um grande crescimento no número de residências que contam com sistemas de ar-condicionado, alto consumidor de eletricidade. Entre 2005 e 2017, o consumo de energia elétrica para climatização residencial mais que triplicou, atingindo 18,7 TWh em 2017. Apesar disso, estima-se ter havido ganho de 8% na eficiência energética destes equipamentos no mesmo período. Estima-se que, em 2035, este consumo atinja 48,5 TWh, representando crescimento de 5,4% ao ano (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018).

3.2.2 Hábitos de consumo em residências

O consumo de energia elétrica por residência observa dinâmicas bastante diferentes dentro do Brasil, em função de grande variabilidade de aspectos geográficos, culturais, socioeconômicos, ambientais e políticos, razão pela qual não se pode abordar o consumo médio residencial simplesmente como uma média única nacional (ABRAHÃO; SOUZA, 2021).

Dessa forma, a Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH) é uma pesquisa declaratória realizada com o intuito de entender o perfil de consumo de energia elétrica das famílias brasileiras, com foco especial no estudo específico do consumo de equipamentos elétricos no setor residencial (ELETROBRAS, 2019). Na PPH 2019, foram entrevistadas 18.775 famílias brasileiras e analisadas 2.663 contas de energia distribuídas por todas as regiões do país e abrangendo consumidores de todas as classes socioeconômicas, entre julho de 2018 e abril de 2019. A Tabela 1, abaixo, apresenta a estratificação da amostra pesquisada em função de classe socioeconômica e região do país.

Tabela 1 – Estrato socioeconômico ao qual pertencem as famílias estudadas pela PPH 2019 (amostragem proporcional)

Especificação	REGIÃO										BRASIL	
	Norte		Nordeste		Centro-Oeste		Sudeste		Sul		Abs	%
	Abs	%	Abs	%	Abs	%	Abs	%	Abs	%		
Classe A	89	2,04	71	1,16	99	3,96	145	3,69	62	3,31	466	2,48
Classe B1	131	2,99	133	2,18	151	6,04	271	6,90	118	6,29	804	4,28
Classe B2	481	10,99	622	10,20	498	19,92	894	22,78	402	21,44	2.897	15,43
Classe C1	611	13,97	927	15,20	550	22,00	1.055	26,88	550	29,33	3.693	19,67
Classe C2	1.225	28,00	1.471	24,11	651	26,04	941	23,97	456	24,32	4.744	25,27
Classe D/E	1.838	42,01	2.876	47,15	551	22,04	619	15,78	287	15,31	6.171	32,87
Total	4.375	100,00	6.100	100,00	2.500	100,00	3.925	100,00	1.875	100,00	18.775	100,00

(fonte: ELETROBRAS, 2019)

Das 18.775 famílias entrevistadas, 95,86% viviam em casas, 4,05% em apartamentos e 0,09% em outros tipos de residência, como quartos e cômodos (em locais de habitação múltipla). A PPH 2019 também pesquisou os moradores habituais e ocasionais das residências brasileiras em função de região do país e classe socioeconômica. Os resultados de média desta última são apresentados na Tabela 2, abaixo.

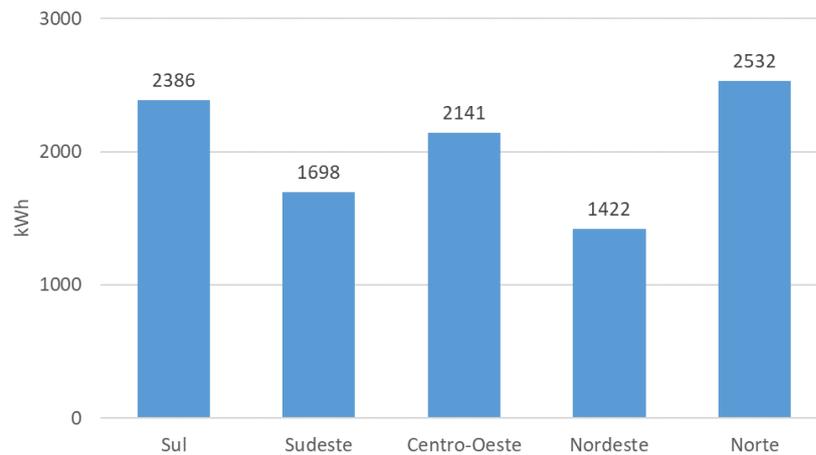
Tabela 2 – Número médio de moradores (habituais + ocasionais) por residência

Classe socioeconômica						Brasil
A	B1	B2	C1	C2	D/E	
4,28	3,93	3,68	3,50	3,47	3,30	3,49

(fonte: ELETROBRAS, 2019)

Os dados da PPH 2019 mostram que grandes diferenças de consumo ocorrem entre diferentes regiões do país e entre diferentes classes sociais (ELETROBRAS, 2019), sendo necessário o estudo dos padrões de consumo em diferentes contextos. A Figura 7 apresenta os consumos por região do Brasil.

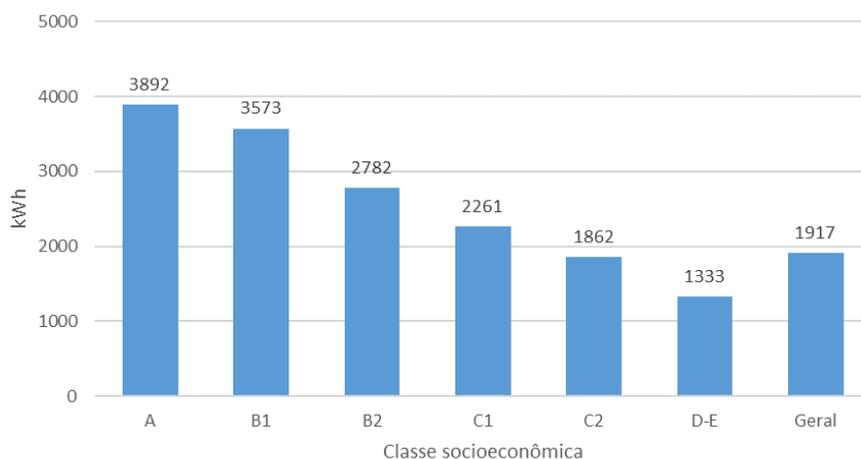
Figura 7 – Consumo anual médio de eletricidade por residência, por região (kWh/ano)



(fonte: elaboração a partir de ELETROBRAS, 2019)

Segundo a PPH 2019, o perfil médio de consumo de energia elétrica no Brasil é de 1.917 kWh por ano por residência. As regiões Sul, Norte e Centro-Oeste apresentaram valores acima da média nacional, enquanto as regiões Sudeste e Nordeste apresentaram valores mais baixos que a média. Desse modo, mostrando ainda uma relação evidente entre classe socioeconômica e consumo de eletricidade, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Consumo anual médio de eletricidade por residência, por classe socioeconômica (kWh)



(fonte: elaboração a partir de ELETROBRAS, 2019)

Quando analisadas as médias nacionais por classe, pode ser observada uma relação diretamente decrescente de consumo entre a classe A, de maior poder aquisitivo, e as classes D-E, de menor poder aquisitivo. A classe A consome 2,9 vezes a quantidade de energia elétrica por residência consumida pelas classes D-E e 2,0 vezes a quantidade consumida pela média nacional. Entretanto, a tendência em associar o consumo à classe socioeconômica pode não

necessariamente se aplicar em todos os contextos. Observa-se ainda, que a ELETROBRAS (2019) mostra um consumo residencial maior entre a classe B1 (3.686 kWh/ano) em comparação à classe A (2.947 kWh/ano) na região Sul. Hipóteses para esse fenômeno podem estar em questões de sensibilidade devido a espaço amostral pequeno no âmbito da PPH, em uma possível diferença no número de moradores por residência entre essas classes, no eventual uso de equipamentos e sistemas de isolamento residencial de maior eficiência energética, na possibilidade de maior taxa de uso de gás para aquecimento de água nas residências de classe A ou em um menor período de permanência na residência na classe A, ou seja, uma média menor de tempo que cada residente passa dentro de casa ao longo de 24 horas por dia.

4 EMISSÕES DE CO₂ ASSOCIADAS À ENERGIA ELÉTRICA

O Brasil é considerado um país de matriz elétrica limpa, o que se dá pois o país desenvolveu, desde o final do século XIX, um grande parque gerador centrado na energia hidrelétrica, aproveitando as vantagens geográficas do país para o desenvolvimento desta fonte (BOCK, 2018). No entanto, com o aumento do consumo e as limitações para a instalação de novas usinas hidrelétricas e PCH, o torna-se importante olhar para o grande potencial que o país possui no desenvolvimento de outras fontes de energia limpa, como eólica e solar, esta última sendo a fonte de energia que apresenta o maior potencial de expansão no contexto brasileiro (NASCIMENTO; ALVES, 2016).

A maior parte da energia elétrica produzida no país é integrada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil (ONS, 2022). O SIN é composto por quatro subsistemas regionais (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte) e conecta produtores e distribuidores de energia elétrica que cobrem a maior parte do território nacional brasileiro. No entanto, importante parcela da energia consumida no país é oriunda da autoprodução, modalidade em que o consumidor investe na produção de sua própria energia elétrica. Esta modalidade, que pode ser de tipo *in situ* ou remoto, só pode ser executada em caso de demanda contratada mínima de 500kW (ECOM ENERGIA, 2022).

4.1 FONTES DE ENERGIA DA MATRIZ ELÉTRICA

O cenário de geração elétrica brasileiro ainda é altamente dependente da fonte hidráulica, conforme pode ser observado nas Tabelas 3 e 4 abaixo.

Tabela 3 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW)

	2021	Δ% (2021/2020)	Part. % (2021)
Total	181 610	3,9	100,0
Usinas Hidrelétricas	103 003	0,0	56,7
PCH	5 513	1,6	3,0
CGH	834	2,2	0,5
Gás Natural	16 219	8,7	8,9
Derivados de Petróleo	7 667	-0,4	4,2
Carvão	3 203	0,0	1,8
Usinas Nucleares	1 990	0,0	1,1
Biomassa	15 578	3,8	8,6
Usinas Eólicas	20 771	21,2	11,4
Solar	4 632	40,9	2,6
Outras	2 199	-1,0	1,2

(fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a)

Tabela 4 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh/ano)

	2021	Δ% (2021/2020)	Part. % (2021)
Hidráulica	362 818	-8,5	55,3
Gás Natural	86 861	62,3	13,2
Derivados de Petróleo	18 244	113,2	2,8
Carvão	17 585	47,2	2,7
Nuclear	14 705	4,6	2,2
Biomassa	51 711	-7,0	7,9
Eólica	72 286	26,7	11,0
Solar	16 752	55,9	2,6
Outras	15 146	13,1	2,3

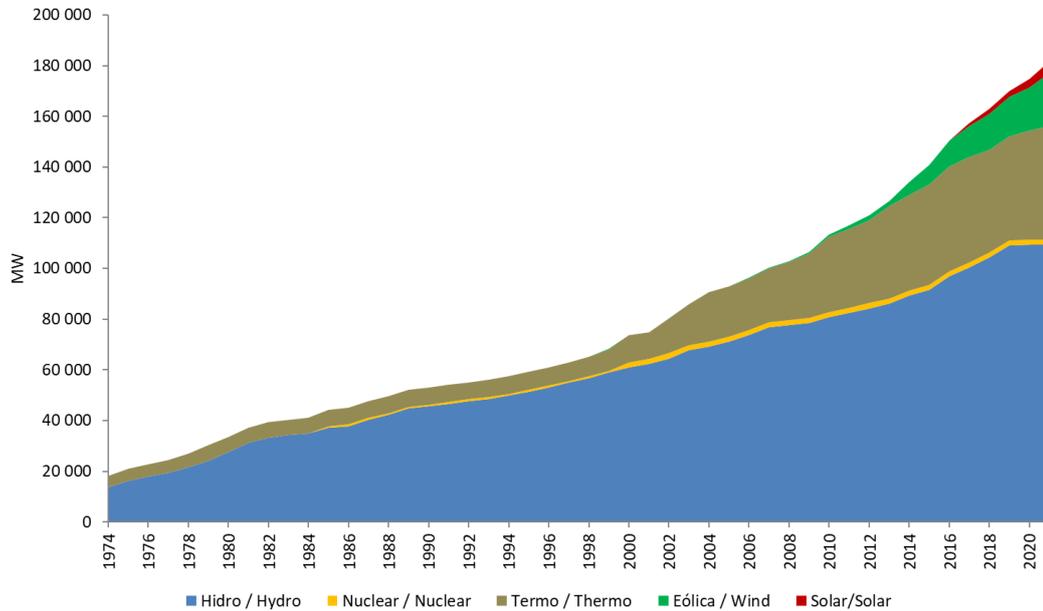
(fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a)

Em 2021, a fonte hidráulica (hidrelétricas + PCH + CGH) compunha 60,2% da capacidade instalada do país e foi responsável por 55,3% de toda energia elétrica produzida no ano. Em termos de capacidade instalada, esta é seguida pelas fontes eólica e térmica a gás natural, responsáveis respectivamente por 11,4% e 8,9% do parque gerador. No entanto, em termos de geração, o gás natural foi responsável por 13,2% do montante em 2021, contra 11,0% da energia eólica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a).

O gráfico da Figura 9 apresenta a mudança das fontes de energia elétrica no Brasil nas últimas cinco décadas, por capacidade instalada. Pode-se observar um crescimento contínuo da capacidade instalada hidráulica desde 1974, enquanto a expansão das fontes eólica e solar se deram em anos mais recentes. As fontes térmicas já possuíam importância relevante na matriz antes dos anos 2000, mas foi nesta época em que se iniciou uma maior expansão de seu uso para suprir uma demanda de eletricidade que teve seu crescimento acelerado. A energia nuclear,

por sua vez, apresenta papel pouco relevante e vem tendo sua participação reduzida em termos proporcionais desde sua instalação no país em 1985.

Figura 9 – Mudança da capacidade instalada no Brasil entre 1974-2021 (MW)



(fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022b)

É importante notar que a participação por fonte na capacidade instalada e na geração elétrica não são necessariamente proporcionais. Isso se deve pela característica tecnológica de cada fonte, que confere maior grau de operabilidade e menor grau de intermitência para fontes como as térmicas (nuclear, gás natural e carvão) a despeito de fontes dependentes de fatores climáticos como eólica, fotovoltaica e até mesmo hidráulica. Desse modo, as fontes menos intermitentes tendem a operar mais próximas da capacidade instalada quando há menor geração de fontes mais intermitentes, e vice-versa. É o exemplo das usinas térmicas a gás natural e derivados de petróleo brasileiras, que em 2021 aumentaram respectivamente em 62,3% e 113,2% a geração frente a 2020, com o intuito de suprir a grave redução de 8,5% na geração hidráulica no mesmo período, decorrente da notável falta de chuvas no Sudeste em 2021.

4.2 PEGADA DE CARBONO DA ENERGIA ELÉTRICA

O termo “pegada de carbono” tem sido utilizado com cada vez mais frequência no cotidiano, à medida em que as empresas e a população em geral adquirem consciência dos impactos que as suas atividades têm no clima. A pegada de carbono deriva do conceito mais antigo de “pegada

ecológica” e é comumente considerada como sinônimo de emissões de CO₂ expressas em equivalentes de CO₂ em massa (WIEDMANN; MINX, 2008). Apesar do alto grau de relevância que a temática de mudanças climáticas tomou na sociedade nos últimos anos, não há um consenso ou definição precisa do significado do termo. Neste trabalho, consideramos a pegada de carbono como a quantidade de gases do efeito estufa emitida na atmosfera por alguma atividade humana, que pode ser um produto ou um serviço, ou pelas ações diárias de um habitante (NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2022).

Diversos autores discutem a pegada de carbono da energia elétrica, mas é consensual o uso de abordagem baseada em Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para a sua avaliação (LEVASSEUR, 2020). A ACV, é a técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001), utilizada para contabilizar a pegada de carbono de cada uma das fontes de geração de energia elétrica consideradas na pesquisa. Os impactos considerados são avaliados do “berço ao túmulo”, incluindo as fases de construção, operação e eventual descomissionamento. Geralmente, essa pegada de carbono é contabilizada para cada kWh de energia produzido pela fonte em questão.

Uma importante base de dados utilizada para a realização de ACV é a base Ecoinvent, que contém cerca de 18.000 conjuntos de dados utilizados para a realização de inventário de ciclo de vida, cobrindo diversos setores, dentre os quais o setor de geração elétrica (ECOINVENT, 2022). A base da Ecoinvent reúne as principais fontes utilizadas no Brasil e que são o escopo central deste trabalho.

4.3 PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) é um relatório de planejamento desenvolvido pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) no qual são apresentadas recomendações e diretrizes para a administração pública em âmbito federal, visando a otimização da matriz elétrica brasileira no que diz respeito às fontes de geração (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020). É importante destacar que o plano é um conjunto de recomendações para ações em resposta a diferentes cenários econômicos, tecnológicos e regulatórios nas próximas décadas, e não uma previsão ou projeção das políticas que efetivamente serão implementadas.

O PNE 2050 apresenta 64 cenários de mudança da matriz elétrica brasileira, cada um com resultados apresentados nos horizontes 2030, 2040 e 2050 quanto à Potência Acumulada anual,

em MW, Geração Período Médio, em MW médio.ano, e Balanço de Potência, em MW. Neste estudo, será feito uso somente dos dados relativos à Geração Período Médio, indicador que representa o total de energia esperado gerado no período de um ano. Dos 64 cenários, 29 consideram novas usinas hidrelétricas (UHE) construídas apenas em áreas **sem interferência** com Unidades de Conservação (UC) ou Terras Indígenas e Quilombolas (TI), ou seja, um cenário de total restrição para o desenvolvimento de UHEs nestas regiões. Há ainda 29 cenários muito similares aos anteriores, mas que diferem por considerar a possibilidade de aproveitamento de **todo o potencial** hidrelétrico inventariado disponível. Por fim, 6 cenários consideram **restrição parcial** no potencial hidrelétrico inventariado disponível.

Nesta pesquisa, escolheu-se utilizar o PNE 2050 como fundamentação para a avaliação de cenários futuros devido, especialmente, à diversidade de cenários presentes no estudo e ao horizonte temporal destes, permitindo uma avaliação em um período longo, de 35 anos, entre 2015 e 2050.

5 MÉTODO

A pesquisa consistiu no cálculo da pegada de carbono média das residências brasileiras de acordo com diferentes cenários de mudança da matriz elétrica brasileira até 2050 para diferentes classes socioeconômicas, incluindo análise por habitante, utilizando dados de três tipos e fontes distintas:

- Matriz elétrica entre 2015 e 2050: cenários de configuração das fontes de geração elétrica no Brasil em 2030, 2040 e 2050, a partir do Plano Nacional de Energia 2050 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020);
- Fatores de emissão das fontes: quantificação das emissões de GEE por fonte de energia, segundo dados de ciclo de vida da base de dados Ecoinvent (ECOINVENT, 2022), com auxílio do *software* OpenLCA (GREENDELTA, G., 2022);
- Consumo médio residencial: perfis de consumo e média de habitantes por residência para cada classe socioeconômica, segundo dados da PPH 2019 (ELETROBRAS, 2019).

Em primeiro momento, foram reunidos os cenários base pré-calculados do PNE 2050 sobre a mudança da matriz elétrica brasileira nos anos de 2030, 2040 e 2050 e, paralelamente, foram coletadas as pegadas de carbono para cada fonte de emissão. Em seguida, foram calculados os fatores de emissão da energia elétrica segundo cada cenário e horizonte temporal. Por fim, foram estudados os perfis de consumo de eletricidade médios das residências brasileiras em função das classes socioeconômicas a partir da PPH 2019 e calculadas as pegadas de carbono do consumo de eletricidade em função de cada cenário futuro, de cada horizonte temporal e de cada classe socioeconômica brasileira.

A pesquisa se enquadra como de ordem aplicada, por se utilizar de conhecimento teórico aplicado em caso prático. É classificada como quantitativa, pois busca encontrar resultados numéricos à questão de pesquisa, ou seja, quantificar a pegada de carbono das residências segundo cenários futuros.

5.1 FATORES DE EMISSÃO NAS PRÓXIMAS DÉCADAS

A base deste trabalho se encontra nos cenários de mudança da matriz elétrica brasileira, que tende a se modificar drasticamente nas próximas décadas para acompanhar um provável aumento nos consumos de eletricidade absoluto e *per capita*.

5.1.1 Matriz elétrica por cenário do PNE 2050

Dos 64 cenários traçados pelo PNE 2050, dez foram selecionados para serem avaliados nesta pesquisa, dos quais nove pertencem ao grupo de restrição total em UCs e Tis e um ao grupo de restrição parcial. Dos dez cenários analisados, apenas o cenário “Estagnação” corresponde a uma geração anual total de 627,0 TWh em 2050, enquanto os outros nove cenários correspondem a uma geração anual total de 1.634,6 TWh cada, no mesmo ano. Comparativamente, segundo o PNE 2050, a geração elétrica no Brasil totalizou 527,0 TWh em 2015. Assim, enquanto a maioria dos cenários responde a uma expectativa de crescimento importante da economia brasileira nas próximas décadas e a consequente necessidade de aumento de 210,2% em geração até 2050, o cenário “Estagnação” corresponde a uma situação de estagnação econômica e crescimento de apenas 19,0% na geração elétrica no mesmo período. A existência do cenário “Estagnação” no PNE 2050 e seu estudo comparativamente aos demais se justifica pela uma forte correlação entre Produto Interno Bruto (PIB) e consumo de eletricidade no Brasil e no mundo (GADELHA; CERQUEIRA, 2013).

A escolha dos cenários estudados nesta pesquisa foi feita de maneira qualitativa, de modo a tentar identificar aqueles que proporcionariam uma maior representatividade e diversidade de situações e restrições, buscando inclusive contemplar cenários que, em uma avaliação prévia, tenderiam a resultar nas maiores e nas menores pegadas de carbono do consumo elétrico residencial. O resumo dos cenários avaliados é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Cenários de mudança da matriz elétrica selecionados para este estudo

CENÁRIO	NOME	CONSIDERAÇÃO PRINCIPAL
1	Estagnação	Situação de baixo crescimento econômico até 2050, em que a produção anual não ultrapassa 627 TWh.
2	Matriz Elétrica com expansão a partir de tecnologias não emissoras de GEE	Pressupõe que não haverá aumento de geração a partir de fontes diretamente emissoras (gás natural e carvão mineral) com relação ao parque atual.
3	Efeitos das Mudanças Climáticas (redução de disponibilidade hídrica)	Considera redução na energia média e crítica das UHE's devido à menor incidência de chuvas em função das mudanças climáticas.
4	Efeitos das Mudanças Climáticas (redução de disponibilidade hídrica) sem emissões	Análogo ao cenário 3, porém levando em conta a inserção de tecnologia de sequestro e armazenamento de carbono a custo de 80% do CAPEX de usinas novas de carvão e gás natural.
5	Integração Elétrica com países da América do Sul	Maior comércio de eletricidade entre países da América do Sul.
6	Eólica Offshore com 20% de redução de CAPEX	Custo de CAPEX de usinas eólicas <i>offshore</i> 20% com relação à curva de custos da IEA (2019 ²⁷).
7	Expansão de 10.000 MW de Usinas Nucleares	Política Nuclear com 10 GW de plantas de geração III+.
8	Carvão financiado com redução de 20% no CAPEX	Carvão com as mesmas condições de financiamento que as demais fontes, além de redução de 20% no CAPEX.
9	Capacidade Instalada de GD alcança 75 GW em 2050	Grande aumento na capacidade de geração distribuída (principalmente solar nas casas, comércios e indústrias), alcançando 75 GW em 2050.
10	UHEs em áreas de interferência com CAPEX dobrado	UHEs são construídas em áreas de interferência com UC e TI, mas exigem CAPEX 100% maior para implementação nestas áreas.

(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020)

Nesta pesquisa, o principal foco está nas projeções de Geração Período Médio de cada fonte conforme é apresentado no PNE 2050, visto que as emissões de GEE por fonte estão associadas a esta variável multiplicadas por um fator de emissão para cada fonte, este último coletado da base de dados da Ecoinvent. Estas projeções estão disponíveis para cada cenário e cada um dos três horizontes temporais do estudo (2030, 2040 e 2050). Os resultados de cada horizonte temporal foram calculados separadamente, de modo que, para cada um deles, os cenários foram compilados em tabela Excel na forma da matriz G' correspondente, formada por dez linhas de cenários i e nove colunas de fontes j .

A unidade de medida de energia “MW médio.ano” é representada pela potência gerada em média ao longo de um ano para cada fonte e cenário, sendo necessário convertê-la para unidades de TWh, visto seu uso mais frequente para se falar de geração elétrica em ordens de magnitude nacionais, resultando na matriz G .

$$G = G' * 24 \frac{h}{dia} * 365 \frac{dia}{ano} * 10^{-6} \frac{TW}{MW}$$

$G' \equiv G'_{ij} =$ *geração anual de eletricidade por cenário i por fonte j (MW médio. ano)*

$G \equiv G_{ij} =$ *geração anual de eletricidade por cenário i por fonte j (TWh)*

5.1.2 Fatores de emissão por fonte

Os fatores de emissão para cada fonte foram gerados a partir da base de dados Ecoinvent v3.6, uma das principais fontes de dados para realização de ACV e avaliação de impactos ambientais de produtos. Por meio da plataforma OpenLCA, os dados de cada fonte em análise foram incluídos e assim foram quantificados os impactos ambientais associados à geração de kWh para cada fonte considerada, utilizando o método de cálculo “CML (baseline) [v4.4, January, 2015]”. Neste trabalho, foi analisada somente a categoria “*Climate change - GWP100*”, relativo à contribuição da geração elétrica para a potencialização dos efeitos das mudanças climáticas, medida em kgCO₂eq. O critério de seleção dos conjuntos de dados na base foi o de alocação com corte por classificação (*Allocation, cut-off by classification*). A geografia dos conjuntos de dados utilizados é preferencialmente de abrangência nacional (BR). Os conjuntos de dados selecionados estão descritos a seguir (ECOINVENT, 2022):

- Carvão Mineral (“*electricity production, hard coal - BR-Southern grid*”);
- Eólica (“*electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore - BR-Southern grid*”);
- Hidrelétrica (“*electricity production, hydro, reservoir, tropical region - BR-Southern grid*”);
- Gás Natural (“*electricity production, natural gas, conventional power plant - BR-South-eastern grid*”);
- Nuclear (“*electricity production, nuclear, pressure water reactor - BR-South-eastern grid*”);

- Solar (*“electricity production, photovoltaic, 3kWp flat-roof installation, single-Si - GLO”*);
- Biomassa (*“treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal - BR-Southern grid”*).

É importante destacar as diferenças de abordagem tomadas pelo PNE 2050 e pela base de dados Ecoinvent no que diz respeito à pegada de carbono das fontes de energia elétrica. Por exemplo, enquanto o PNE 2050 considera como não-emissoras fontes como eólica, solar, nuclear, hídrica e biomassa (0 tCO₂eq para cada kWh gerado), a base do Ecoinvent associa uma pegada de carbono não-nula a cada uma dessas fontes, podendo chegar a ser bastante elevada, como é o caso da biomassa. Essa importante diferença conceitual se dá pois no PNE 2050 são consideradas somente as emissões ligadas diretamente à operação de geração elétrica, como a queima de combustíveis fósseis (escopo 1 de um eventual inventário de gases de efeito estufa), de modo que até mesmo a queima de biomassa é considerada uma atividade neutra, pois considera-se que há uma circularidade no ciclo do carbono envolvendo esta fonte. Em outras palavras, diferentemente da base de dados da Ecoinvent, o PNE 2050 não leva em conta o ciclo de vida “berço ao túmulo” das fontes de energia (o que englobaria os escopos 1, 2 e 3), ciclo de vida este que envolve, por exemplo, as emissões associadas à construção de usinas, extração e produção de matérias primas e atividades essenciais à implementação, operação e fim de vida da usina geradora.

Uma limitação importante que deve ser observada é que o trabalho não considera cenários de evolução tecnológica para as fontes de energia. Desse modo, não é levada em conta a possível (e provável) redução nos fatores de emissão das fontes ligados a ganhos de eficiência, redução na pegada de carbono das matérias primas de usinas e outros aspectos do ciclo de vida da energia elétrica.

5.2 CONSUMO MÉDIO RESIDENCIAL

Os dados de consumo médio residencial foram reunidos e apresentados na seção 3.2.2. Através da PPH 2019, foram estudadas seis classes socioeconômicas diferentes e, portanto, seis perfis de emissão diferentes, além do perfil médio geral do Brasil (sem diferenciação por classe). Foram utilizados estes dados na pesquisa pensando em encontrar resultados estratificados para as emissões de GEE do consumo de eletricidade das residências brasileiras, através do

cruzamento desses dados com os fatores de emissão de cada cenário considerado, para cada horizonte temporal estudado. É também apresentado o valor médio encontrado levando em conta todos os participantes do estudo, independentemente de classe socioeconômica.

A opção por dividir a análise em função de classe socioeconômica busca, ainda que de maneira limitada, reduzir o nível de erro que pode ocorrer nos resultados do estudo em função de possíveis mudanças na pirâmide socioeconômica brasileira nas próximas décadas. Isto se dá a partir da hipótese inicial de que a pegada de carbono média, para cada cenário de matriz elétrica, pode ser fortemente influenciada por um aumento na renda das famílias. Sob esta hipótese e supondo um cenário geral de avanço econômico, a pegada de carbono por cenário e por classe socioeconômica forneceria um desenho mais preciso do perfil de emissões residenciais no país. Em outras palavras, mesmo que haja mudança da pirâmide socioeconômica brasileira nas próximas décadas, a projeção de consumo, em função de cada cenário de matriz, poderá ser calculada como uma combinação linear de pegadas de carbono por classe e número projetado de residências por classe no país no horizonte analisado.

5.3 CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO

Em mãos dos dados necessários, foi possível executar os cálculos para estimar a pegada de carbono anual relacionada aos consumos elétricos por residência e por habitante para cada classe socioeconômica e cenário futuro de matriz elétrica. Consideraram-se as estimativas de geração por fonte segundo cada cenário futuro da matriz elétrica brasileira. Multiplicando a geração de cada fonte, em cada cenário, por seu respectivo fator de emissão b_j e somando as emissões por fonte para cada cenário, foi encontrada a emissão total por cenário a_i :

$$\vec{a} = G\vec{b}$$

$$\vec{b} \equiv b_j = \text{fator de emissão por fonte } j \left(\frac{\text{MtCO}_2\text{eq}}{\text{TWh}} \right)$$

$$\vec{a} \equiv a_i = \text{emissão por cenário } i \text{ (MtCO}_2\text{eq)}$$

O vetor \vec{b} representa os fatores de emissão de cada fonte e será apresentado na seção de resultados de discussão. A geração distribuída é considerada pelo PNE 2050 como um mix de fontes, do qual 85% da geração corresponde a solar, 5% hidrelétrica, 5% eólica e 5% gás natural

(MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020). As outras fontes não especificadas têm fatores de emissão considerados iguais ao do gás natural.

Para encontrar os fatores de emissão globais da geração elétrica por cenário, normalizou-se a emissão total por cenário a_i dividindo-a pela geração total g_i do cenário:

$$\vec{d} \equiv d_i = \frac{a_i}{g_i}$$

$$\vec{g} \equiv g_i = \sum_j G_{ij} = \text{geração de eletricidade total por cenário } i \text{ (TWh)}$$

$$\vec{d} \equiv d_i = \text{fator de emissão da eletricidade por cenário } i \left(\frac{\text{MtCO}_2\text{eq}}{\text{TWh}} \text{ ou } \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \right)$$

Em seguida, cruzaram-se os fatores de emissão dos 10 diferentes cenários futuros de matriz elétrica (i) com os diferentes padrões de consumo residencial estudados (k), por meio do produto tensorial:

$$R = \vec{d} \otimes \vec{c}$$

$$\vec{c} \equiv c_k = \text{consumo anual padrão de uma residência do tipo } k \text{ (kWh)}$$

$$R \equiv r_{ik} = \text{emissão anual de uma residência do tipo } k \text{ por cenário } i \text{ (kgCO}_2\text{eq)}$$

Finalmente, foram calculadas as pegadas de carbono por habitante, levando-se em conta o número de habitantes médio por residência da PPH 2019, conforme Tabela 2 da seção 3.2.2.

Denominaram-se estes valores de vetor \vec{h} e realizou-se a operação:

$$H \equiv h_{ik} = \frac{r_{ik}}{h_k}$$

$$\vec{h} \equiv h_k = \text{número médio de habitantes por residência do tipo } k$$

$$H \equiv h_{ik} = \text{emissão anual de uma pessoa de classe } k \text{ por cenário } i \text{ (kgCO}_2\text{eq)}$$

Como resultado, obteve-se uma matriz H para cada horizonte temporal analisado, contendo as projeções de pegada de carbono residenciais médias por habitante, em função da classe socioeconômica e do cenário de configuração da matriz elétrica futura no Brasil.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do estudo são apresentados nesta seção. Iniciou-se apresentando e analisando as principais tendências relativas à mudança da matriz elétrica nos horizontes 2030, 2040 e 2050. Em seguida, foram apresentadas as mudanças esperadas nos fatores de emissão da rede elétrica nacional para cada cenário estudado e buscaram-se identificar os principais motivos para estas mudanças. Então, foram apresentados e discutidos os resultados de pegada de carbono do consumo elétrico das residências brasileiras em função de cada horizonte temporal, classe socioeconômica e cenário estudado. Por fim, apresentaram-se algumas observações e as limitações da pesquisa.

6.1 MUDANÇA DA MATRIZ ELÉTRICA

O PNE 2050 utiliza como ano base para o traçado de cenários o ano de 2015. Embora, no momento da execução deste estudo já haja dados mais recentes disponíveis relativos à geração elétrica anual para cada fonte, preferiu-se manter o ano base segundo o que consta no PNE 2050 e analisar os resultados da pesquisa conforme os dados de geração disponíveis no PNE 2050. Esta opção é devida a uma incongruência observada entre os dados de geração do ano de 2015 segundo o PNE 2050 e os dados de geração do ano de 2015 segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022, da EPE. Sendo assim, e entendendo-se que as conclusões esperadas deste trabalho possuem viés fundamentalmente comparativo, optou-se por manter a coerência entre os dados, coletando-nos a partir da mesma fonte, mesmo que haja dados mais recentes obtidos por outras fontes.

Embora tenham sido utilizados apenas dez cenários distintos nos horizontes temporais deste trabalho, dentre os 64 cenários disponíveis, é possível observar algumas tendências comuns a todos ou quase todos estes cenários quando comparamos o ano base de 2015 com o ano de 2050, horizonte mais distante apresentado no PNE 2050. A Tabela 6 abaixo apresenta a numeração definida neste estudo para se referir a cada cenário, de modo que esta será utilizada na apresentação dos resultados na forma de legendas de gráficos, tabelas e na discussão.

Tabela 6 – Cenários de mudança da matriz elétrica selecionados para este estudo

CENÁRIO	NOME
1	Estagnação
2	Matriz Elétrica com expansão a partir de tecnologias não emissoras de GEE
3	Efeitos das Mudanças Climáticas (redução de disponibilidade hídrica)
4	Efeitos das Mudanças Climáticas (redução de disponibilidade hídrica) sem emissões
5	Integração Elétrica com países da América do Sul
6	Eólica Offshore com 20% de redução de CAPEX
7	Expansão de 10.000 MW de Usinas Nucleares
8	Carvão financiado com redução de 20% no CAPEX
9	Capacidade Instalada de GD alcança 75 GW em 2050
10	UHEs em áreas de interferência com CAPEX dobrado

(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020)

Os dados de geração convertidos de MW médio.ano para TWh por ano, a partir do PNE 2050 (matrizes *G*), são apresentados na última coluna das tabelas 7, 8 e 9, enquanto a proporção da participação de cada fonte, para cada cenário, é apresentada nas demais colunas.

Tabela 7 – Matriz G de cenários de geração elétrica brasileira em 2030 (TWh)

Cenário	Hidrelétrica	Eólica	Solar	Biomassa	Gás natural	Carvão mineral	Nuclear	Outras	Geração distribuída	Total
1	72,7%	10,1%	0,8%	6,5%	3,2%	0,3%	4,1%	0,6%	1,6%	616,9
2	60,6%	22,9%	1,6%	5,1%	3,5%	0,5%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9
3	57,7%	25,2%	1,6%	4,2%	4,6%	0,8%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9
4	56,8%	23,0%	3,0%	8,3%	2,6%	0,5%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9
5	62,3%	19,2%	0,5%	7,5%	4,1%	0,5%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9
6	61,6%	21,5%	1,6%	4,2%	4,6%	0,6%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9
7	61,4%	21,9%	1,6%	4,2%	4,5%	0,6%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9
8	61,6%	20,6%	1,6%	4,2%	4,4%	1,8%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9
9	61,3%	20,9%	1,3%	4,2%	4,5%	0,6%	2,7%	0,4%	4,1%	958,9
10	61,4%	21,9%	1,6%	4,2%	4,5%	0,6%	2,7%	0,4%	2,8%	958,9

(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020)

Tabela 8 – Matriz G de cenários de geração elétrica brasileira em 2040 (TWh)

<i>Cenário</i>	<i>Hidrelétrica</i>	<i>Eólica</i>	<i>Solar</i>	<i>Biomassa</i>	<i>Gás natural</i>	<i>Carvão mineral</i>	<i>Nuclear</i>	<i>Outras</i>	<i>Geração distribuída</i>	Total
1	79,5%	3,8%	0,0%	6,1%	2,5%	0,3%	4,1%	0,6%	3,0%	619,4
2	43,7%	36,4%	7,8%	3,6%	2,0%	0,2%	2,0%	0,0%	4,3%	1291,1
3	41,6%	36,1%	8,0%	2,9%	4,6%	0,2%	2,0%	0,3%	4,3%	1291,1
4	39,5%	37,5%	8,8%	5,3%	2,1%	0,2%	2,0%	0,3%	4,3%	1291,1
5	48,9%	33,9%	0,9%	5,8%	3,6%	0,2%	2,0%	0,3%	4,3%	1291,1
6	46,0%	33,0%	6,7%	2,9%	4,5%	0,2%	2,0%	0,3%	4,3%	1291,1
7	46,3%	32,1%	4,0%	2,9%	4,6%	0,2%	5,4%	0,3%	4,3%	1291,1
8	46,3%	32,4%	6,1%	2,9%	4,5%	1,1%	2,0%	0,3%	4,3%	1291,1
9	46,0%	34,5%	3,1%	2,9%	4,6%	0,2%	2,0%	0,3%	6,5%	1291,1
10	46,8%	32,4%	6,2%	2,9%	4,8%	0,2%	2,0%	0,3%	4,3%	1291,1

(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020)

Tabela 9 – Matriz G de cenários de geração elétrica brasileira em 2050 (TWh)

<i>Cenário</i>	<i>Hidrelétrica</i>	<i>Eólica</i>	<i>Solar</i>	<i>Biomassa</i>	<i>Gás natural</i>	<i>Carvão mineral</i>	<i>Nuclear</i>	<i>Outras</i>	<i>Geração distribuída</i>	Total
1	78,7%	4,3%	0,0%	5,7%	1,5%	0,0%	4,1%	0,6%	5,1%	627,0
2	31,8%	44,9%	12,7%	2,5%	0,4%	0,0%	1,6%	0,0%	6,1%	1634,6
3	32,8%	38,3%	12,8%	2,2%	5,9%	0,0%	1,6%	0,2%	6,1%	1634,6
4	28,0%	46,1%	13,4%	3,8%	0,7%	0,0%	1,6%	0,2%	6,1%	1634,6
5	40,8%	37,1%	5,1%	4,5%	4,4%	0,0%	1,6%	0,2%	6,1%	1634,6
6	35,9%	36,8%	11,8%	2,2%	5,3%	0,0%	1,6%	0,2%	6,1%	1634,6
7	35,9%	34,4%	9,6%	2,2%	5,2%	0,0%	6,4%	0,2%	6,1%	1634,6
8	35,9%	36,4%	11,3%	2,2%	5,2%	1,0%	1,6%	0,2%	6,1%	1634,6
9	36,0%	40,9%	4,1%	2,1%	5,9%	0,0%	1,6%	0,2%	9,2%	1634,6
10	36,5%	36,4%	11,4%	2,2%	5,6%	0,0%	1,6%	0,2%	6,1%	1634,6

(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020)

Também foram reunidos os dados de geração no ano de 2015, que são apresentados juntamente com os dados futuros do PNE 2050, pensando-se em uma avaliação comparativa dos resultados do PNE 2050 no intervalo 2015-2050. O mesmo método de conversão de MW médio.ano para TWh foi utilizado, e os dados de 2015 são apresentados na Tabela 10, abaixo.

Tabela 10 – Geração elétrica brasileira em 2015 (TWh)

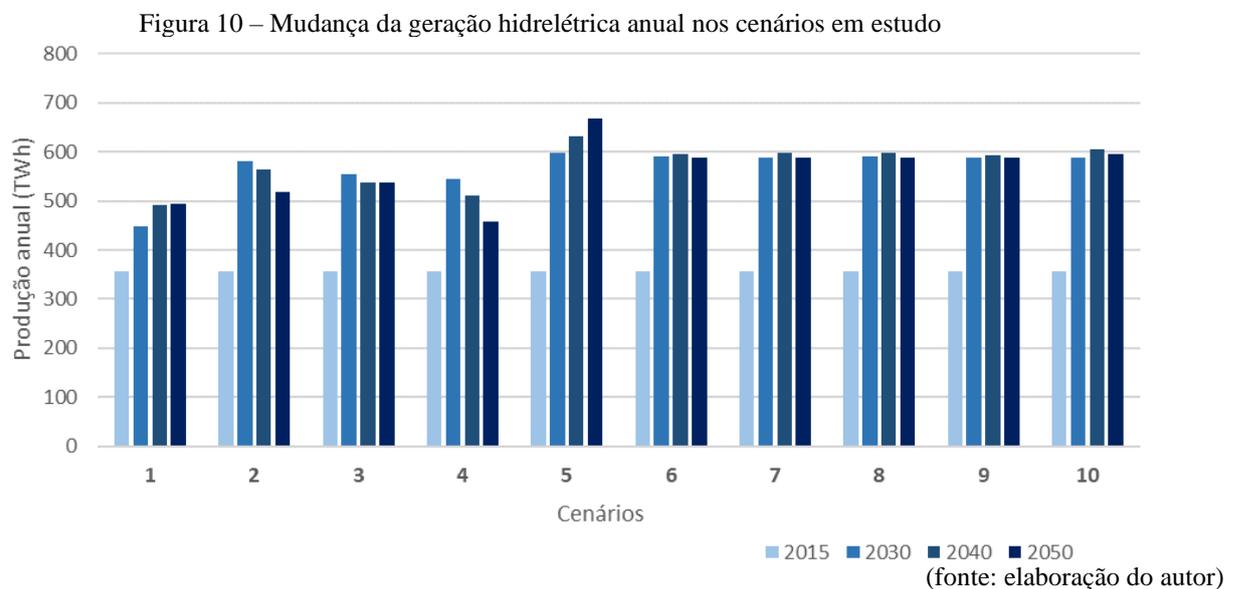
<i>Hidrelétrica</i>	<i>Eólica</i>	<i>Solar</i>	<i>Biomassa</i>	<i>Gás natural</i>	<i>Carvão mineral</i>	<i>Nuclear</i>	<i>Outras</i>	<i>Geração distribuída</i>	Total
67,7%	4,1%	0,0%	4,4%	12,9%	4,4%	2,8%	3,6%	0,0%	527,0

(fonte: elaboração a partir de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020)

Nas seções a seguir, os resultados apresentados acima são discutidos de maneira mais aprofundada para cada fonte.

6.1.1 Hidrelétricas

A primeira tendência observada é a limitação da evolução da geração hidrelétrica ao longo dos anos, que tende a não ultrapassar o limiar de 600TWh, contra 356,6TWh no ano base 2015, conforme gráfico da Figura 10, abaixo. Isso é explicado pela geografia e configuração hidrológica natural do Brasil, que impõe limites naturais à quantidade e potência instalada de novas usinas hidrelétricas, sejam elas usinas de grande porte ou PCHs.

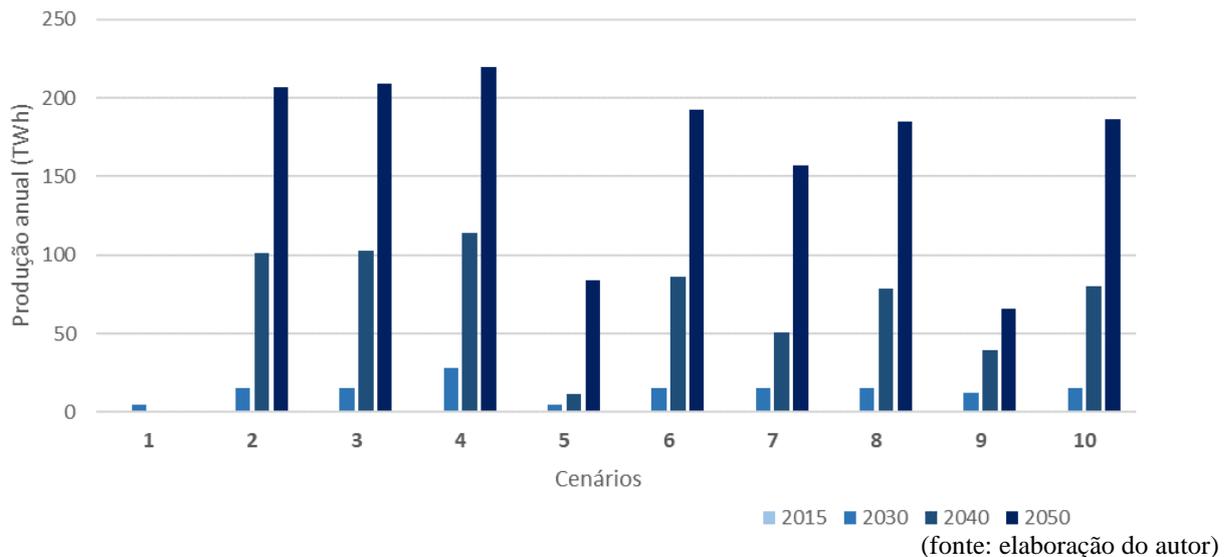


É interessante observar a limitação na geração hidrelétrica nos cenários 3 e 4, que, segundo o PNE 2050, refletiriam a redução da disponibilidade hídrica em função das mudanças climáticas. Inversamente, o cenário 5, referente à “Integração Elétrica com países da América do Sul” considera um maior fluxo de comércio exterior de eletricidade com os países vizinhos do Brasil, possivelmente aumentando a importação de eletricidade de fontes hídricas destes países.

6.1.2 Renováveis: solar e eólicas

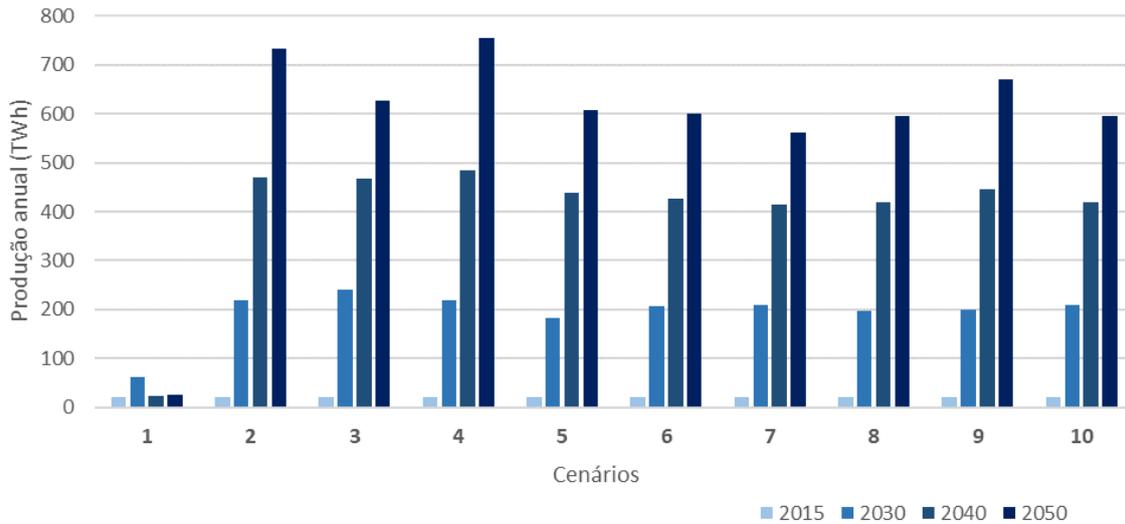
As fontes solar fotovoltaica e eólica (Figuras 11 e 12), consideradas os principais representantes da crescente categoria de fontes renováveis, apresentam perspectivas de crescimento elevado em todos os cenários analisados, com exceção do cenário “Estagnação” (cenário 1).

Figura 11 – Mudança da geração solar fotovoltaica anual nos cenários em estudo



A geração solar fotovoltaica apresentou boas perspectivas de crescimento em todos os cenários, exceto no cenário “Estagnação” (Figura 11), em conformidade com a tendência global de aumento exponencial da geração a partir desta fonte (IEA, 2022). O cenário 5 – “Integração Elétrica com países da América do Sul” apresentou crescimento abaixo da média, principalmente em função da maior participação de fontes hídricas neste cenário. Já o crescimento abaixo da média observado no cenário 9 – “Capacidade Instalada de GD alcança 75 GW em 2050” se dá pois, neste cenário, a geração fotovoltaica adquiriria um caráter mais descentralizado, enquadrando-se na categoria Geração Distribuída, em oposição à construção de grandes usinas de geração solar concentradas. É interessante perceber que a geração solar fotovoltaica no Brasil passou de 0,044 TWh em 2015 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020) para 16,8 TWh em 2021 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a), superando muitos dos próprios cenários do PNE 2050, que projetavam que este patamar seria atingido por volta do ano de 2030.

Figura 12 – Mudança da geração eólica anual nos cenários em estudo



(fonte: elaboração do autor)

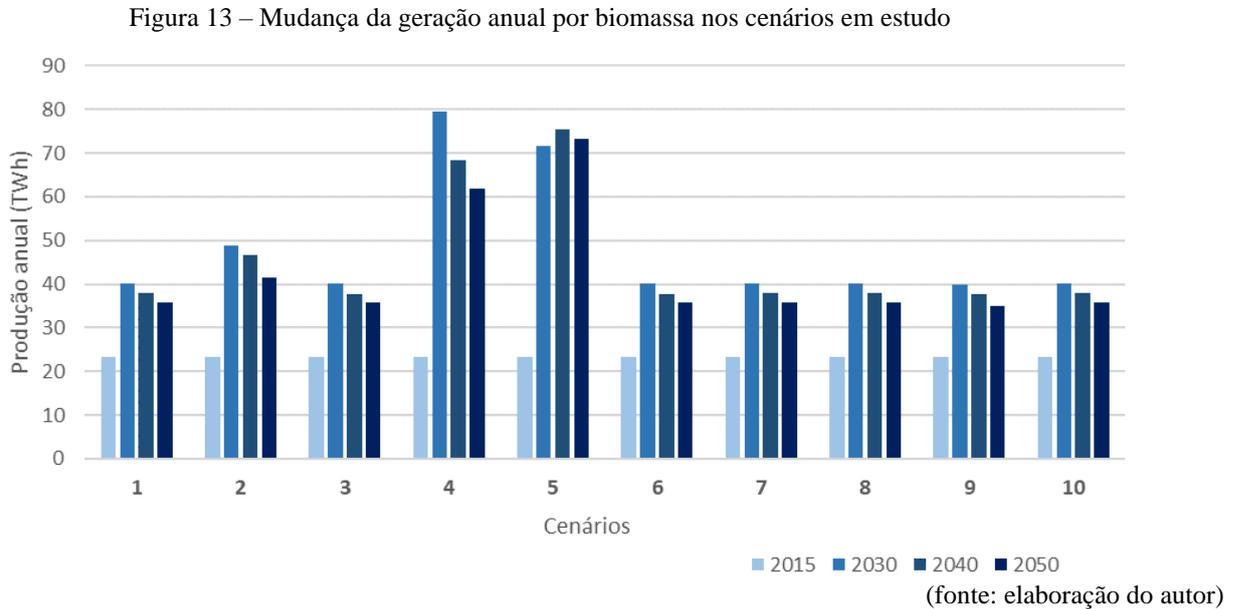
A geração eólica, conforme mostra o gráfico da Figura 12, apresentou boa previsibilidade de crescimento nos cenários analisados, mantendo um padrão de crescimento semelhante nos cenários 2-9 e um crescimento aproximadamente nulo no cenário “Estagnação”, no longo prazo.

A geração eólica, que atingiu 21,6 TWh no ano de 2015, cresceu para aproximadamente 600-700 TWh no ano de 2050, a depender do cenário, enquanto a geração solar passa de valor desprezível em 2015 para aproximadamente 200 TWh em 2050. Ambos os casos apresentam exceção para o cenário “Estagnação”, no qual a geração destas fontes se mantém em níveis semelhantes aos atuais. É interessante observar que a geração eólica projetada para o ano de 2050 se iguala ou ultrapassa a geração hidrelétrica no mesmo ano, em alguns cenários. Ainda, é importante destacar que é fundamental a manutenção de políticas de incentivo ao desenvolvimento destas fontes no país nas próximas décadas, especialmente na forma de incentivos fiscais, pensando-se em acelerar o investimento nessas usinas e reduzir ainda mais a pegada de carbono da energia elétrica no Brasil em um horizonte de longo prazo.

6.1.3 Biomassa

Um ponto que chamou a atenção nos cenários futuros do PNE 2050 foi o baixo crescimento do uso da biomassa para geração elétrica. Embora autores como RIPOLLI (1999) defendam a biomassa como importante fonte de energia elétrica a ser aproveitada, principalmente através da queima do bagaço e palha da cana de açúcar, esta tendência não se traduz em cenário de crescimento de grandes proporções no uso da fonte para geração de eletricidade, se comparado

a outras fontes renováveis, como eólica e solar. Os cenários de mudança do uso da biomassa para geração elétrica são mostrados na Figura 13.



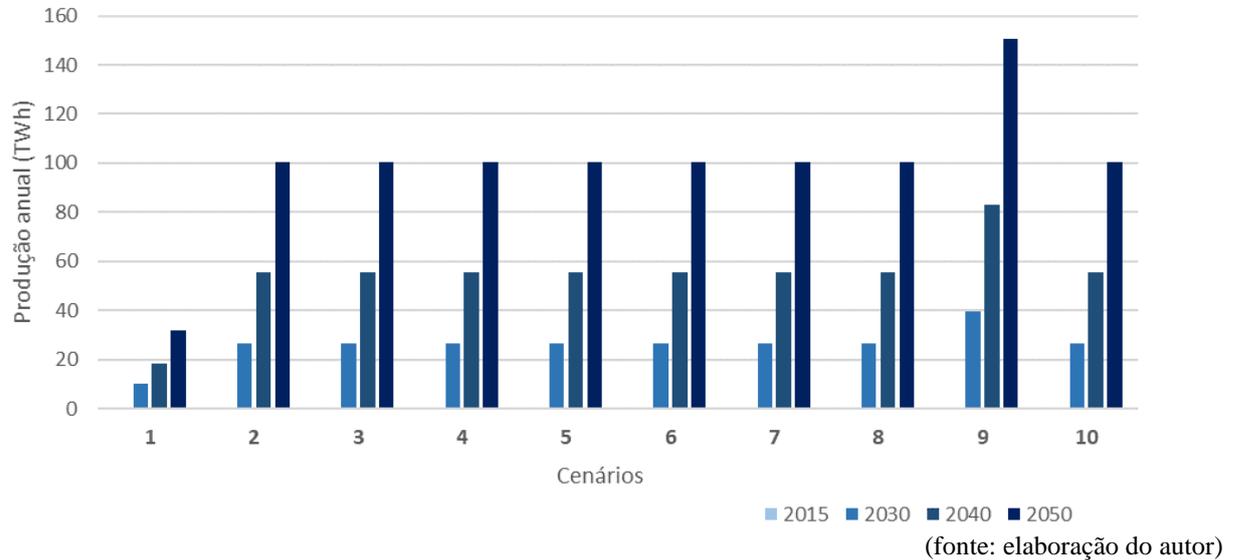
Segundo o PNE 2050, a geração anual por biomassa no Brasil passaria de 23,4 TWh em 2015 para aproximadamente 35 TWh em 2050, na maioria dos cenários estudados. As exceções são os cenários 4 e 5. No cenário 4, o crescimento da matriz brasileira se dá apenas pelo crescimento de fontes “não emissoras”, de modo que o PNE 2050 considera a biomassa parte desde grupo (o que difere da premissa de ciclo de vida abordada nesta pesquisa) e dá a ela um peso maior na matriz elétrica futura. Já para o cenário 5, relativo à integração elétrica com países vizinhos, não se encontrou uma hipótese de o porquê deste cenário apresentar participação tão alta de fontes de biomassa, sendo a maior importação de outros países como um possível fator explicativo.

6.1.4 Geração Distribuída

Uma modelo de geração de eletricidade que promete crescer exponencialmente nas próximas décadas e contribuir substancialmente para a matriz elétrica brasileira é a geração distribuída (GD), conforme se observa na Figura 14. Esta corresponde a uma combinação de fontes, principalmente da fonte solar (aproximadamente 85%) e das fontes eólica, hídrica e térmica a gás (aproximadamente 5% cada). Uma das grandes vantagens da GD é o seu uso descentralizado, o que garante uma maior flexibilidade de rede e redução de custos. Como as usinas geradoras neste modelo são geralmente instaladas próximas ao utilizador final, são exigidos menos

investimentos adicionais em transmissão e distribuição, principalmente quando os pontos de geração se encontram em locais mais isolados e menos densificados.

Figura 14 – Mudança da geração distribuída anual nos cenários em estudo

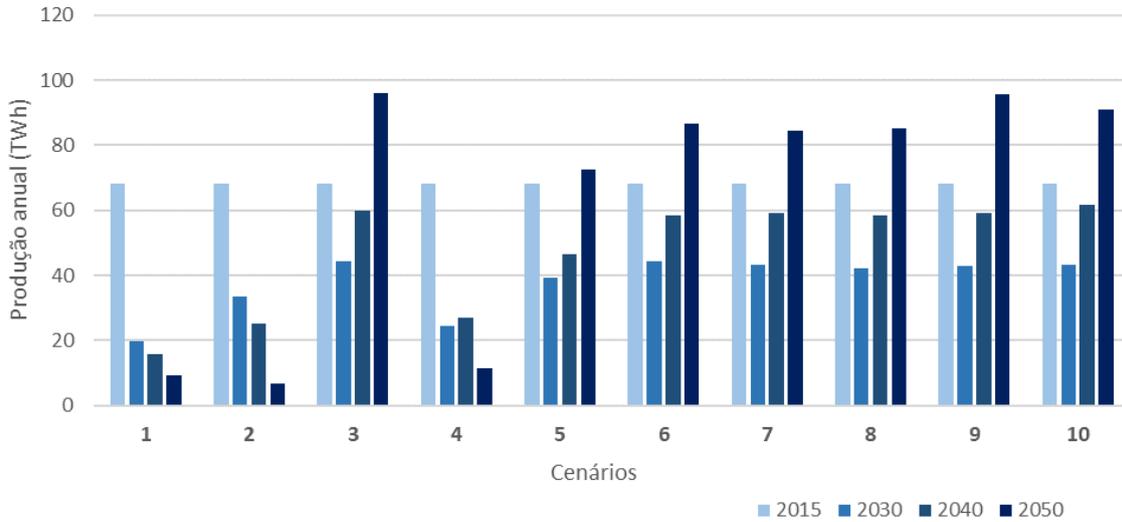


Com contribuição desprezível no ano de 2015, a maioria dos cenários indica que a GD atingirá 50 GW de capacidade instalada e passará a fornecer cerca de 100 TWh ao ano para a matriz elétrica em 2050, em consonância com sua tendência global de crescimento nas próximas décadas. O cenário 9 difere dos demais, com geração de cerca de 150 TWh em 2050, por se tratar de cenário específico onde a GD atinge 75 GW de capacidade instalada no país. O cenário “Estagnação” (1) também apresenta perspectiva de crescimento contínuo da GD, porém muito inferior aos demais.

6.1.5 Combustíveis fósseis

Uma observação de grande relevância para este trabalho é relativa ao panorama de geração elétrica a partir dos combustíveis fósseis, visto que estes possuem os maiores fatores de emissão que influenciam na pegada de carbono residencial calculada no estudo. Os resultados são apresentados nas Figuras 15 e 16.

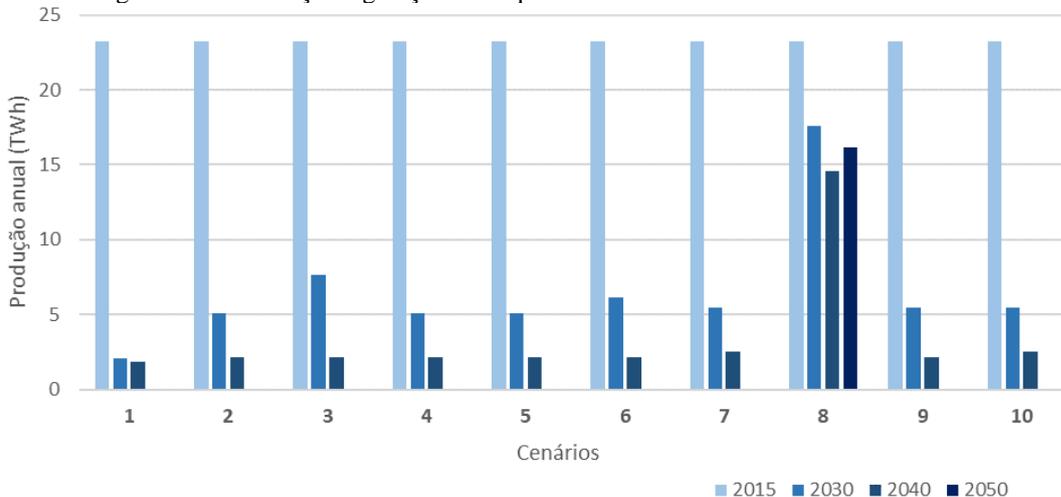
Figura 15 – Mudança da geração anual por gás natural nos cenários em estudo



(fonte: elaboração do autor)

A mudança da geração por gás natural varia consideravelmente em função do cenário avaliado, mas observa-se em geral uma tendência de manutenção ou aumento limitado da geração através desta fonte até 2050, embora este aumento não acompanhe o aumento geral na geração elétrica de maneira proporcional, de modo que a participação do gás natural seja reduzida sobre o total gerado anualmente no país. Isto pode ter relação com o fato de o gás natural ser um combustível de uso controlado para balanceamento da rede e complementação de geração em situações de estresse hídrico ou outras situações de baixa geração a partir de fontes renováveis. É possível que o PNE 2050 reduza a importância destas situações ao considerar que o planejamento energético, levando em conta todos os riscos climáticos físicos e outros riscos associados, será realizado da maneira otimizada.

Figura 16 – Mudança da geração anual por carvão mineral nos cenários em estudo

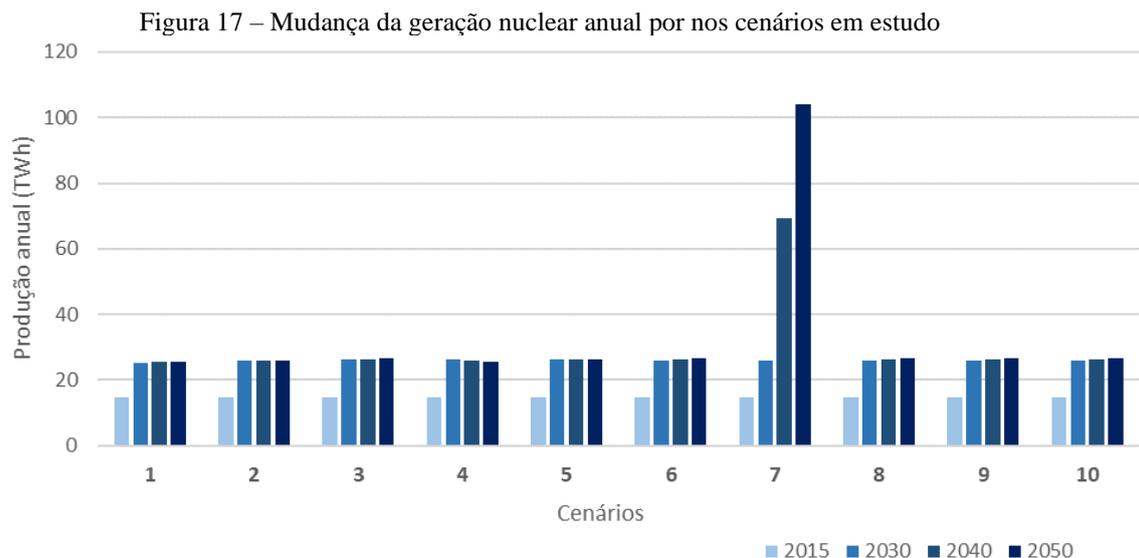


(fonte: elaboração do autor)

Quanto ao carvão mineral, o PNE 2050 prevê uma redução a zero do uso da fonte em praticamente todos os cenários avaliados, com exceção do cenário “Carvão financiado com redução de 20% no CAPEX” (cenário 8). Esta é a única fonte de geração, dentre as principais apresentadas pelo PNE 2050, que apresenta redução no ano de 2050 relativamente à geração no ano de 2015. Diversas razões explicam o porquê de o carvão ter seu uso descontinuado no longo prazo: altos custos de operação envolvidos, novas fontes e tecnologias mais eficientes e as elevadas emissões de CO₂ da geração elétrica a partir do carvão (FINKELMAN et al., 2021), apesar de o PNE 2050 não parecer levar esse fator em conta. Apesar dessa tendência de redução apresentada no PNE 2050, se analisados os dados do BEN 2022 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a), observa-se uma redução pouco expressiva de geração, que passou de 19,1 TWh em 2015 para 17,6 TWh em 2021, seguindo um caminho muito lento de desativação das usinas termelétricas a carvão mineral no Brasil. Ressalta-se inclusive o temor de um retorno do crescimento do uso de carvão, visto que a geração em 2021 a partir desta fonte foi a maior registrada desde 2015.

6.1.6 Nuclear e outras fontes

A energia nuclear apresenta baixa participação na matriz elétrica brasileira (aproximadamente 2,7% da geração em 2015).



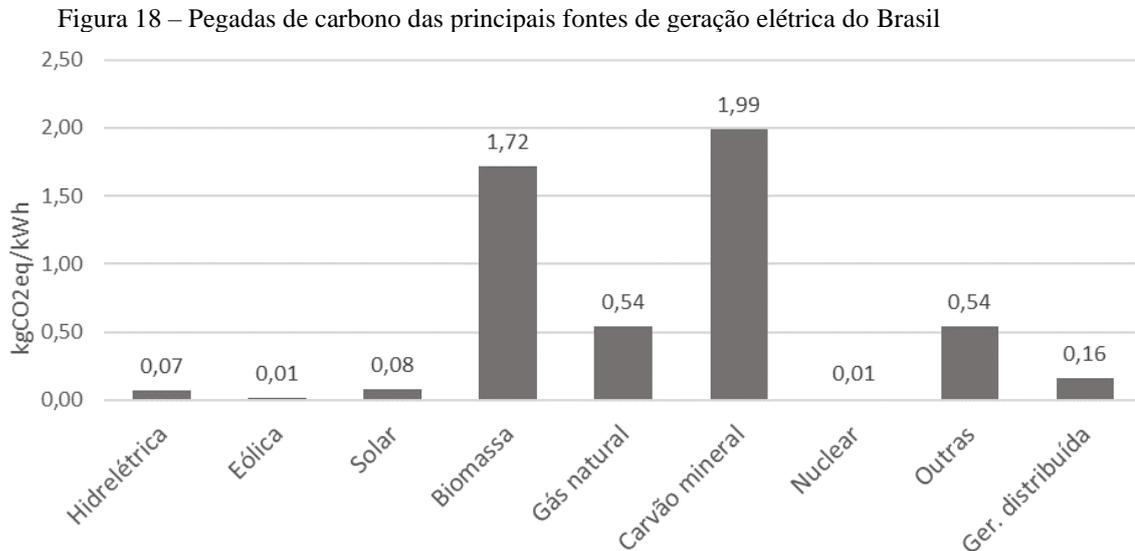
(fonte: elaboração do autor)

Quase todos os cenários apresentam crescimento da geração até 2030, provavelmente ligado à previsão de conclusão da usina nuclear de Angra 3 antes do ano de 2030, não sendo previstos outros projetos no setor após este ano. Apenas o cenário 7, ligado a um aumento da capacidade nuclear instalada para 10 GW, prevê crescimento expressivo da participação da fonte na matriz elétrica brasileira em um horizonte 2050.

Por fim, o PNE 2050 menciona ainda a geração elétrica a partir de outras fontes, sem especificar a fundo a composição desta categoria, mas possivelmente contando com participação importante da geração térmica a partir de derivados de petróleo. Em 2015, a categoria foi responsável por 16,2 TWh fornecidos à matriz, e praticamente todos os cenários indicam para uma redução desta para 3,7 TWh anuais já em 2030 e manutenção deste valor até 2050.

6.2 FATORES DE EMISSÃO DA ELETRICIDADE

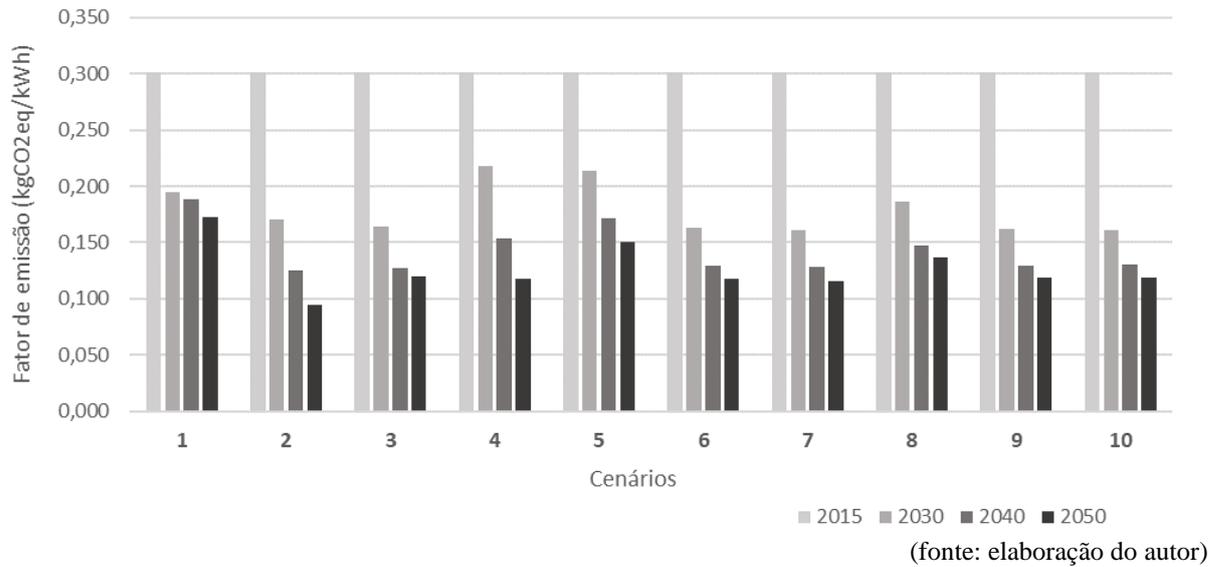
Os resultados por fonte, obtidos a partir da base de dados do Ecoinvent, são apresentados na Figura 18, abaixo, que corresponde ao vetor \vec{b} apresentado na seção 5.3.



(fonte: elaboração a partir de ECOINVENT, 2022)

A partir da multiplicação dos fatores de emissão por fonte, encontrados no Ecoinvent, pelos cenários de geração ligados à mudança das fontes da matriz elétrica brasileira nos horizontes 2030, 2040 e 2050, e da divisão do resultado pela geração segundo cada cenário, obtiveram-se os seguintes fatores de emissão gerais para cada cenário (vetor \vec{d} apresentado na seção 5.3):

Figura 19 – Mudança dos fatores de emissão da rede elétrica por cenário (kgCO₂eq/kWh)



A partir da Figura 19, observa-se uma tendência de forte redução na pegada de carbono de 1 kWh de energia elétrica, com reduções que variam de 43% até 68% entre os fatores de emissão de 2015 e 2050, a depender do cenário. Isso se explica principalmente pela redução na proporção de fontes altamente emissoras como gás natural, biomassa e carvão mineral sobre o total gerado por ano, o que por sua vez se dá muito em função do aumento esperado na proporção das fontes eólica, solar e da geração distribuída no país.

O cenário que despontou como aquele com menor fator de emissão no ano de 2050 foi o de expansão da matriz a partir de tecnologias não-emissoras (cenário 2), com apenas 0,095 kgCO₂eq/kWh em 2050, contra a linha de base geral de 0,301 kgCO₂eq/kWh em 2015. Este foi um resultado esperado, pois pressupõe grande expansão de fontes renováveis em detrimento de fontes como gás natural e carvão mineral, que deixariam de receber investimentos para sua expansão.

É interessante observar que o cenário que resultou em um maior fator de emissão no horizonte 2050 foi justamente o cenário “Estagnação”, com 0,173 kgCO₂eq/kWh. O segundo cenário de maior fator de emissão foi o de integração com países da América do Sul, com 0,150 kgCO₂eq/kWh, especialmente pelo aumento da proporção de geração por biomassa, embora seja importante destacar que este cenário não considera as perdas por transmissão devido às longas distâncias entre países. O terceiro cenário corresponde ao cenário de redução de 20% no CAPEX de usinas a carvão mineral, com 0,136 kgCO₂eq/kWh.

Essa variabilidade relevante condiz com uma importante influência dos fatores restritivos responsáveis pela caracterização de cada cenário na pegada de carbono final da energia elétrica no país em 2050. Estes fatores são diversos e vão desde questões tecnológicas e econômicas, como em cenários de redução de CAPEX para algumas fontes de energia, até questões geopolíticas, como no cenário “Integração Elétrica com países da América do Sul”. As principais hipóteses explicativas sobre fatores que influenciam na taxa de variação no uso de determinada fonte, nas próximas décadas, foram apresentadas na seção 6.1.

Um ponto alto dos cenários do PNE 2050 foi a redução a zero prevista para a geração de eletricidade por meio de carvão mineral até 2050, em alinhamento com o Acordo de Paris e com o esforço global pelo fim do uso deste combustível como fonte de energia. Estes esforços estão ligados principalmente à baixa viabilidade econômica do carvão como fonte geradora de energia, mas também à questão climática devido à alta emissão de CO₂ do carvão mineral. Também se levou em conta questões como poluição atmosférica nos centros urbanos e problemas respiratórios para a população próxima às usinas, devido à emissão de partículas finas decorrentes da queima de carvão mineral.

Sendo assim, apesar dos pontos apresentados acima, observou-se que a maioria dos cenários do PNE 2050 prevê uma redução lenta e gradual do uso do carvão, que continuaria gerando energia elétrica no país até a década de 2040. Mesmo que esse uso se dê de maneira muito reduzida, percebe-se um descompasso entre as ações tomadas pelos países que são referência em compromissos climáticos e os passos do Brasil se o caminho tomado pela política energética nacional acompanhar os cenários do PNE 2050. Mesmo países que hoje dependem fortemente do carvão, como por exemplo a Alemanha, possuem planos robustos para descontinuar a fonte antes de 2040; os cenários do PNE 2050 para o Brasil, cuja matriz elétrica dependia apenas em 3% do carvão em 2015 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022a), mostram estar bastante alheios a uma realidade de transição energética de baixo carbono que passa cada vez mais a ser exigida por governos, investidores e consumidores.

As razões para se traçarem cenários tão conservadores quanto à redução do uso de carvão no Brasil podem estar desde o uso de metodologias que mantêm a atratividade econômica do carvão, até a simples desconsideração das variáveis relacionadas aos danos ambientais gerados pelo uso da fonte.

6.3 PEGADAS DE CARBONO RESIDENCIAIS

Através do produto tensorial entre os fatores de emissão encontrados acima e os valores de consumo residencial por classe socioeconômica retirados da PPH 2019 e apresentados na Figura 8 da seção 3.2.2, foi possível estabelecer as projeções de pegadas de carbono futuras das residências em função do horizonte observado, cenário de matriz elétrica e classe socioeconômica da família, assim como a pegada de carbono de 2015, como linha de base.

6.3.1 Pegada de carbono por residência

Os resultados de pegada de carbono anual por tipo de residência brasileira são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 11 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica em 2015
(kgCO₂eq/ano)

Classe	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
	1.172	1.076	838	681	561	401	577

(fonte: elaboração do autor)

Tabela 12 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2030 (kgCO₂eq/ano)

Classe / Cenário	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
1	757	695	541	440	362	259	373
2	663	609	474	385	317	227	327
3	640	588	457	372	306	219	315
4	850	781	608	494	407	291	419
5	833	765	595	484	398	285	410
6	636	584	455	370	304	218	313
7	628	576	449	365	300	215	309
8	723	664	517	420	346	248	356
9	632	580	452	367	302	216	311
10	628	576	449	365	300	215	309

(fonte: elaboração do autor)

Tabela 13 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2040 (kgCO₂eq/ano)

Classe / Cenário	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
<i>1</i>	733	673	524	426	351	251	361
<i>2</i>	487	447	348	283	233	167	240
<i>3</i>	496	456	355	288	238	170	244
<i>4</i>	600	551	429	348	287	205	295
<i>5</i>	666	611	476	387	319	228	328
<i>6</i>	501	460	358	291	240	172	247
<i>7</i>	498	457	356	289	238	171	245
<i>8</i>	575	528	411	334	275	197	283
<i>9</i>	505	463	361	293	241	173	249
<i>10</i>	509	468	364	296	244	174	251

(fonte: elaboração do autor)

Tabela 14 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2050 (kgCO₂eq/ano)

Classe / Cenário	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
<i>1</i>	673	618	481	391	322	230	331
<i>2</i>	369	339	264	215	177	126	182
<i>3</i>	465	427	333	270	223	159	229
<i>4</i>	456	419	326	265	218	156	225
<i>5</i>	584	536	418	340	280	200	288
<i>6</i>	457	420	327	266	219	157	225
<i>7</i>	448	411	320	260	214	153	221
<i>8</i>	530	487	379	308	254	182	261
<i>9</i>	462	424	330	268	221	158	227
<i>10</i>	463	425	331	269	221	158	228

(fonte: elaboração do autor)

No ano de 2050, a pegada de carbono média dos 10 cenários selecionados para a população em geral é de 242 kgCO₂eq ao ano por residência. No entanto, os cenários escolhidos apresentam uma variabilidade considerável quanto ao resultado de pegada de carbono. O cenário de maior emissão por residência é o cenário de estagnação, atingindo 331 kgCO₂eq ao ano por residência, situação na qual haveria pouco incentivo ao desenvolvimento de fontes renováveis em função

da baixa demanda de eletricidade. Já o cenário de menor emissão é aquele que o PNE 2050 nomeia de “Expansão a partir de fontes não emissoras de CO₂” (cenário 2), com 182 kgCO₂eq ao ano por residência.

6.3.2 Pegada de carbono por habitante

Os resultados de pegada de carbono anual por habitante foram obtidos dividindo-se os resultados das tabelas anteriores pelo número de habitantes por residência, para cada classe, e são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 15 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica em 2015, por habitante (kgCO₂eq/hab.ano)

Classe	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
	274	274	228	195	162	122	165

(fonte: elaboração do autor)

Tabela 16 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2030, por habitante (kgCO₂eq/hab.ano)

Classe / Cenário	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
1	177	177	147	126	104	79	107
2	155	155	129	110	91	69	94
3	150	150	124	106	88	66	90
4	199	199	165	141	117	88	120
5	195	195	162	138	115	86	118
6	149	149	124	106	88	66	90
7	147	147	122	104	87	65	89
8	169	169	141	120	100	75	102
9	148	148	123	105	87	66	89
10	147	147	122	104	87	65	89

(fonte: elaboração do autor)

Tabela 17 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2040, por habitante (kgCO₂eq/hab.ano)

Classe / Cenário	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
1	171	171	142	122	101	76	103
2	114	114	94	81	67	50	69
3	116	116	96	82	68	52	70
4	140	140	116	100	83	62	85
5	156	156	129	111	92	69	94
6	117	117	97	83	69	52	71
7	116	116	97	83	69	52	70
8	134	134	112	95	79	60	81
9	118	118	98	84	70	52	71
10	119	119	99	85	70	53	72

(fonte: elaboração do autor)

Tabela 18 – Pegada de carbono anual de uma residência por classe socioeconômica e por cenário em 2050, por habitante (kgCO₂eq/hab.ano)

Classe / Cenário	A	B1	B2	C1	C2	D/E	Brasil
1	157	157	131	112	93	70	95
2	86	86	72	61	51	38	52
3	109	109	90	77	64	48	66
4	107	107	89	76	63	47	64
5	137	137	113	97	81	61	82
6	107	107	89	76	63	47	65
7	105	105	87	74	62	46	63
8	124	124	103	88	73	55	75
9	108	108	90	77	64	48	65
10	108	108	90	77	64	48	65

(fonte: elaboração do autor)

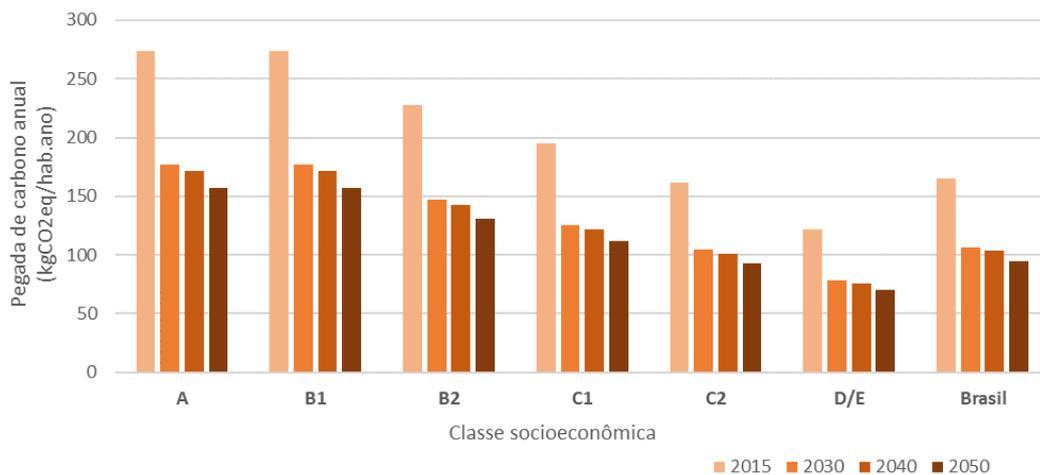
No ano de 2050, a pegada de carbono *per capita* média dos 10 cenários selecionados para a população em geral é de 69 kgCO₂eq ao ano por habitante, visto que há uma média de 3,49 habitantes por residência no país segundo a PPH 2019. Os cenários de maior e menor emissões no ano de 2050 são os mesmos que foram apresentados na seção 6.3.2: o cenário de maior emissão *per capita* é o cenário de “Estagnação” (cenário 1) atingindo 95 kgCO₂eq ao ano por habitante; já o cenário de menor emissão, “Expansão a partir de fontes não emissoras de CO₂” (cenário 2) resulta em apenas 52 kgCO₂eq ao ano por residência.

As classes socioeconômicas A e B1 apresentaram consumo de eletricidade anual *per capita* muito próximos entre si, consequentemente tornando os resultados de pegada de carbono entre essas classes também próximos entre si. Este fato não passa de coincidência entre dados, visto que tanto os dados de consumo por residência como aqueles de habitantes por residência diferem entre essas duas classes. As demais classes não apresentaram este comportamento.

6.3.3 Diferenças socioeconômicas

Pensando em uma melhor visualização das diferenças nos resultados de pegada de carbono em função de classe socioeconômica, são apresentadas a mudança destas pegadas em dois dos cenários mais relevantes da pesquisa, correspondentes àqueles que resultam nas maiores e nas menores pegadas de carbono *per capita*, através dos gráficos das figuras 20 e 21 a seguir.

Figura 20 – Mudança da pegada de carbono residencial *per capita* por classe socioeconômica, no cenário “Estagnação” (cenário 1) (kgCO₂eq/hab.ano)

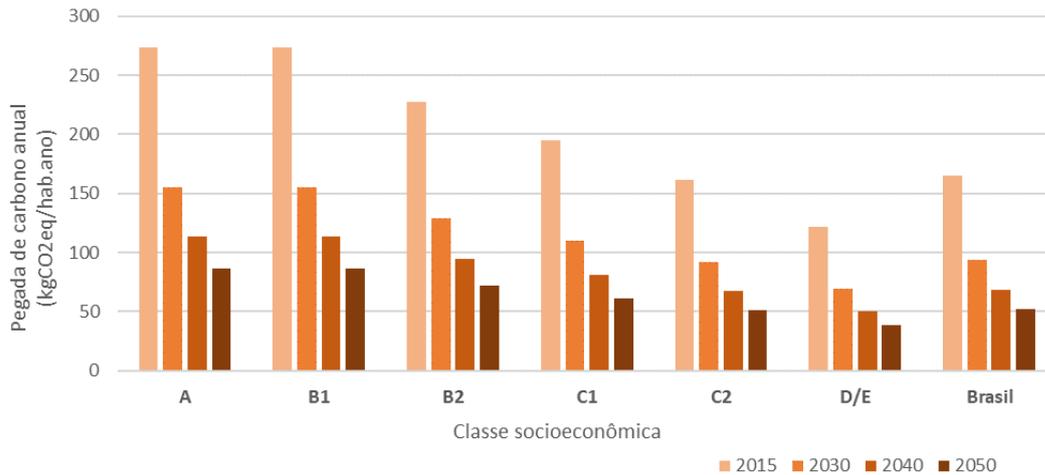


(fonte: elaboração do autor)

O gráfico da Figura 20 apresenta o resultado das projeções de pegada de carbono anual *per capita* devido ao consumo elétrico residencial no cenário “Estagnação” (1), que é o cenário que tende a apresentar os maiores valores de pegada de carbono para cada horizonte temporal. Percebe-se que, neste cenário, a pegada de carbono *per capita* das classes A e B1 no ano de 2050 atinge patamar semelhante àquele observado na classe C2 no ano de 2015, respectivamente 157 e 162 kgCO₂eq, indicando que, neste cenário, famílias de classes mais altas tenderão a emitir GEE devido ao consumo elétrico residencial em proporção semelhante àquilo que é emitido hoje por famílias de classes mais baixas. Em nível nacional, a pegada de carbono em 2050 fica abaixo que aquela observada nas classes D/E (classes de menor poder

aquisitivo) em 2015, respectivamente 95 e 122 kgCO₂eq. Neste cenário foi possível perceber que a queda na pegada de carbono é muito maior no período entre 2015 e 2030 do que nos demais períodos, o que se dá por uma estabilização da matriz em função da estagnação econômica.

Figura 21 – Mudança da pegada de carbono residencial *per capita* por classe socioeconômica, no cenário “Matriz Elétrica com expansão a partir de tecnologias não emissoras de GEE” (cenário 2) (kgCO₂eq/hab.ano)



(fonte: elaboração do autor)

O gráfico da Figura 21 mostra os resultados relativos ao cenário de expansão da matriz elétrica a partir de fontes não emissoras de GEE. Este foi o cenário que apresentou os resultados de pegada de carbono mais baixos no ano de 2050 entre os 10 cenários analisados nesta pesquisa. Observou-se uma redução contínua nas pegadas de carbono em todas as classes ao longo de cada década. Notavelmente, a pegada de carbono das classes A e B1 no ano de 2050 tornam-se significativamente mais baixas que a pegada de carbono das classes D/E no ano de 2015, respectivamente 86 e 122 kgCO₂eq. Isso indica para uma situação de grande redução na intensidade de carbono brasileira.

6.4 LIMITAÇÕES DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Devem ser observados algumas considerações e limitações relevantes relacionadas aos resultados obtidos nesta pesquisa, como diferenças entre as abordagens utilizadas para se medir a pegada de carbono de cada fonte de eletricidade, diferenças entre as fontes de dados pesquisadas e ainda as possíveis evoluções tecnológicas e demográficas, que, com o tempo, podem alterar certos dados utilizados no estudo com relação à data em que foram coletados.

6.4.1 Diferenças no cálculo de pegada de carbono

Conforme já discutido na seção 5.1.2, este trabalho não levou em conta as emissões apresentadas no PNE 2050 para cada cenário, pois este não considera o ciclo de vida completo das fontes de geração, mas somente sua fase de operação. Para isso, utilizamos a base da Ecoinvent (ECOINVENT, 2022) para cálculo de pegada de carbono levando em conta todas as fases do ciclo de vida das usinas (matérias primas, construção, operação e fim de vida). É importante destacar que não foram consideradas as possíveis perdas ligadas à transmissão e distribuição de energia, incluindo perdas de conversão da alta para a média tensão.

6.4.2 Diferenças entre fontes de dados

Como foi discutido na seção 6.1, observou-se uma diferença nos dados de geração anual consolidados obtidos a partir do PNE 2050 e aqueles obtidos no Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022, da EPE. Foi decidido por se utilizar dos dados do ano de 2015 do PNE 2050 para esta pesquisa, com o objetivo de manter a coerência de método em uma comparação deste ano com os cenários 2030, 2040 e 2050. Essa premissa permite a comparação entre diferentes horizontes temporais.

6.4.3 Evoluções tecnológicas e demográficas

Um ponto de extrema relevância a ser levado em conta é a limitação quanto às evoluções temporais de alguns dos dados utilizados na pesquisa. A única variável considerada dependente do tempo, neste estudo, é o perfil de geração anual da matriz elétrica brasileira, com dados evoluindo nos horizontes de 2030, 2040 e 2050. Não foram levadas em conta possíveis (e prováveis) evoluções dos fatores de emissão das diversas fontes de energia elétrica estudadas, que tendem a sofrer redução a partir de melhorias tecnológicas, assim como não consideradas evoluções de consumo de energia residencial das famílias brasileiras ao longo dos anos, o que tende a aumentar em função da eletrificação das atividades cotidianas. Por fim, embora não tenham sido consideradas modificações na pirâmide socioeconômica brasileira nas próximas décadas, este não resulta em um fator limitante para este estudo, visto que cada classe socioeconômica teve sua pegada de carbono computada separadamente.

7 CONCLUSÕES E TENDÊNCIAS FUTURAS

A pesquisa reuniu dados de diferentes fontes para mostrar como a política energética, as tecnologias de geração de eletricidade e a classe socioeconômica das famílias influenciam, em conjunto, na pegada de carbono do consumo elétrico nas residências brasileiras. A pesquisa também discutiu as projeções futuras para o uso de diferentes fontes de geração de eletricidade no país, buscando enunciar as razões para se reduzir ou aumentar o uso de determinadas fontes e como isto afetará a matriz elétrica brasileira de modo geral. Em outra frente, a pesquisa discutiu as principais diferenças de perfil de consumo das famílias brasileiras em função de cada classe socioeconômica.

Os resultados mostram que a pegada de carbono da energia elétrica futura dependerá fortemente das mudanças na matriz elétrica brasileira nas próximas décadas, que por sua vez dependerá da política energética que será exercida neste período. Esta política deve ser feita através do planejamento estratégico a nível federal, que deverá direcionar a instalação de novas usinas de geração, modernas e limpas, e o descomissionamento de usinas de tecnologia ultrapassada e/ou intensivas em emissões de GEE. No entanto, mostrou-se que independentemente do cenário que efetivamente se configurará, a tendência geral é de aumento na proporção de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira e/ou redução na proporção de fontes intensivas em GEE, resultando, portanto, em uma tendência de redução da pegada de carbono da energia elétrica em todos os cenários analisados.

O melhor cenário de política energética, supondo-se um panorama de não-estagnação econômica e pensando-se em termos de mudanças climáticas, é aquele em que se expande a matriz elétrica brasileira apenas a partir de fontes não emissoras de GEE (cenário 2). Este cenário é desejável uma vez que insere o país em uma rota de descarbonização da energia e da economia, resultando em uma pegada média de 52 kgCO₂eq/hab.ano em 2050, alinhada com as grandes potências mundiais, e que aproxima o Brasil do cumprimento de suas metas climáticas estabelecidas nas Nações Unidas. Por definição, é um cenário viável do ponto de vista econômico, uma vez que está presente no PNE 2050, estudo que já leva em conta este ponto. Inversamente, o cenário menos desejável é aquele de estagnação econômica (cenário 1), em que se investe pouco em novas tecnologias de geração, resultando em uma pegada média de 95 kgCO₂eq/hab.ano no país.

No âmbito demográfico, a pesquisa evidenciou a clara relação entre poder aquisitivo e consumo de energia elétrica *per capita*. Este foi um fator preponderante nos resultados de pegada de carbono, e deve ser levado em conta na formulação da política energética brasileira. Ainda, é interessante notar como a pegada de carbono futura do consumo residencial para classes mais elevadas tende a se reduzir a patamares próximos, ou até mesmo inferiores, daqueles da pegada de carbono atual nas classes mais baixas. Em outras palavras, as famílias brasileiras de maior poder aquisitivo, dentro de algumas décadas, poderão passar a emitir menos GEE devido ao seu consumo elétrico residencial do que aquilo que as famílias de menor poder aquisitivo emitem hoje.

O foco desta pesquisa não foi o de avaliar as emissões totais do país em função do consumo de energia nas residências, mas sim de estabelecer um valor marginal na forma de pegada de carbono. Ainda, a pesquisa não leva em conta as evoluções tecnológicas e demográficas que ainda ocorrerão no país nas próximas décadas, pois faz as projeções baseando-se nestas variáveis de forma estritamente estática e variando apenas os cenários relativos à matriz elétrica nacional. Estudos futuros poderiam considerar estes e outros fatores e desenhar cenários de pegada de carbono a partir de projeções de variações temporais quanto à tecnologia de geração, perfil de consumo familiar e configuração da matriz elétrica brasileira, concomitantemente.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040: Gestão Ambiental, Avaliação do ciclo de vida, Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, p. 2. 2001.
- BELUSSI, Lorenzo *et al.* A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 25, 2019.
- BOCK**, Maiquel. **Geração Hidrelétrica: Conheça a história da geração de energia no Brasil**. [S. l.], 9 abr. 2018. Disponível em: <https://www.hidroenergia.com.br/blog/historia-da-geracao-hidreletrica-brasil/>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- ECOINVENT. **Ecoinvent version 3.6**. 2022. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- ECOM ENERGIA. **CONSUMIDOR LIVRE E AUTOPRODUTOR DE ENERGIA ELÉTRICA**. [S. l.], 15 set. 2022. Disponível em: <https://www.ecomenergia.com.br/blog/autoprodutor-de-energia-eletrica-reduz-custos/>. Acesso em: 17 set. 2022.
- ELETROBRAS. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial**. [S. l.: s. n.], 2019.
- FINKELMAN, Robert B. *et al.* The future environmental and health impacts of coal. **Energy Geoscience**, [s. l.], v. 2, p. 99-112, 2021.
- GADELHA, Sérgio R. B.; CERQUEIRA, Renata M. G. **Consumo de Eletricidade e Crescimento Econômico no Brasil, 1952-2010: Uma Análise de Causalidade**. [S. l.: s. n.], 2013.
- GREENDELTA, G., 2022. **Software OpenLCA**. Berlim, Alemanha. <http://www.openlca.org/>.
- IBGE. **IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo: Séries Históricas**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidoramplo.html?edicao=20932&t=series-historicas>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- IEA. **Key World Energy Statistics 2021**. [S. l.: s. n.], 2021b.
- IEA. **Tracking Buildings 2021**. [S. l.], 2021a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2021>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- IEA. **Solar PV**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>. Acesso em: 23 set. 2022.

IPCC. **Climate Change 2021 The Physical Science Basis: Summary for Policymakers**. [S. l.: s. n.], 2021. 41 p.

LAMBERTS, R. *et al.* **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2014.

LEVASSEUR, A. *et al.* Improving the accuracy of electricity carbon footprint: Estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 136, 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: ano base 2021**. [S. l.: s. n.], 2022a. 6 p.

_____. EPE. **Balanco Energético Nacional: ano base 2020**. Brasília: [s. n.], 2021. 302 p.

_____. EPE. **Balanco Energético Nacional: ano base 2021**. [S. l.], 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em: 28 jul. 2022.

_____. EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: [s. n.], 2020. 230 p.

_____. EPE. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Brasília: [s. n.], 2018. 41 p.

NASCIMENTO, Raphael S.; ALVES, Geziele M. **Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: Métodos e benefícios ambientais**. [S. l.: s. n.], 2016.

ONS. **O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**. [S. l.], 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 29 jul. 2022.

ONU. 12 de dezembro de 2015. **Acordo de Paris**, Paris, 12 dez. 2015.

ONU. **Causes and Effects of Climate Change**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>. Acesso em: 12 out. 2022.

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Pegada de carbono: o que é, como medir e quais ações para reduzi-la**. [S. l.], 16 maio 2022. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/05/pegada-de-carbono-o-que-e-como-medir-e-quais-acoes-para-reduzi-la>. Acesso em: 23 set. 2022.

RIPOLLI, M. L. C. **Mapeamento do palhão enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético**. 1999. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

TAYLOR, F. W. The greenhouse effect and climate change. **Reports on Progress in Physics**, Oxford, v. 54, p. 881-918, 1991.

WIEDMANN, T.; MINX, J. C. A Definition of Carbon Footprint. *In: Ecological Economics Research Trends*. Hauppauge, NY, EUA: Nova Science Publishers, 2008.