



Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística



# PLANO ESTADUAL DE ENERGIA 2050



Maio de 2024

GOVERNADOR DO ESTADO DE SÃO PAULO

**Tarcísio de Freitas**

SECRETÁRIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA

**Natália Resende Andrade Ávila**

SECRETÁRIO EXECUTIVO

**Anderson Marcio de Oliveira**

SUBSECRETÁRIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO

**Marisa Maia de Barros**

SUBSECRETÁRIO DE MEIO AMBIENTE

**Jônatas Souza da Trindade**

SUBSECRETÁRIO DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES

**Denis Gerage Amorim**

SUBSECRETÁRIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO BÁSICO

**Samanta Souza**

---

---

# Participantes - Subsecretaria de Energia e Mineração

## **COORDENAÇÃO GERAL**

Marisa Maia de Barros

## **COORDENAÇÃO TÉCNICA**

Marisa Maia de Barros

## **EQUIPE TÉCNICA**

Gustavo Pereira dos Santos

Jacqueline Faiolo Terto de Oliveira

João Manoel Alves

Lucas Santana Bittencourt

Silvia Regina de Aquino

# Participantes - POLI/USP

## **COORDENAÇÃO GERAL**

Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

## **CONSULTORES SÊNIOR**

Prof. Dr. José Sidnei Martini

Prof. Dr. Antonio Marcos de Aguirra Massola

## **COORDENAÇÃO EXECUTIVA**

Ubiratan Francisco Castellano

## **COORDENAÇÃO TÉCNICA**

Roberto Castro

## **EQUIPE PARA DEFINIÇÃO DO PLANO DE AÇÕES E POLÍTICAS PÚBLICAS**

Ceres Zenaide Barbosa Cavalcanti

Ricardo Lima

Leonardo Ivo

Lucas Motta

## **CADERNO 1 - CENÁRIOS MACROECONÔMICOS**

Bráulio Borges

Roberto Castro

## **CADERNO 2 - DEMANDA E BALANÇO ENERGÉTICO**

Mateus Henrique Balan – Líder

Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

Prof. Dr. André Luiz Veiga Gimenes – Líder

Vinícius Oliveira Silva

Miguel Edgar Morales Udaeta

Matheus Sabino Viana

Roberto Castro

Cyro Vicente Boccuzzi

### **CADERNO 3 – OFERTA DE ELETRICIDADE**

Luiz Armando Steinle Camargo – Líder

Margareth de Cássia Oliveira Pavan

Pedro Souza Rosa

Laís Domingues Leonel

Cosme Rodolfo R. dos Santos

Martin Melo Dias

### **CADERNO 4 – GÁS NATURAL, ENERGIA NUCLEAR E BIOMETANO**

Edmilson Moutinho dos Santos

Margareth de Cássia Oliveira Pavan

### **CADERNO 5 – TRANSPORTE**

Rafael Herrero Alonso

Ubiratan Francisco Castellano

David Tsai

Ingrid Graces

Thenartt Vasconcelos Barros Junior

### **CADERNO 6 – HIDROGÊNIO**

Ennio Peres da Silva

Carla Kazue Nakao Cavaliero

### **CADERNO 7 – MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

José Wanderley Marangon Lima

Michelle Simões Reboita

Benedito Claudio da Silva

Fabiana G. Viana

**CADERNO 8 – EMISSÕES DE GEE**

Munir Y. Soares

Fabio A. Diuana

Luiz Bernardo Baptista

Táisa Nogueira Morais

David Tsai

**CADERNO 9 – MECANISMOS DE MERCADO PARA CRÉDITOS DE CARBONO**

Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.

Fabiana Gama Viana

# Apresentação

Um plano é o resultado de estudos desenvolvidos para subsidiar o atingimento de uma meta.

A meta aqui considerada é que o Estado de São Paulo, desde agora até 2050, disponha da energia suficiente para atender seus cidadãos e sua economia, de maneira coerente com o planejamento energético do País, aproveitando as riquezas naturais e tecnologias que o Estado dispõe, chegando em 2050 com um balanço de emissões de gases de efeito estufa minimizado.

Para atingir a meta preconizada, no âmbito da energia, foi elaborado o presente plano que, em sua essência, tem como visão geral apresentar a situação energética do Estado, no momento atual, definir como se quer chegar em 2050, pesquisar os caminhos de como evoluir de hoje até 2050, escolher o melhor caminho a ser seguido segundo os critérios convenientes e disponibilidades, dividir esse caminho em etapas, estabelecer indicadores que permitam acompanhar essa evolução, estabelecer meios para corrigir os desvios de percurso que surjam, até atingir o balanço de emissões de gases de efeito estufa zerado em 2050.

Por se tratar de um plano de longo prazo, com horizonte de cerca de três décadas, os cenários e as recomendações aqui apresentados são indicativos, servindo de orientação para o estabelecimento de ações de curto e médio prazos, que deverão ser tomadas à luz das políticas que sejam implementadas, nas gestões governamentais que se sucedam.

**TARCÍSIO DE FREITAS**

Governador do Estado de São Paulo

## Disclaimer

---

Este documento consolida o trabalho de uma equipe especializada de profissionais e expressa a expectativa da evolução do Plano de Energia do Estado de São Paulo para o horizonte 2023/2050. Trata-se de uma proposta de plano estratégico de longo prazo, o que lhe confere o caráter de uma proposta indicativa da expansão.

Dado seu caráter indicativo, as metas aqui definidas, bem como suas respectivas métricas de avaliação, são orientativas, associadas às expectativas de evoluções indicadas, pelo que não devem ser tomadas como compromissos formais do Governo do Estado de São Paulo.

Adicionalmente, as projeções elaboradas são baseadas nas melhores práticas e ferramentas disponíveis no momento da elaboração dos trabalhos (Agosto de 2023). Quaisquer desvios entre as projeções e os valores que se realizem são perfeitamente admissíveis, considerando o horizonte visualizado, fato que enseja um acompanhamento periódico para evidenciar e justificar possíveis discrepâncias que se verifiquem, bem como ajustar a rota para o atingimento dos objetivos do Plano.

Assim, este Plano se constitui em uma ferramenta auxiliar importante para a definição da política energética do Estado de São Paulo, a partir de 2023, mas não pode ser tomado como único elemento nesta política, uma vez que a completude de uma política energética depende da conciliação das diretrizes aqui traçadas, com outros segmentos da infraestrutura paulista, bem como das evoluções legais e regulatórias acerca do tema, destacando-se que esses aspectos adicionais não fazem parte do escopo do presente trabalho.

Embora se recomende que os resultados deste Projeto sejam tomados como sinalização dos eixos de evolução do Plano Estadual de Energia para São Paulo, estes devem ser considerados guias orientativas a serem analisadas pelos investidores em seus próprios modelos de decisão de investimento e de análise de risco.

As responsabilidades pelos resultados de eventuais decisões tomadas por investidores e público de interesse, mesmo que tenham este documento como base, não poderão ser atribuídas ao Governo do Estado de São Paulo, através de quaisquer de suas secretarias envolvidas e, tampouco, às instituições e aos profissionais responsáveis pela elaboração do Plano ora apresentado, seja da equipe de coordenação ou da equipe técnica envolvida no projeto.

Da mesma forma, as metas consideradas e apresentadas neste projeto, bem como suas métricas de avaliação, estão associadas a diretrizes que levam em conta os atuais cenários utilizados e são indissociáveis destes, não podendo ser consideradas como responsabilidade do governo paulista, bem como de nenhuma pessoa ou instituição envolvida na elaboração deste documento.

# Governança do Plano Estadual de Energia de São Paulo – Horizonte 2050

## Considerações sobre estrutura e atuação da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística - SEMIL

A estrutura da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL), está organizada de acordo com a Figura 1, onde se pode observar que os temas tratados neste documento perpassam, transversalmente, as atribuições das quatro subsecretarias subordinadas à SEMIL, de tal forma que esta secretaria abriga as competências governamentais necessárias para a concretização das políticas propostas no PEE/SP 2050, para o qual se deve estabelecer a governança e exercer uma liderança coesa e integrada sobre os programas governamentais que emanam das políticas energéticas abordadas, visando a redução das emissões de GEE na área de energia.

Figura 1 - Estrutura da SEMIL



Fonte: <https://semil.sp.gov.br/semil/>

A área de energia do Governo de São Paulo, no desenvolvimento de suas atribuições, promove diversas articulações e interfaces com outras órgãos do próprio estado, dos municípios e governo federal, associações setoriais e indústria, agências reguladoras de energia, universidades e entidades normativas, entidades de fomento e representação nacionais e internacional e a Subsecretaria de Energia e Mineração (SEM) é responsável por planejar e executar as políticas estaduais de energia e mineração, em harmonia com a esfera federal, abrangendo as áreas de transição energética, eficiência energética, energia elétrica, petróleo, gás natural,

biocombustíveis, mineração, transformação mineral e barragens (<https://semil.sp.gov.br/sem/>).

Na área de abrangência da SEM encontra-se a formulação de políticas públicas voltadas para a eficiência energética e a descarbonização das atividades econômicas paulistas, visando atrair investimentos privados em projetos que contribuam com essa diretriz.

Quando o Estado de São Paulo formalizou sua adesão aos programas “Race to Zero” e “Race to Resilience” 2050, através do Decreto Estadual 65.881/2021, esse amplo leque de relacionamento da atuação da área de energia do Governo de SP propiciou articulações essenciais para que a então designada SIMA (Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente), e posteriormente a atual SEMIL, mobilizasse agentes públicos e privados da sociedade para cooperar e engajar no desenvolvimento e posterior implementação. Esse marco legal reforça e formaliza a visão governamental voltada para a economia descarbonizada no ESP.

Essencial para garantir o sucesso do PEE/SP 2050 e questão central nos inúmeros estudos sobre impactos climáticos, as políticas relacionadas aos recursos hídricos são planejadas e executadas pela Subsecretaria de Recursos Hídricos e Saneamento Básico (SRHSB) que agrega também o saneamento e resíduos sólidos, visando a universalização do abastecimento de água, dentre outros propósitos (<https://semil.sp.gov.br/srhsb/>)

Cabe à Subsecretaria do Meio Ambiente (SMA) a coordenação, planejamento, a execução da Política Estadual de Meio Ambiente (Lei 9.509/97) e a coordenação de estudos e planejamento de atividades de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, visando o fomento e a promoção da Política Estadual de Mudanças Climáticas (Lei nº 13.798/2009), atuando dentre outras temáticas, no planejamento ambiental territorial, visando compatibilizar o desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico (<https://semil.sp.gov.br/sma/>).

O atendimento a essas responsabilidades pela SMA pressupõe uma estreita correlação com as questões energéticas do Estado de São Paulo no curto, médio e longo prazo, onde se insere o PEE/SP 2050.

Por seu turno, a Subsecretaria de Logística e Transportes (SLT), responsável pelo planejamento da logística e infraestrutura dos meios de transportes no estado de São Paulo tem correlação direta com os objetivos do PEE/SP 2050 (<https://semil.sp.gov.br/slt/>), à medida que existe uma correlação direta e interface ampla ente entre o setor de transporte e de energia.

Tanto assim que foi através do núcleo 5 – Energia e Combustíveis que se deu a interface técnica mais intensa entre as equipes executoras do PAC e do PEE, com foco nas áreas de energia elétrica, combustíveis e transportes, com as principais diretrizes emanadas do PAC sendo consideradas e expandidas no trabalho do PEE/SP 2050.

Planos de interesse comum, como por exemplo o Plano Integrado de Transporte Urbano da Região Metropolitana de São Paulo (PITU 2040), ilustrado na figura XX por alguns dos conceitos de inovações que estão nele propostos, ou o PlanClima e ações de mobilidade do Município de São Paulo, por exemplo o avanço da adoção da eletrificação dos ônibus na capital, foram objeto de discussão e considerados no desenvolvimento de ambos PAC e PEE, conforme ilustrado na Figura 2. Essa foi a principal motivação de se inserir um tópico específico sobre a área de transporte no PEE/SP 2050.

Figura 2 - Plano Integrado de Transporte Urbano da Região Metropolitana de São Paulo



## Atração de Investimentos

Do ponto de vista do fomento ao investimento da iniciativa privada nos programas governamentais do ESP, destaca-se a criação de instituição voltada a impulsionar o Investimentos em infraestrutura e transição energética, a InvestSP - Agência Paulista de Promoção de Investimentos e Competitividade, vinculada à Secretaria de Desenvolvimento Econômico, que tem como missão desenvolver o Estado de São Paulo por meio da promoção de investimentos, aumento das exportações, incentivo à inovação e melhoria do ambiente de negócios, recebeu a função de apoiar as

respectivas secretarias no desenho de políticas públicas nas áreas de transição energética, conectividade e 5G, economia circular e cidades inteligentes e nova industrialização do estado.

No desenvolvimento do PEE tem havido oportunidades de interação também como acompanhamento pela equipe do Plano em eventos de discussão das ações em andamento.

Dentro da perspectiva de investimentos em infraestrutura, a InvestSP atua de forma a dar suporte ao Programa de Parceria de Investimentos (PPI-SP) na análise de financiamento de projetos e promoção da carteira de investimentos do estado (<https://www.investe.sp.gov.br/>).

Este documento tem por principal objetivo, apresentar um diagnóstico e apontar os caminhos a serem trilhados pelo ESP na busca da redução na emissão de GEE na área de energia e transportes, até 2050.

## SUMÁRIO

Disclaimer .....	viii
Governança do Plano Estadual de Energia de São Paulo – Horizonte 2050 .....	ix
Considerações sobre estrutura e atuação da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística - SEMIL .....	ix
Atração de Investimentos .....	xi
Introdução .....	15
Atuação do Governo de São Paulo no enfrentamento das Mudanças Climáticas .....	15
Síntese do PEE / SP 2050 .....	20
Considerações iniciais .....	20
Mudanças Climáticas .....	21
Setor Elétrico .....	22
Setor Transporte .....	23
Setor de Energia Térmica e Combustíveis .....	25
Considerações finais .....	26
Transição Energética e o requisito de sustentabilidade .....	29
Eixos Estruturantes para o PEE/SP 2050 .....	35
Metodologia de Desenvolvimento .....	39
Mudanças Climáticas e seus Impactos .....	46
Mudança climática em curso .....	46
Clima atual em São Paulo .....	47
Principais projeções nas variáveis climáticas .....	50
Principais impactos nas projeções nas vazões .....	53
Uso e ocupação do solo .....	55
Uso consuntivo da água .....	59
Projeções de vazão .....	60
Considerações finais - Mudanças climáticas .....	62
Cenários Macroeconômicos .....	64
Economia mundial .....	64
Economia brasileira .....	65
Economia paulista .....	68
Setor Elétrico .....	70
Considerações Gerais .....	70

Demanda de Energia Elétrica .....	71
Visão geral sobre a metodologia aplicada .....	72
Resultados .....	74
Evolução histórica da demanda de energia elétrica no Estado de São Paulo .....	76
Projeção de consumo da Classe Residencial .....	79
Projeção de consumo da Classe Comercial .....	80
Projeção de consumo da Classe Industrial .....	81
Projeção de consumo da Classe Outros .....	82
Projeção de consumo Total pelo PIB .....	83
Projeção da carga na barra da geração .....	84
Considerações finais sobre a demanda de eletricidade .....	89
Eficiência Energética .....	89
Propostas para o cumprimento das metas de eficiência energética .....	94
Pontos Fortes e Fracos para Eficiência Energética no Estado .....	96
Considerações Finais – Eficiência energética .....	97
Demanda de energia elétrica para produção de hidrogênio de baixo carbono .....	102
Geração distribuída e Redes Inteligentes .....	103
Oferta de Energia Elétrica – Geração Centralizada .....	106
Hidroeletricidade .....	106
Termoeletricidade .....	109
Energia Solar Centralizada e Usinas Híbridas .....	112
Cenários internacional e nacional – Panorama Atual, Tendências e Principais Drivers .....	115
Projeção para o Estado de São Paulo – Horizonte 2050 .....	123
Posicionamento e Recomendações Gerais .....	124
Hibridização de Hidrelétricas existentes .....	127
Expectativa de Geração hidrelétrica no Estado de São Paulo .....	129
Eólica Offshore .....	130
Cenários internacional e nacional – Panorama Atual, Tendências e Principais Drivers .....	131
Projeção para o Estado de São Paulo .....	134
Posicionamento e Recomendações Gerais .....	137
Bioeletricidade .....	139
Vetores para expansão da oferta da bioeletricidade sustentável .....	140
Panorama Estadual da bioeletricidades: as oportunidades .....	145
Resíduos orgânicos .....	147
Resíduos sólidos urbanos .....	150
Combustíveis de Derivados de Resíduos (CDR) .....	151

Pequenas centrais nucleares (PCNs).....	155
Balanco de Energia Elétrica .....	157
Análise dos resultados dos modelos energéticos (setor elétrico).....	157
Impacto das Mudanças Climáticas na geração hidrelétrica .....	160
Consolidação do Balanço de Energia Elétrica .....	162
Requalificação das Redes Atuais de Transmissão e Distribuição .....	166
Setor de Transportes .....	170
Contexto e situação.....	170
Considerações sobre o potencial e disponibilidade de energéticos para suportar o cenário de transição no setor de transportes .....	173
Modelagem da demanda de energéticos - Modal rodoviário .....	180
Modelagem da demanda de energéticos - Modal ferroviário, hidroviário e aéreo.....	181
Modais de transporte - Categorias e tecnologia de motorização.....	184
Cenário de referência para o setor de transportes .....	186
Cenário de mitigação e projeção do perfil tecnológico de motorização e combustíveis no transporte .....	186
Projeção das vendas de veículos novos entrantes na frota rodoviária paulista .....	188
Projeção da estrutura das tecnologias de motorização por categoria na frota modal rodoviário.....	189
Projeção da demanda de energéticos do modal rodoviário.....	194
Consolidação das trajetórias da demanda dos diversos energéticos no modal rodoviário...	197
Projeção da demanda de energéticos dos modais ferroviário, aéreo e hidroviário .....	198
Consolidação das trajetórias da demanda dos diversos energéticos nos modais ferroviário, hidroviário e aéreo.....	199
Projeção do total da demanda de energéticos do setor de transportes .....	200
Projeção da demanda energética no cenário de mitigação para o setor de transportes.....	205
Setor de Energia Térmica e Combustíveis.....	207
Preâmbulo .....	207
Bioenergia no contexto da descarbonização .....	208
Benefícios socioambientais da bioenergia e a relação com os ODS .....	209
Modelos de Negócios Orientados para Economia Circular .....	209
Biogás e Biometano.....	210
Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO) .....	211
GLP Renovável e BioGLP .....	212

Gás natural de origem fóssil .....	212
Derivados de Petróleo e Alternativas .....	213
Emissões de gases do efeito estufa das refinarias paulistas .....	214
Estratégias e tecnologias para redução das emissões GEE em refinarias .....	216
Evolução da demanda térmica agregada no cenário referencial.....	217
Contexto dos usos finais no setor industrial .....	220
Demanda térmica no setor industrial.....	222
Contexto dos usos finais no setor residencial.....	223
Demanda térmica no setor residencial.....	224
Contexto dos usos finais nos setores comercial e público.....	225
Demanda térmica no setor comercial .....	226
Demanda térmica no setor público .....	227
Contexto dos usos finais no setor energético.....	228
Demanda térmica no setor energético.....	229
Oferta de energia térmica e combustíveis.....	230
Direcionadores da oferta.....	230
Oferta Nacional .....	230
Oferta Importada.....	231
Direcionadores referentes à transição energética paulista .....	232
Mapeamento da oferta Doméstica de Combustíveis .....	232
Detalhamento da oferta Doméstica de Combustíveis .....	234
Gases combustíveis não convencionais de origem doméstica e importada.....	238
Eficiência energética no consumo térmico.....	241
Emissões de Gases de Efeito Estufa: Balanço Prospectivo e Mecanismos de Mercado de Carbono.....	243
Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), incluindo BECCS .....	243
Balanço de Emissões do Estado de São Paulo .....	247
Mecanismos de Mercado para Emissões.....	255
Conceituação geral .....	255
Preços de referência.....	257
Modelo de mecanismo de Mercado a ser proposto no Brasil com protagonismo do Estado de São Paulo. ....	259
Substitutivo PL 412/22 .....	260
Roadmap - Consolidação dos Resultados.....	263

---

Setor Elétrico .....	263
Setor de Transportes .....	267
Setor de Energia Térmica e Combustíveis.....	270
Mensuração, Relato e Verificação (MRV).....	284
Indicadores de Resultados.....	285
Indicadores de Impacto .....	288
Indicadores de Processo e produto .....	289
Conclusões.....	290
Referências Bibliográficas .....	293

## Índice de figuras

Figura 1 - Estrutura da SEMIL.....	ix
Figura 2 - Plano Integrado de Transporte Urbano da Região Metropolitana de São Paulo .....	xi
Figura 3 - Participação setorial nas emissões de CO <sub>2</sub> no Estado de São Paulo, observada no ano de 2021 .....	17
Figura 4 - Fluxo de atividade do projeto e Interrelação entre os cadernos temáticos... 20	
Figura 5 - Evolução da Matriz de disponibilidade de eletricidade no ESP .....	23
Figura 6- Demanda Total dos Transportes x PIB no ESP .....	25
Figura 7- Demanda térmica no setor energético .....	26
Figura 8 - Roadmap das ações e políticas de descarbonização do setor de energia do Estado de São Paulo.....	28
Figura 9 - Frentes de atuação para elaboração do PEE/SP 2050 .....	41
Figura 10 -Metodologia para projeção da demanda de energia elétrica .....	42
Figura 11 - Metodologia de cálculo das demandas do setor de transportes e de demandas térmicas.....	43
Figura 12 - Metodologia utilizada na determinação das quantidades de hidrogênio a serem demandadas no ESP .....	43
Figura 17 - Climatologia da precipitação e dos ventos .....	48
Figura 18 - Média sazonal das temperaturas (oC) mínima, média e máxima .....	49
Figura 19 - Projeções climáticas.....	51
Figura 20 - Mudanças projetadas na precipitação (%) e temperatura (°C) .....	53
Figura 21 - Fluxograma da metodologia da modelagem hidrológica utilizando o MGB 54	
Figura 22 - Estatística de calibração do modelo MGB Nash-Sutcliffe para as UHEs de São Paulo .....	55
Figura 23 - Estatística de calibração do modelo MGB Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões para as UHEs de São Paulo.....	56
Figura 24 - Uso e ocupação do solo da região do estado de São Paulo no ano de 198557	
Figura 25 - Uso e ocupação do solo da região do estado de São Paulo no ano de 202158	
Figura 26 - Histórico e projeção de mudanças no uso e ocupação do solo para a bacia do rio Paraná - Horizonte até 2050.....	58

Figura 27 - Evolução do consumo de água na bacia do rio Paraná.....	59
Figura 28 - Projeções de usos consuntivos da UHE Estreito Grande, para o cenário de emissão de gases de efeito estufa SSP5-8.5 .....	60
Figura 29 - Projeções de alterações naturais afluentes médias às usinas hidrelétricas do Estado de São Paulo. Ensemble dos modelos cenário SSp2-4.5.....	61
Figura 30 - Projeções de alterações naturais afluentes médias às usinas hidrelétricas do Estado de São Paulo. Ensemble dos modelos cenário SSp2-8.5.....	61
Figura 36 - Demanda global de hidrogênio.....	178
Figura 13 - Maiores economias mundiais medidas em US\$ .....	65
Figura 14 - Projeções de crescimento de PIB para o Brasil.....	67
Figura 15 - Projeção de crescimento do PIB do Estado de São Paulo.....	68
Figura 16 - Crescimento setorial do PIB Paulista .....	69
Figura 37 - Classes de Modelos de Previsão .....	73
Figura 38 - Fluxograma Modelo de Projeção .....	74
Figura 39 - Carga Estado de São Paulo.....	74
Figura 40 - Origem da Energia Estado de São Paulo .....	75
Figura 41 - Geração Estado de São Paulo .....	75
Figura 42 - Participação do Consumo por Classe.....	76
Figura 43 – Distribuidoras .....	77
Figura 44 – Autoprodutores.....	78
Figura 45 - Consumidores Livres .....	78
Figura 46 - Consumidores Especiais.....	79
Figura 47 – Relação histórica e projeção do número de consumidores residenciais e população .....	80
Figura 48 - Consumo da Classe Residencial Estado de São Paulo.....	80
Figura 49 - Consumo da Comercial Estado de São Paulo.....	81
Figura 50 - Consumo da Classe Industrial Estado de São Paulo.....	82
Figura 51 - Consumo da Classe Outros Estado de São Paulo.....	83
Figura 52 - Consumo por Classe Estado de São Paulo .....	83
Figura 53 - Conceitos associados ao consumo e à carga de eletricidade .....	85

Figura 54 - Crescimento da carga de eletricidade na barra de geração para o Estado de São Paulo .....	85
Figura 55 - Ganhos anuais de eficiência energética Consolidado – cenário base e pessimista .....	90
Figura 56 - Ganhos anuais de eficiência energética Setor Industrial– cenário base e pessimista .....	90
Figura 57 - Ganhos anuais de eficiência energética Setor Residencial – cenário base e pessimista .....	91
Figura 58 - Ganhos anuais de eficiência energética Setor Comercial – cenário base e pessimista .....	93
Figura 59 - Ganhos anuais de eficiência energética Demais Setores– cenário base e pessimista .....	94
Figura 60 - Principais Pontos Fortes e Pontos Fracos – Eficiência Energética – Evolução Tecnológica .....	98
Figura 61 - Principais Pontos Fortes e Pontos Fracos – Eficiência Energética – Ganhos Sistêmicos .....	99
Figura 62 - Diagrama de ações visando ganhos sistêmicos de eficiência energética... ..	100
Figura 63 - Expectativa de energia em GD e redução de consumo por SMARTGRID e RD .....	105
Figura 64 - Geração de termeletricidade projetada .....	111
Figura 65 – Expectativa de Geração Termoelétrica Total.....	112
Figura 66. Evolução da Capacidade Instalada Solar Fotovoltaica Centralizada. Fonte: (ANEEL, 2023).....	117
Figura 67. Cenários de Expansão Solar Fotovoltaica Centralizada publicados pela EPE. Fontes: (MME/EPE, 2020) e (EPE, 2022).....	120
Figura 68. Localização de UHE, PCH, Usinas Fotovoltaicas e Níveis de Irradiação no ESP. Fonte: Elaboração Própria. ....	121
Figura 69. Projeção Expansão Solar Fotovoltaica no estado de São Paulo até 2050 (Fonte: Elaboração Própria).....	124
Figura 70 – Expectativa de Geração Hidráulica .....	130

Figura 71. Potencial Eólico Offshore no Brasil concentrados em 5 polos de desenvolvimento. Fonte: (EPE, 2020) e (IBAMA, 2023) .....	133
Figura 72. Projeção de Expansão Eólica Offshore no estado de São Paulo até 2050 (Fonte: Elaboração Própria). .....	135
Figura 73 - Participação no consumo global de bioenergia por uso final – 2020 .....	139
Figura 74 – Bioeletricidade em escala mundial .....	140
Figura 75 - Matriz elétrica mundial - participação da bioenergia na geração de eletricidade por matéria prima.....	141
Figura 76 - Matriz elétrica nacional .....	141
Figura 77- Matriz elétrica nacional- participação da bioenergia na geração de eletricidade por matéria-prima .....	142
Figura 78 Condições para expansão da oferta de bioeletricidade.....	144
Figura 79- Participação das diferentes fontes de biomassa na matriz elétrica estadual. ....	145
Figura 80- Participação da biomassa na geração total de energia em SP .....	145
Figura 81 - Potencial de biogás por Regiões Administrativas do estado de SP .....	149
Figura 82 - Evolução da participação da Biomassa .....	150
Figura 83 – Submercado Simulação .....	158
Figura 84 – Geração Usinas Não Simuladas .....	159
Figura 85 – Geração Total SP .....	159
Figura 86 – Geração Hidroelétrica Centralizada SP .....	161
Figura 87 – Energia Armazenada REE Paranapanema .....	161
Figura 88 – Energia Armazenada REE Paraná .....	162
Figura 89- Projeção da Energia Elétrica Gerada no Estado de São Paulo para o horizonte 2023/2050 .....	163
Figura 90 - Evolução na matriz de geração de Energia Elétrica de São Paulo .....	164
Figura 91 - Balanço de energia elétrica de São Paulo no horizonte 2023/2050.....	165
Figura 92 - Evolução da matriz energética do balanço de eletricidade do Estado de São Paulo .....	165
Figura 93 - Intercâmbio de energia elétrica do Estado de São Paulo .....	166

Figura 94 - Frota, motorização, combustíveis e emissões de GEE do setor de transportes no Estado de São Paulo - 2021 .....	171
Figura 95 - Arcabouço de referências consultadas para o estudo.....	172
Figura 96 - Fluxograma da metodologia para o cálculo dos consumos energéticos das categorias de veículos para o modal rodoviário .....	180
Figura 97 - Fluxograma da metodologia para o cálculo dos consumos energéticos para os modais ferroviário, hidroviário e aéreo.....	182
Figura 98 - Demanda total do setor de transportes vs PIB do Estado de São Paulo ....	186
Figura 99 - Trajetórias da Estrutura de participação das tecnologias de motorização na frota modal rodoviário, por categoria .....	193
Figura 100 - Projeção das frotas de veículos por categoria de veículos e respectivas trajetórias de tecnologias de motorização no modal de transporte rodoviário.....	194
Figura 101 - Projeção da demanda de energéticos do transporte rodoviário, em unidades comerciais .....	197
Figura 102 - Projeção da demanda de energéticos do transporte ferroviário, hidroviário e aéreo .....	199
Figura 103 - Demanda total de diesel fóssil, biodiesel e diesel verde.....	200
Figura 104 - Demanda total de gás natural e biometano no modal de transportes ....	201
Figura 105 - Demanda total de gasolina C e etanol hidratado no modal de transportes .....	202
Figura 106 - Demanda total de hidrogênio para o modal de transportes.....	202
Figura 107 - Demanda total de Bio-QAV e combustíveis sintéticos no modal de transportes.....	203
Figura 108 - Demanda total de eletricidade no modal de transportes .....	204
Figura 109 - Quadro resumo da demanda de energéticos para o setor de transportes no Estado de São Paulo.....	204
Figura 110 - Projeção da demanda energética do setor de transportes e da trajetória do PIB do Estado de São Paulo para o cenário de mitigação.....	206
Figura 111 - Rotas tecnológicas, produtos e usos finais da bioenergia .....	208
Figura 112 - evolução da demanda térmica agregada por setor socioeconômico .....	218
Figura 113 - Demanda térmica agregada por tipo de combustível .....	218

Figura 114 - Participação por combustível na demanda térmica .....	219
Figura 115 - Diversificação energética para o atendimento da demanda térmica.....	219
Figura 116 - Redução expressiva da participação de derivados de petróleo fósseis, e de biocombustíveis sólidos.....	220
Figura 117 - Participação dos gases combustíveis .....	220
Figura 118 - Consumo térmico industrial.....	222
Figura 119 - Consumo de combustíveis para uso térmico na indústria.....	223
Figura 120 - Consumo térmico residencial .....	224
Figura 121 - Participação dos energéticos no consumo térmico residencial.....	225
Figura 122 - Consumo térmico no setor comercial.....	226
Figura 123 - Participação dos combustíveis no setor comercial.....	227
Figura 124 - Consumo térmico no setor público .....	228
Figura 125 - Evolução na matriz térmica do setor público .....	228
Figura 126 - Demanda térmica no setor energético.....	229
Figura 127 - Evolução na matriz de consumo térmico para o consumo energético.....	230
Figura 128 - Mapeamento da oferta paulista de combustíveis .....	233
Figura 129 - Zonas canavieiras do Estado de São Paulo .....	234
Figura 130 - Evolução no mix de Biogás e de Gás natural .....	237
Figura 131 - Mapa de prospecção para Shalegas em São Paulo.....	239
Figura 131 - Mecanismo de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS).....	244
Figura 132 - Emissão de gases do efeito estufa para os cenários Linha de Base e mitigação em Mt CO <sub>2</sub> e.....	250
Figura 133 - Evolução das emissões de GEE para o cenário linha de base .....	251
Figura 134 - Evolução das emissões de GEE para o cenário mitigação.....	251
Figura 135 - Emissões mitigadas do cenário mitigação em relação ao cenário linha de base.....	252
Figura 136 - Participação setorial relativa nas emissões de GEE do ESP .....	253
Figura 137 - Resumo dos resultados e impactos do setor elétrico.....	264
Figura 138 – Roadmap para o Setor de energia elétrica .....	265
Figura 139 - Resumo dos resultados e impactos do setor de transportes .....	267
Figura 140 – Roadmap para o setor de Transportes.....	268

---

Figura 141 - Resumo dos resultados e impactos do setor de Energia Térmica e Combustíveis.....	270
Figura 142 – Roadmap do setor de Energia Térmica e Combustíveis.....	271
Figura 143 – Roadmap Geral resumido .....	292

## Lista de abreviaturas

(ABINEE)	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE)
(APE)	Autoprodução de Energia (APE)
(ASAS)	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)
(BECCS)	<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)</i>
(BEESP)	Balanço Energético do Estado de São Paulo (BEESP)
(CCEE)	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)
(CCS)	<i>Carbon Capture and Storage (CCS)</i>
(CDR)	Combustíveis de Derivado de Resíduos (CDR)
(CMIP)	<i>Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)</i>
(CMO)	Custo Marginal de Operação (CMO)
(COPs)	Conferência das Partes (COPs)
(CPC)	<i>Climate Prediction Center (CPC)</i>
(CTI)	Ciência, Tecnologia e Inovação (CTI)
(ECMWF)	<i>European Centre for Medium-Range Forecast (ECMWF)</i>
(EPE)	Empresa de Pesquisa Energética (EPE)
(EPZ)	<i>Emergency Planning Zone (EPZ)</i>
(ESP)	Estado de São Paulo (ESP)
(GC)	Geração Centralizada (GC)
(GD)	Geração Distribuída de Energia (GD)
(GLP)	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)
(IEA)	<i>International Energy Agency (IEA)</i>
(IPCC)	Painel Governamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)
(IRENA)	International Renewable Energy Agency (IRENA)
(LOCA)	<i>Loss of Cooling Accident (LOCA)</i>
(MAPA)	Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA)
(MBRE)	Mercado Brasileiro de Reduções de Emissões (MBRE)
(MDL)	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)
(MGB-IPH)	Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)
(MM)	Mecanismos de Mercado (MM)

---

(MMA)	Ministério do Meio Ambiente (MMA)
(MME)	Ministério de Minas e Energia (MME)
(MMGD)	Micro e Minigeração Distribuída (MMGD)
(NBS)	<i>Nature-Based Solutions</i> (NBS)
(ODS)	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)
(PCNs)	Pequenas Centrais Nucleares (PCNs)
(PCT)	Pequenas Centrais Térmicas (PCT)
(PDE)	Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE)
(PEMC)	Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC)
(PERH)	Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH)
(PIB)	Produto Interno Bruto (PIB)
(PMR)	<i>Partnership for Market Readiness</i>
(PNE)	Plano Nacional de Energia (PNE)
(RD)	Resposta da Demanda (RD)
(RED)	Recursos Energéticos Distribuídos (RED)
(SAEB)	Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias (SAEB)
(SBCE)	Sistema Brasileiro do Comércio de Emissões (SBCE)
(SIN)	Sistema Interligado Nacional (SIN)
(SMR)	<i>Small Modular Reactors</i> (SMR)
(TEP)	Tonelada Equivalente de Petróleo (tep)
(TIC)	Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC)
(TOE)	Tonelada de Óleo Equivalente (toe)
(UCCF)	Unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado (UCCF)
(UF)	Unidades da Federação (UF)
(UFV)	Usinas Solares Fotovoltaicas (UFV)
(VUCs)	Veículos Urbanos de Carga (VUCs)
(WCRP)	<i>World Climate Research Program</i> (WCRP)
(ZCAS)	Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

# Introdução

---

## Atuação do Governo de São Paulo no enfrentamento das Mudanças Climáticas

O Governo do Estado de São Paulo tem trabalhado ativamente no desenvolvimento de ações que buscam a sustentabilidade, a preservação e a recuperação do meio ambiente paulista.

No ano de 1995, foi criada a Divisão de Mudanças Climáticas e Acordos Multilaterais da CETESB, cujo objetivo é oferecer suporte às ações que possam emergir de compromissos oriundos de acordos internacionais, como o Protocolo de Montreal (1989) e a Convenção Quatro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (1992). Essa divisão coordena os programas PROZENESP e PROCLIMA da Secretaria de Meio Ambiente Infraestrutura e Logística - SEMIL, criados por meio de resoluções publicadas no mesmo ano de 1995. Em 2009 foi instituída a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), por meio da Lei Estadual nº 13.798, cujo conteúdo e regulamentação são aderentes à Convenção do Clima da ONU e à Política Nacional sobre Mudanças do Clima.

No âmbito da PEMC, existem diversas metas ambientais e de sustentabilidade, como as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa pelo Estado de São Paulo. Para que parte desses objetivos possam ser atendidos, o Estado, por meio do Conselho Estadual de Política Energética, aprovou, no ano de 2012, o Plano Paulista de Energia 2020, cujos objetivos eram elevar para 69% a participação das energias renováveis na matriz da oferta interna<sup>1</sup> energética do Estado até o ano de 2020 e estimular o uso racional e eficiente da energia em todos os setores da economia.

Destaque-se que, de acordo com o Balanço Energético Paulista de 2022, que considera o ano base de 2021, (GOV-SP, 2022) a participação de energéticos renováveis na disponibilidade interna do Estado de São Paulo em 2020 era de 62,4%, participação que caiu para 58,5% em 2021, devido à severa seca enfrentada naquele ano.

Dentre os produtos mais recentes da PEMC, a SEMIL coordenou o Projeto Trajetórias de Descarbonização, Fase I - entre 2019 e 2021 (SIMA, 2022) promovido pelo Climate Group/Under 2 Coalition e identificou, nesse período, 12 ações prioritárias para a mitigação de 30% das emissões de gases de efeito estufa no Estado.

---

<sup>1</sup> Oferta interna é o balanço de disponibilidade de energia para o consumo interno no estado de São Paulo, computado a partir do resultado algébrico da equação:

Oferta Interna Bruta de Energia = Produção Interna + Importação - Exportação + Variação de Estoque

A Fase II do projeto considerou elaborar uma ferramenta de cálculo que permitisse avaliar o alcance dessas ações, com foco na neutralidade de emissões, com o objetivo de se atingir a meta do NetZero em 2050.

Convém salientar que a meta é atingir o balanço nulo das emissões até 2050 para o conjunto global das atividades do Estado de São Paulo, lembrando-se que a Energia é apenas uma dessas atividades que, isoladamente das demais, não tem potencial para tornar nulo o balanço de emissões de todo o Estado de São Paulo, uma vez que o setor de energia representa cerca de 1/3 do total de emissões.

Ainda em 2021, ficou estabelecida, a partir do decreto 65.881 de 20 de julho de 2021 (GOV-SP, 2021), a adesão do Estado de São Paulo às campanhas "Race to Zero" e "Race to Resilience", no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Este decreto estabeleceu que sob a coordenação da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL) deveriam ser elaborados os seguintes planos:

- a) Plano de Ação Climática 2050 – PAC 2050;
- b) Plano Estadual de Energia 2050 – PEE 2050;
- c) Plano de Adaptação Climática; e
- d) Zoneamento Ecológico-Econômico - ZEE

Assim, a publicação deste documento, o Plano Estadual de Energia 2050 (PEE/SP 2050), atende à disposição legal da elaboração do Plano Estadual de Energia, com vistas às metas de "Race to Zero" e "Race to Resilience", conforme estabelecido no referido decreto.

Por meio deste conjunto de ações, o Estado de São Paulo publicou em dezembro de 2022, o Plano de Ação Climática 2050 (PAC2050), que desenha uma trajetória de desenvolvimento econômico sustentável e de redução de emissões, definindo estratégias de ações em setores chaves da economia paulista: transporte; energia; agropecuária-floresta e uso dos solos; resíduos; indústria e uso de produtos (PAC2050/SEEG, 2022)<sup>2</sup>.

Considerando esse cenário, no que diz respeito ao uso e produção de energia, a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL), articulou o

---

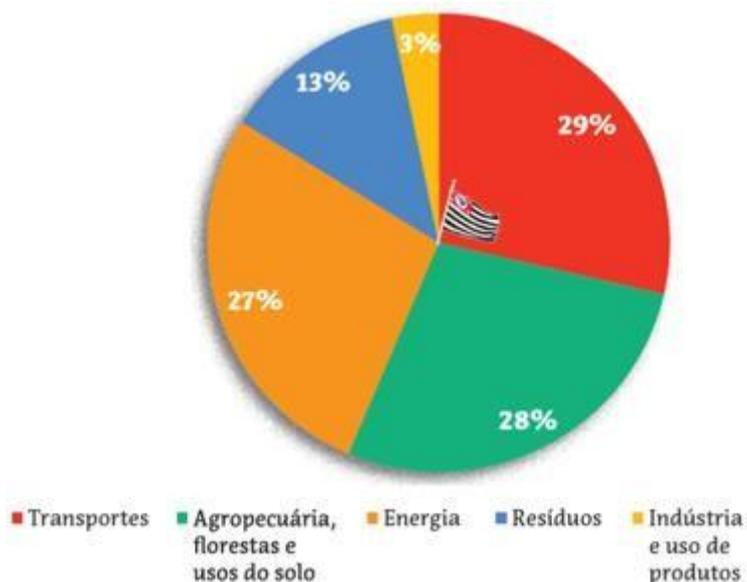
<sup>2</sup> Notar que o PAC2050 realça alguns dos principais marcos temporais, a saber: 2005 (ano-base da meta da PEMC), 2020 (ano da meta da PEMC), 2021 (ano de referência, base do Race to Zero), 2025 (ciclo de revisão dos compromissos nacionais no Acordo de Paris e base para tomadas de decisão), 2030 (ano de referência do Race to Zero, por suas diretrizes) e 2050 (ano da neutralidade climática prescrita nos principais relatórios científicos).

desenvolvimento do Plano Estadual de Energia 2050 (PEE/SP 2050), cujo objetivo principal é planejar o setor energético do Estado (tanto do lado da oferta quanto da demanda) com foco na neutralidade das emissões de CO<sub>2</sub>, nos setores prioritários da economia do Estado, sempre em consonância com os programas *Race to Zero* e *Race to Resilience* da ONU.

Nessa perspectiva, o Plano Estadual de Energia 2050 emerge de uma parceria entre a SEMIL com a Universidade de São Paulo (USP), para buscar soluções tecnológicas factíveis para o uso eficiente da energia e para a ética transição energética, tanto pelo lado da oferta, quanto pelo lado da demanda, nos setores prioritários da economia do Estado de São Paulo<sup>3</sup>.

O Estado de São Paulo ocupa a 4ª posição no ranking de emissões totais do Brasil, perfazendo, no ano de 2021, um total estimado de 142 MtCO<sub>2</sub>e de emissões brutas (SEEG, <https://plataforma.seeg.eco.br/>, 2022). Importante ressaltar que, tanto no PAC2050, como no PEE/SP 2050, o “setor energia” é responsável por 56% das emissões do estado, considerando-se que o transporte demanda energia de várias formas, foi tratado em duas frentes, sendo que a parcela do transporte efetivamente corresponde a 29% das emissões, enquanto o setor de energia propriamente dito responde pelos demais 27%, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Participação setorial nas emissões de CO<sub>2</sub> no Estado de São Paulo, observada no ano de 2021



Fonte: PAC2050/SEEG (SEEG, <https://plataforma.seeg.eco.br/>, 2022)

Em tal contexto, o PEE/SP 2050 se apresenta como uma ferramenta de planejamento que busca atender aos objetivos inerentes ao setor energético, buscando contribuir

<sup>3</sup> Conteúdo gerado a partir de informações presentes na página web da SEMIL.

significativamente para o atendimento da diretriz de neutralidade de carbono em 2050.

Em termos de estratégia de elaboração, o Plano Estadual de Energia SP / 2050 foi desenvolvido em duas fases, sendo a primeira, com enfoque qualitativo, encerrada ao final de 2022 e, na sequência, esta segunda fase, que visa quantificar as grandezas energéticas e as respectivas pegadas de carbono do cenário de mitigação das emissões cotejada com o cenário base.

A quantificação realizada nesta segunda fase é aderente ao plano de expansão apresentado e emerge das seguintes vertentes de análise:

- Avaliação situacional das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de energia paulista, relacionadas às fontes de emissões e aos respectivos energéticos.
- Avaliação dos planos e políticas nacional, estadual e do município de São Paulo, cujo foco são as ações de descarbonização do respectivo setor, no contexto *NetZero* 2050, como por exemplo o PAC 2050.
- Avanços nos processos e programas de efficientização e de eletrificação nos processos produtivos industriais e no consumo de energéticos pela população do Estado, de uma forma geral, com destaque para a evolução da geração distribuída “atrás do medidor”.

Por meio dessas frentes, foi possível quantificar e desenvolver cada uma das rotas de descarbonização propostas, considerando os lados da oferta e da demanda de energia, sendo importante ressaltar que o Plano de Energia foi construído com base em três dimensões de análise: competitividade, segurança energética e sustentabilidade, sob as quais as frentes de trabalho desenvolveram suas rotas tecnológicas nos cenários do diagnóstico, visão de futuro e posicionamento.

Na primeira fase do projeto foram constituídas 16 frentes de trabalho e nesta segunda fase, essas frentes foram agregadas em 9 cadernos temáticos, apontados a seguir, cada um deles liderado por um especialista na matéria tratada:

1. CENÁRIOS MACROECONÔMICOS
2. DEMANDA E BALANÇO ENERGÉTICO
3. OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA
4. GÁS NATURAL E BIOMETANO
5. TRANSPORTES
6. HIDROGÊNIO
7. MUDANÇAS CLIMÁTICAS
8. EMISSÕES DE GÁS DE EFEITO ESTUFA (GEE)
9. MECANISMOS DE MERCADO PARA CRÉDITOS DE CARBONO

Como todas as ações de descarbonização demandam o desenvolvimento de tecnologias e de setores da economia, foi preciso elaborar projeções sobre o cenário futuro da macroeconomia do Estado, com foco no ano de 2050.

Esses cenários foram construídos pela LCA Consultoria Econômica e nortearam o desenvolvimento tecnológico das ações de descarbonização dos setores da economia, necessárias ao atingimento das metas de emissões líquidas para o Estado.

O Plano foi construído com base nas projeções do cenário macroeconômico de referência apresentado pela referida consultoria e, através dele, foi possível avaliar-se o desenvolvimento de políticas transversais ao Plano de Energia, que devem promover o fortalecimento das instituições da Ciência, Tecnologia e Inovação (CTI) local<sup>4</sup>, da indústria de base e da infraestrutura, necessários ao suporte das medidas futuras de descarbonização dos setores da economia paulista.

Nesse contexto, em cada caderno temático foram desenvolvidos os conceitos e análises com rebatimento nas ações que, devidamente articuladas, permitem consubstanciar os programas e planos de ação para a mitigação das emissões dos GEE no Estado de São Paulo até 2050, considerando as seguintes frentes de pesquisas, análises e desenvolvimentos:

- Avaliação das políticas existentes, de ações climáticas
- Desenvolvimento do cenário macroeconômico do Estado de São Paulo
- Diagnóstico
- Visão de futuro
- Posicionamento

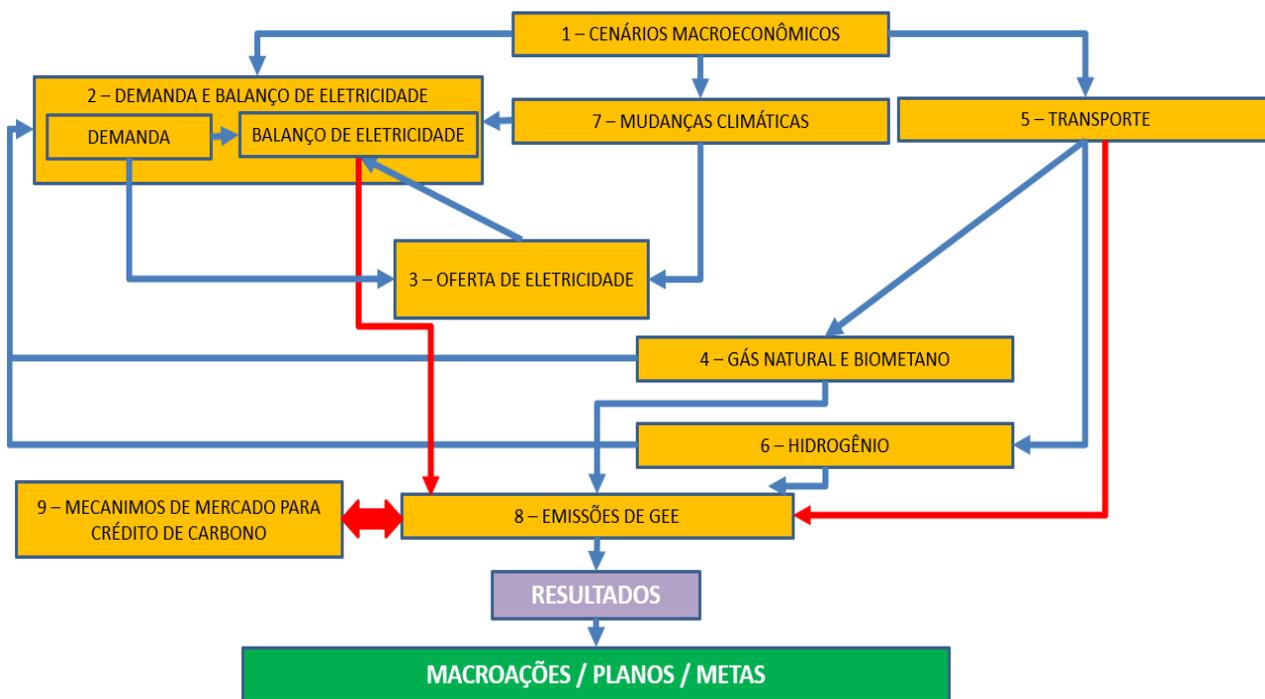
Destaque deve ser dado à interrelação entre os diversos cadernos temáticos, conforme se pode observar na Figura 4, onde se observa, de modo simplificado, as necessidades de fluxo de informações e de entrega de produtos entre as várias frentes de estudos.

Como consequência, foi construído o plano de descarbonização dos setores da economia do Estado, ora apresentado, tanto pelo lado da oferta, quanto pelo lado da demanda energética, colocado à ampla apreciação da sociedade.

---

<sup>4</sup> CTI local: estruturas que compõem o setor de ciência, tecnologia e inovação do Estado de São Paulo

Figura 4 - Fluxo de atividade do projeto e Interrelação entre os cadernos temáticos



Fonte: Elaboração própria

## Síntese do PEE / SP 2050

### Considerações iniciais

O Plano Estadual de Energia 2050 Race to Zero (PEE 2050 RtZ) tem por objetivo fornecer subsídio ao Governo de São Paulo para desenvolver suas políticas climáticas voltadas à descarbonização do setor de energia, com a meta de emissões líquidas zero de GEE, até o ano de 2050.

O setor de energia tem como os pilares de sua política a modicidade tarifária, a segurança energética e a sustentabilidade que, com um olhar amplo do horizonte de longo prazo, fundamentam a busca por energia mais competitiva, módica e segura, de forma a garantir o atendimento à demanda, respeitando as questões sociais, ambientais e econômicas.

O PEE 2050 RtZ, com horizonte de análise até 2050 e balizado pelos citados pilares, tem como diretriz buscar a contribuição do setor de energia para o Estado alcançar a neutralidade de emissões líquidas de GEE até 2050, conforme previsão do PAC.

Apesar do Brasil ter uma matriz de emissão bem peculiar, a matriz de emissão de São Paulo é mais parecida com a mundial, tem o setor de energia como fundamental para o atingimento da meta do PAC.

A transição do setor de energia prevê uma mudança de um setor baseado em combustíveis fósseis para um ambiente de geração por fontes renováveis, captura de carbono e armazenamento de energia. Por outro lado, não se descuida dos três pilares da política, especialmente da modicidade e da segurança, onde o PEE faz uso, quando necessário, de fontes emissoras com mecanismos de mitigação. Nessa perspectiva, tem-se estabelecido um processo de transição e modernização pautado por quatro vetores de transformação, que hoje condicionam todo o setor energético, a saber, descarbonização, descentralização, digitalização e diversificação.

O investimento em inovação, em que o Estado responde por parte significativa do recurso investido no país, surge como uma excelente ferramenta para que se possa acelerar o processo de entrada de novas tecnologias. O conjunto, com ações de gestão do governo, de mercado, regulatório, de infraestrutura e os investimentos direcionados a tecnologias prioritárias, forma a estratégia para a transição energética de forma a atingir um cenário mais descarbonizado.

O cenário econômico de referência para o estudo, no contexto global, considera o menor crescimento e o envelhecimento da população, ganhos menores de produtividade nos países que estão na fronteira tecnológica e os efeitos negativos das anunciadas mudanças climáticas que, juntos, contribuem como barreiras ao crescimento econômico. Ainda assim, países emergentes deverão continuar crescendo mais do que os países já avançados, embora a taxas menores do que as observadas historicamente.

No âmbito nacional, considera-se que a produtividade do trabalho irá crescer cerca de 1,8% a.a., tendo em vista o crescimento perto de zero da Força de Trabalho e o PIB terá um crescimento nesta década de 2%, reduzindo para 1,8% na próxima década e 1,7% no final do período.

Considerando-se a forte correlação entre o PIB brasileiro e o paulista, com base nas projeções elaboradas para o Brasil, foram gerados os resultados de crescimento do PIB maior nesta década, 1,7%, reduzindo para 1,5% na próxima década e 1,3% no final do período. Em termos absolutos ainda continuaria sendo o maior dentre as UFs e tem um crescimento do PIB industrial maior que as duas décadas anteriores.

## Mudanças Climáticas

Estudos indicam aumento de temperatura, com poucas variações na precipitação no período de outono, inverno e primavera em relação ao período histórico e grandes incertezas na projeção da precipitação durante o verão no ESP.

No verão, há uma diversidade maior na precipitação de chuvas, com incerteza oriunda da dificuldade observada na projeção climática da ZCAS, onde está inserido o Estado de SP. No entanto, existe uma certa consonância nos modelos quanto aos eventos extremos como a intensificação da chuva diária acima do percentil de 95%, fato que gera sinais de alerta para o planejamento de estruturas e de busca de sistemas mais resilientes. Outro destaque que deve ser feito, refere-se ao aumento de temperatura máxima e média aumentando a evaporação, o consumo de água, aumento na carga energética para climatização e refrigeração além de atuar na eficiência de processos industriais. No que se refere às afluições às usinas hidrelétricas é possível verificar um decréscimo de 4.15% até 2050 nas vazões médias de todo o Estado considerando os dois cenários de emissão e a diminuição devido ao uso consuntivo.

## Setor Elétrico

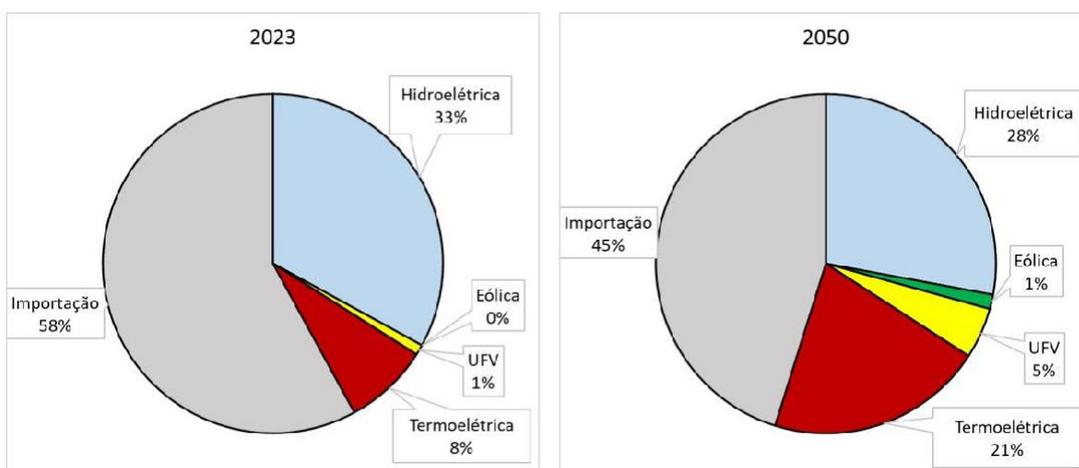
Aplicando-se metodologia e modelos consagrados para projeção de demanda, observa-se que apesar do decaimento das taxas de evolução do PIB de São Paulo no horizonte de 2023 a 2050, a expectativa de crescimento na carga líquida do Estado é da ordem de 9,2 GWmed, já descontando a geração distribuída que reduz a carga a ser atendida pela expansão da capacidade de geração centralizada.

Dentro do horizonte do PEE 2050 RtZ, o Estado de São Paulo é importador líquido de energia elétrica e portanto, para garantir a trajetória de emissão de GEEs líquida reduzida até 2050 e, ao mesmo tempo, garantir o suprimento da eletricidade necessária ao seu crescimento econômico, deverá promover as políticas de geração interna com menores emissões do que as observadas no Sistema Interligado Nacional. As projeções elaboradas neste trabalho dimensionam o esforço necessário para atingimento da meta de reduzir-se o balanço de emissões.

Dado que a evolução no consumo de eletricidade está condicionada à evolução da economia, que apresenta diferentes tendências ao longo do tempo, é essencial que para a adequada avaliação das políticas de redução da emissão de GEEs, se promovam revisões periódicas dos trabalhos, em período de no máximo 4 (quatro) anos, realizados neste projeto, de modo que eles sejam atualizados periodicamente, em função das mudanças nas expectativas da economia, para que se possa acompanhar o traçado da curva de redução nas emissões de forma coerente com a realização da demanda por eletricidade.

A Figura 5 apresenta a evolução da matriz de suprimento de eletricidade ao mercado paulista com base na expectativa de evolução no consumo e no plano de expansão da oferta de energia projetada pelo PEE 2050 RtZ.

Figura 5 - Evolução da Matriz de disponibilidade de eletricidade no ESP



Fonte: Elaboração própria

No Estado de São Paulo, em um cenário de implementação bem-sucedida de medidas de mitigação de emissões para atingir a meta de emissão zero, estima-se um consumo de eletricidade de 28,6 GWm em 2050, representando um crescimento de 47,8% em relação ao consumo de 2023. Por sua vez, tal cenário de mitigação representa uma redução de 34,7% no consumo de eletricidade em 2050, frente ao consumo que ocorreria naquele ano, na hipótese de não se adotar programas de eficiência no consumo. Essa redução seria composta por 28,7% no setor residencial, 28,3% no setor comercial, 41,9% no setor industrial e 36,7% nos demais setores, em comparação com um cenário sem adoção de políticas públicas voltadas à redução nas emissões.

No que diz respeito a outras fontes de energia, além da energia elétrica, a eficiência energética poderia representar uma redução de 30,4% na demanda em relação ao cenário sem políticas de redução nas emissões, composta por queda de 43,9% no setor residencial, 29,6% no setor comercial, 30,5% no setor industrial e 12,4% nos demais setores.

### Setor Transporte

Em 2021 o setor de transportes representou 29% das emissões totais do estado, concentradas 90% nos modais rodoviário e aéreo, consumindo querosene (QAV), respondeu por cerca de 8,2% das emissões do transporte, sendo o modal ferroviário responsável por 2% das emissões e o hidroviário afigura-se marginal quanto a emissões, com cerca de 0,15% de participação.

O cenário de mitigação lida de forma estratégica com as emissões, priorizando obter a redução do consumo de diesel fóssil no modal rodoviário e o deslocamento da gasolina. Por fim, o cenário projeta o deslocamento de querosene fóssil (QAV) no modal aéreo e do diesel fóssil nos modais ferroviário e hidroviário. Foram estabelecidas três alternativas: (i) a eletrificação da frota de veículos; (ii) a utilização de

biocombustíveis, hidrogênio e sintéticos de baixo conteúdo de carbono; e (iii) a utilização de gás metano (GNV e biometano).

Nesse cenário, resulta uma trajetória com redução substancial na demanda de energéticos do modal rodoviário: a demanda total de diesel se reduz de 10,7 bilhões de litros em 2021 para 6,4 bilhões de litros em 2050, sendo 60% de biocombustível no mix do diesel em 2050. A gasolina C (mix de gasolina fóssil e álcool anidro) tem trajetória de redução relevante chegando a 99% em torno de 2045, reduzindo-se apenas a uma demanda residual.

A crescente presença do gás metano no modal rodoviário abate a demanda original de diesel, inicialmente com uso do gás natural veicular de origem fóssil (GNV) e progressiva participação do biometano, o qual atinge 50% da demanda total de gás veicular rodoviário em 2050.

A penetração da eletrificação no modal rodoviário resulta na demanda de 33,8 TWh em 2050, 40% desta para atender a frota de automóveis de passeio. A eletrificação também contribui na redução da demanda do diesel no segmento de ônibus e veículos comerciais leves de logística urbana, e complementarmente na frota de caminhões.

O hidrogênio é uma terceira contribuição na redução de diesel fóssil no modal rodoviário, como também na redução da demanda de gasolina C, impactando mais as frotas de automóveis e comerciais leves.

No modal aéreo, principalmente na última década do período, participam os combustíveis sustentáveis sintéticos (e-metanol, amônia, e-querosene) e bioquerosene respondendo por cerca de 12% da demanda total do aéreo em 2050, com uma penetração marginal de eletrificação, limitando a demanda do QAV fóssil para 3,6 bilhões de litros em 2050.

No modal ferroviário de carga, se está prognosticando a progressiva participação do biodiesel e diesel verde e a decrescente parcela do diesel fóssil no mix do combustível, aumento de eletrificação à bateria com o consumo de cerca de 1 TWh em 2050, com penetração mais tardia do hidrogênio. Para o modal ferroviário de passageiros o cenário projeta 60% de crescimento no consumo de energia elétrica a partir de trajetória de expansão do Metrô de São Paulo e do avanço no plano de implantação dos TICs / CPTM (trens intercity), chegando a 1,6 TWh em 2050. O hidrogênio entra na diversificação tecnológica, apresentando demanda de 2,1 kt em 2050.

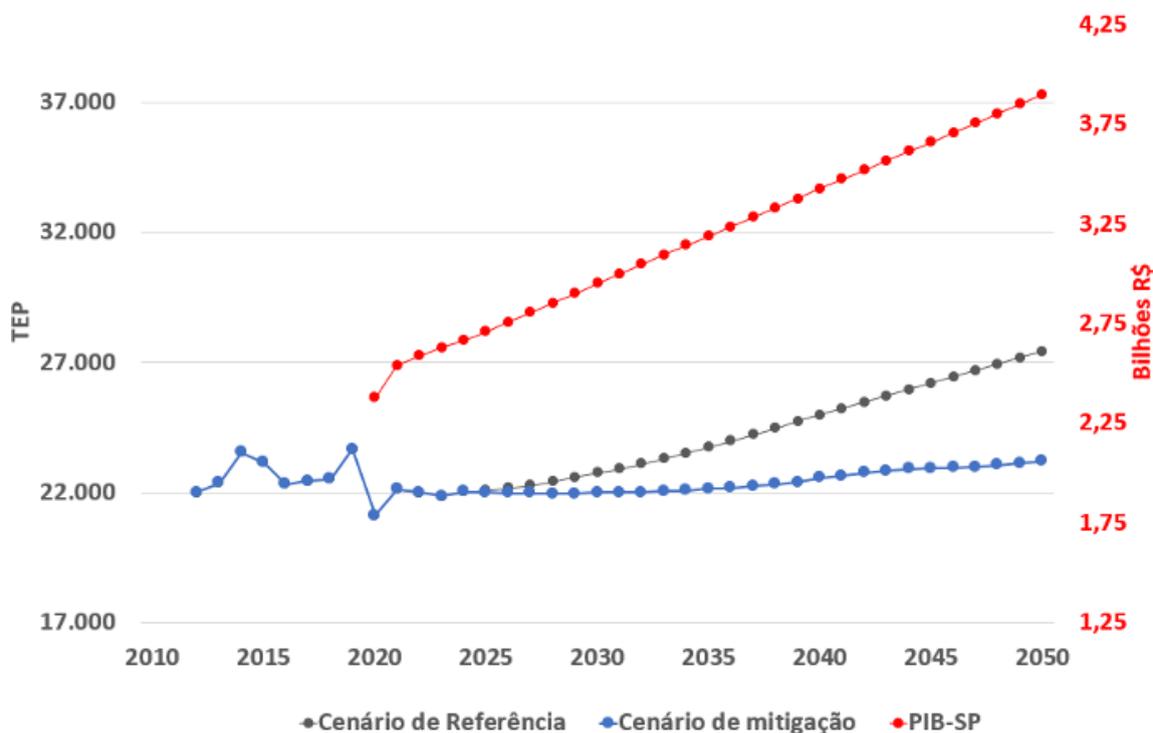
No setor de transporte, estima-se, no cenário mitigação, um consumo energético de  $25,4 \cdot 10^6$  tep, em 2050 frente ao consumo atual de  $21,8 \cdot 10^6$  tep em 2023, representando uma elevação de 16,5%.

Por outro lado, quando comparado com o cenário referência, i.e., sem a implementação do Plano, avalia-se que deve haver um consumo 7,22% menor em

2050 para o cenário mitigação. Essa redução decorre da maior utilização de energéticos renováveis, e /ou de menor intensidade de carbono, na matriz do transporte, em especial no modal rodoviário.

Finalmente, a Figura 6- Demanda Total dos Transportes x PIB no ESP a seguir apresenta a Demanda Total dos Transportes em função do PIB para o Estado de São Paulo, no horizonte de estudo.

Figura 6- Demanda Total dos Transportes x PIB no ESP

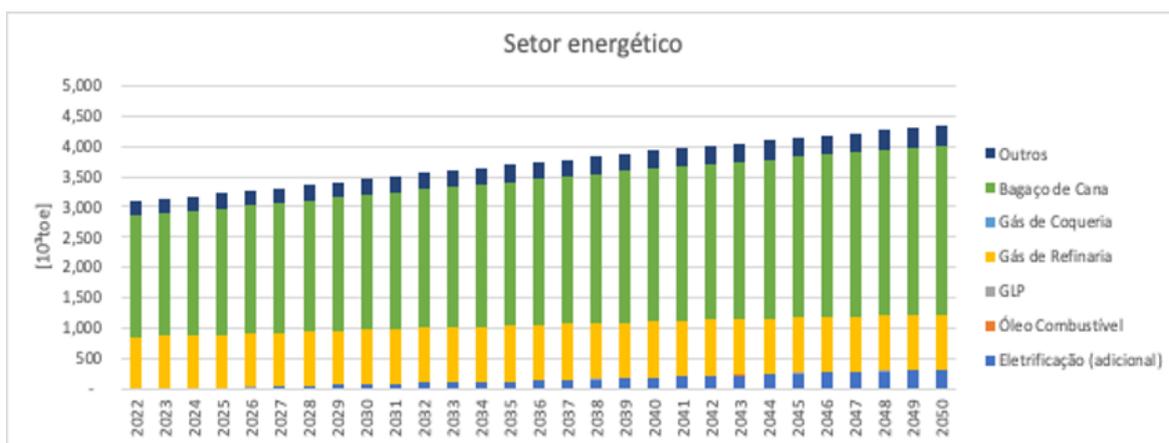


### Setor de Energia Térmica e Combustíveis

O setor energético deve apresentar uma relevante expansão na demanda térmica ao longo do horizonte de planejamento (

Figura 7- Demanda térmica no setor energético), passando de 3,1 mil TOEs, em 2022, para 4,3 mil TOEs, em 2050, isto é, um crescimento de 40,8% (crescimento anual médio de 1,23%) no período.

Figura 7- Demanda térmica no setor energético



Em 2022, as principais fontes para o setor eram o bagaço de cana com 65% e o gás de refinaria com 28%. Em 2050, devido à estrutura do próprio setor e seus centros de transformação, essa participação deve se manter similar, com o bagaço de cana respondendo por 65% e o gás de refinaria por 21%. A eletrotermia avançará no setor e a eletrificação dos processos térmicos ganhará 7% de participação de mercado. Nesse contexto, a demanda por combustíveis mais sustentáveis, em particular o etanol, desempenha um papel na matriz térmica setorial. O crescimento da produção de etanol, no horizonte de 2050, implica em um crescimento no uso de bagaço de cana no setor energético.

### Considerações finais

O Plano apresenta soluções do setor energético de SP para a redução de emissões de GEE, contribuindo para a diretriz *Race to Zero* no Estado e para uma visão de futuro atenta às tendências 4Ds (Digitalização; Descarbonização; Descentralização; Diversificação). Do lado consumo, as soluções contemplam um forte investimento em eficiência, medições inteligentes, recursos integrados, GD/hibridização e eletrificação.

Pelo lado da oferta, há também investimentos em eficiência e soluções inteligentes que contemplam hibridização, soluções de armazenamentos, gestão de recursos distribuídos e tecnologias de mitigação como a captura de carbono associados a fontes menos intensivas em energia. Todavia, a grande mudança estrutural vislumbrada se dá no segmento de transporte, onde há uma alteração significativa na composição da frota, gerando um grande desafio para a gestão, em especial porque parte desta mudança depende da decisão do consumidor.

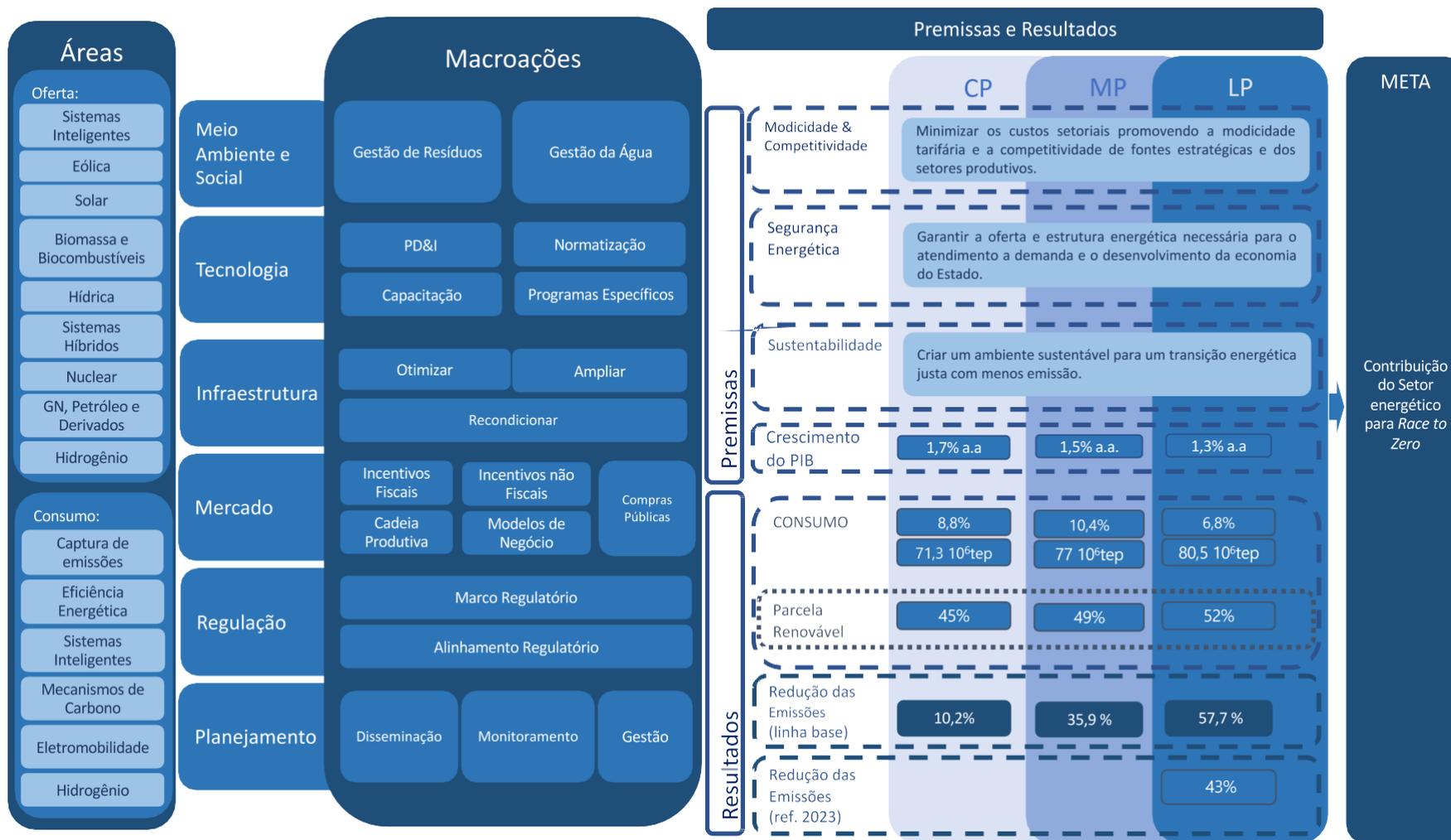
As ações preconizadas no Plano visam criar um mercado a novas tecnologias, com segurança, acelerando de forma importante a curva de aprendizado de tecnologias ainda em desenvolvimento, o que requer atuação em todos os eixos estratégicos, desde o PD&I, normatização e capacitação da mão de obra, até a elaboração de novo marco regulatório, refinamento de incentivos e compras públicas para acelerar a escalabilidade e reduzir custos no futuro.

Com atenção à diretriz *Race to Zero*, o biogás e o GN com captura de CO<sub>2</sub> tem um papel fundamental no sentido de reduzir emissões, sem comprometer a segurança energética do Estado.

Por conseguinte, o Plano teve um forte foco na biomassa e no GN com soluções mitigadoras, incluindo a participação, com menor destaque, do hidrogênio de baixo carbono e combustíveis sintéticos em geral. Pode-se observar na Figura 8 - Roadmap das ações e políticas de descarbonização do setor de energia do Estado de São Paulo, um resumo de todo o estudo. Do lado esquerdo são mostradas as áreas contempladas e cenarizadas nas projeções e alinhados aos eixos estratégicos e subsequentes macroações trabalhadas no Plano de Ação. Do lado direito a figura apresenta as premissas gerais que direcionaram todo o estudo, sinteticamente os 3 pilares (modicidade; segurança; e sustentabilidade) e o crescimento do PIB.

Assim, o PEE 2050 RtZ deverá contribuir, até 2050, com redução de 43% das emissões de GEE atuais do setor energético ou se comparado a uma linha de base onde nenhuma ação fosse tomada, uma redução de 49% em 2050.

Figura 8 - Roadmap das ações e políticas de descarbonização do setor de energia do Estado de São Paulo.



Fonte: elaboração própria

## Transição Energética e o requisito de sustentabilidade

Os acordos internacionais como o Protocolo de Montreal (1989) e a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (1992), dos quais o Brasil é signatário, são marcos que ratificam o desejo global de se promover um desenvolvimento justo e sustentável e que, por sua vez, incitaram ações a nível nacional e local.

Tais ações geraram uma série de informações e documentos que visam apoiar a definição de estratégias de descarbonização da economia brasileira, adaptação às mudanças climáticas e adoção tecnológica para neutralidade de emissões (McKinsey, 2009) (MMA, 2016); (MCTIC, 2017); (FBMC, 2019)). De forma geral, tais documentos, em conjunto com avaliações e propostas internacionais (IEA, 2021) (IEA, 2022) (WEF, 2021) versam sobre o tema e contribuem para o desenvolvimento do plano de energia com a seguinte temática:

- **Setor de energia:** deslocamento de fontes não renováveis por fontes limpas, eficiência energética, GD com fontes renováveis, combustíveis avançados, uso eficiente da energia, redes elétricas eficientes;
- **Indústria:** eficiência energética, eletrificação de processos, combustíveis renováveis, hidrogênio de baixo carbono como vetor energético, reaproveitamento térmico, políticas de incentivo a modernização do parque industrial, sistemas de cogeração via reaproveitamento de voláteis e energia térmica;
- **Transportes:** eletrificação (veículos elétricos e com célula de combustível), uso do Hidrogênio como combustível e vetor energético, veículos mais eficientes, combustíveis renováveis, logísticas que tornem o consumo de combustível otimizado, incentivo ao transporte de massa, incentivo ao uso de transportes limpos, como bicicletas, desenvolvimento de redes de abastecimento de veículos elétricos e movidos a hidrogênio;
- **Edificações:** construções de baixa pegada de carbono e uso do conceito de eficiência energética para os sistemas de iluminação e ar-condicionado;
- **Infraestrutura:** políticas de incentivo à resiliência, adaptabilidade e à mitigação de riscos ambientais; desenvolvimento de centros de inteligência climática; sistemas eficientes para o tratamento de águas e efluentes; tratamento adequado de resíduos e produção de biogás; iluminação pública

de baixo consumo de energia; gestão da infraestrutura de transportes e de redes elétricas inteligentes;

- **Balanco de emissões:** aumento das áreas de absorção de carbono por meio de políticas de reparação e conservação de florestas e por meio de políticas para a promoção da sustentabilidade nas atividades agrícolas e agropecuárias; estratégias para aprimorar a qualidade das projeções climáticas e de emissões de GEE; projetos para a integração de dados para o monitoramento e observação de impactos da mudança do clima;
- **Economia:** políticas voltadas às finanças verdes e aos mecanismos de mercado de carbono.

Conforme exposto na

Tabela 1, os requisitos de sustentabilidade e a transição energética tiveram repercussão sobre as iniciativas no Estado de São Paulo. As ações iniciais do Estado consideram o levantamento do histórico de dados climáticos, dados dos setores florestal e agropecuário, informações sobre a oferta e demanda de energia, histórico de emissões, dados socioeconômicos, além de políticas de adaptação, resiliência, riscos climáticos e de incentivo ao uso de tecnologias limpas por parte dos setores da economia.

Tabela 1. Produtos do PEMC

	Documento	Conteúdo	Contribuição ao Plano
1	Acordo ambiental de São Paulo (2019) (sucede o Protocolo climático do Estado de São Paulo - 2015)	Ação do governo de São Paulo para incentivar a economia local a divulgar dados sobre emissões de GEE e dados sobre a existência de indicadores de vulnerabilidade e de adaptabilidade. O incentivo vem na forma de políticas públicas para a aquisição de tecnologias limpas que beneficiem as empresas com maior pontuação no protocolo	Subsídio ao modelo de iniciativas econômicas e políticas para elevar a participação da sociedade no processo de mitigação das emissões de GEE
2	Inventário oficial paulista (sucede o documento Comunicação Estadual)	Contém o inventário de emissões de gases de efeito estufa do Estado de São Paulo que pode ser acessado via Plataforma SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). Documento de referência para vários setores da economia.	Permite avaliar o montante de CO <sub>2</sub> a ser capturado da atmosfera, por setor <sup>11</sup> .
3	Programa Municípios Paulistas Resilientes (sucede o Plano)	Programa contextualizado no apoio do governo Alemão ao governo do Brasil para a implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima	Subsídio às ações socioeconômicas e tecnológicas para a adaptação

	participativo de adaptação aos efeitos de mudanças climáticas e os Cenários Ambientais 2020)	(ProAdapta). Apresenta os pontos de vulnerabilidade ambiental, socioeconômico e de saúde da população do Estado de SP, bem como as ações de adaptabilidade do Estado em relação às mudanças climáticas ditas inevitáveis. O plano fornece subsídio para mitigar ao máximo o avanço das mudanças climáticas sobre a sociedade nos setores da economia	dos municípios aos Estados climáticos irreversíveis
4	Plano Paulista de Agricultura de Baixo Carbono - 2016 (Plano ABC-SP)	Tem por objetivo auxiliar o Estado de São Paulo a consolidar uma economia de baixa emissão de carbono no setor da agricultura. Esse plano é compõe a resposta brasileira ao compromisso realizado no âmbito da COP-15.	Subsídio ao desenvolvimento de ações de descarbonização no uso da terra, mudança no uso da terra e florestas
5	Plano de transportes	Documento que apresenta as diretrizes básicas e as ações estratégicas que devem ter sido desenvolvidas pelo governo do Estado para atingir a meta de redução das emissões de CO <sub>2</sub> em 20% até o ano de 2020, tendo por base as emissões de 2005.	Subsídio ao desenvolvimento de ações de descarbonização no setor de transportes
6	Projetos de biogás no Brasil	Ocorre no âmbito do MDL do Protocolo de Quioto. No contexto SP, tem por objetivo promover a diminuição do uso de combustíveis fósseis e fomentar a entrada de insumos renováveis na geração de energia.	Subsídio às ações de descarbonização do setor de energia para o lado da oferta
7	Informações na área de energia no Estado de SP	Documento com dados sobre as estimativas de emissões de GEE pelo setor de energia, pelos lados da oferta e demanda, bem como os anuários estatísticos do setor <sup>[2]</sup> e as projeções para o ano de 2035.	Informações complementares ao documento [2]
8	Planos setoriais de saúde, agricultura de baixo carbono e recursos hídricos	Saúde: apresenta uma avaliação dos impactos das mudanças climáticas na saúde da população. O estudo leva em consideração a influência que as condições ambientais, sociais e dos sistemas de saúde nos resultados. Agricultura: tem por objetivo ajudar o país a alcançar os objetivos de emissões do setor da agricultura, firmados junto à comunidade internacional, por meio da adoção de tecnologias <sup>[3]</sup> . Recursos hídricos: instrumento de gestão que visa orientar a implementação de políticas de recursos hídricos do Estado. Considera diretrizes e ações para a proteção e conservação das águas, com foco na sustentabilidade hídrica	Subsídio ao desenvolvimento de ações sociais para o enfrentamento das possíveis doenças causadas pelas mudanças climáticas irreversíveis; subsídio ao planejamento energético do lado da oferta
9	Inventário florestal	Consiste no mapeamento da vegetação nativa do Estado de São Paulo	Subsídio ao cálculo da neutralidade dos GEE

			considerando as ações do Plano
10	Mapeamento de riscos de movimento de massa e inundações	Documento contendo dados sobre Mapeamento de Riscos de Movimentos de Massa e Inundações de 11 municípios da região Leste e Sudeste da Região Metropolitana de São Paulo.	Informações complementares aos documentos [3] e [4]
11	Projeto Trajetória de descarbonização	O documento apresenta o potencial de redução de gases de efeito estufa por meio de 12 ações de descarbonização dos setores da economia do Estado de São Paulo. Por meio dessas ações presume-se mitigar em até 30% as emissões de GEE. Além disso, a segunda fase do documento visou desenvolver uma calculadora que permitiu avaliar o alcance das respectivas ações	Subsídio à formulação das ações, diretrizes e políticas do plano atual
12	Campanhas Race to zero e Race to resilience	As respectivas campanhas globais da ONU/UNFCCC foram aderidas pelo Estado de São Paulo por meio do Decreto nº 65.881 (20.07.2021) como impulso para o desenvolvimento de uma economia descarbonizada. Os planos de descarbonização emergentes dessa associação devem suportar as políticas do país frente ao Acordo de Paris.	Impulso político em torno da mudança para uma economia descarbonizada. Incentivo às empresas, cidades, regiões e investidores ajudem o Estado a cumprir as metas de Paris
13	Plano de ações climáticas do Estado de SP	O documento constitui um roteiro para o desenvolvimento do Plano de Ações Climáticas do Estado de São Paulo, PAC2050, resumido em cinco eixos: i) Eletrificação acelerada; ii) Combustíveis avançados; iii) Eficiência sistêmica; iv) Resiliência e soluções baseadas na natureza e v) Finanças verdes e inovação.	Base técnica e política para o desenvolvimento do plano

Fonte: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/pemc/>

Os respectivos dados devem subsidiar os cenários macroeconômicos e de emissões do plano de energia. Por outro lado, as políticas devem subsidiar o desenvolvimento de metas, diretrizes e ações para o enfrentamento das questões climáticas irreversíveis, considerando, dentre outras questões, a segurança e a saúde da população.

A partir de 2017 o Estado de São Paulo passou a adotar medidas de mitigação de emissões para o cumprimento das metas de emissões vigentes, originados em acordos e protocolos internacionais. Emergem, então, conteúdos que devem subsidiar o desenvolvimento de políticas e ações de descarbonização dos setores prioritários do Estado como o de energia e o de transportes, cujo foco recai sobre o aumento da eficiência de sistemas e sobre a mitigação e controle das emissões de gases de efeito estufa.

Com a adesão às campanhas Race to Zero e Race to Resiliense o Estado passou a aderir às políticas de emissões neutras e de sustentabilidade das ações de descarbonização.

Nesse contexto, o produto gerado: Plano de Ações Climáticas do Estado de São Paulo (PAC) do PEMC (PAC2050/SEEG, 2022) emerge como uma das referências principais ao desenvolvimento do plano de energia.

Este documento, em adição às políticas apontadas no âmbito do PAC, considera o desenvolvimento de ações e políticas de descarbonização do Estado em cinco eixos: i) Eletrificação acelerada; ii) Combustíveis avançados; iii) Eficiência sistêmica; iv) Resiliência e soluções baseadas na natureza; e v) Finanças verdes e inovação.

Sobre o eixo Eletrificação acelerada, o conteúdo contribui com o desenvolvimento de ações voltadas ao incentivo do uso da energia fotovoltaica a fim de deslocar parte da oferta de energia proveniente de fontes não renováveis. Deve subsidiar, também, o desenvolvimento de políticas para a eletrificação do setor Transportes e para a descarbonização dos setores residencial, comercial, público e industrial

O eixo Combustíveis avançados subsidia ações e políticas voltadas ao uso de combustíveis renováveis (com ênfase ao biometano e ao etanol) e à introdução do hidrogênio de baixo carbono como vetor energético no processo de descarbonização dos setores da economia.

Dentre as ações e políticas, esse eixo deve subsidiar o desenvolvimento de tecnologias para a geração de hidrogênio de baixo carbono a custos competitivos.

O uso do hidrogênio como vetor de descarbonização deve perpassar os setores de transportes e industrial, a fim de deslocar o consumo de combustíveis fósseis. Nesse contexto, espera-se que a fonte solar fotovoltaica, o biogás e a hidroeletricidade façam parte do agregado tecnológico para a produção do insumo.

O eixo eficiência sistêmica deve subsidiar o desenvolvimento de ações e políticas voltadas à adesão de modais elétricos e à logística dos insumos energia elétrica e hidrogênio nos setores da economia. Esse eixo deve subsidiar, também, o desenvolvimento de ações e políticas referentes ao consumo eficiente da energia em outros setores como o industrial (medidas de eficiência energética).

O eixo Resiliência e soluções baseadas na natureza deve subsidiar políticas de restauração e conservação de florestas, políticas voltadas ao uso e manejo da terra com foco na sustentabilidade, sistemas agroflorestais e florestas multifuncionais, além de subsidiar políticas para a mitigação de riscos climáticos.

Por fim, o eixo Finanças verdes e inovação deve fornecer subsídio ao desenvolvimento de ações e políticas de incentivo à economia verde.

Tendo em vista o tratamento dessas questões, é factível que o plano de energia considere o desenvolvimento de políticas de incentivo a participação da CTI local na busca por soluções de descarbonização setorial economicamente viáveis, bem como incentive a participação do setor industrial na cadeia de inovação dessas soluções.

De forma geral, os produtos da PEMC devem contribuir com o desenvolvimento do plano de energia por meio dos seguintes macro temas:

- Políticas voltadas aos conceitos de resiliência, adaptação e enfrentamento do risco climático;
- Dados para o desenvolvimento de cenários de emissões e de demanda e oferta de energia;
- Políticas de incentivo ao uso de tecnologias limpas; e
- Políticas e ações para a descarbonização dos setores da economia, considerando as questões socioeconômicas.

Sobre as políticas climáticas municipais, pode-se observar na

Tabela 1, já apresentada, um resumo do plano de ação climática do município de São Paulo. O respectivo conteúdo deve subsidiar as políticas e ações de descarbonização do plano de energia, com foco no município.

Basicamente, são apresentadas medidas e políticas voltadas ao conceito de cidade resiliente e adaptada, políticas de revitalização da infraestrutura para mitigar os riscos climáticos, políticas voltadas à recuperação e conservação de áreas verdes e florestas, além de políticas para a descarbonização de setores.

Sobre a descarbonização de setores, o estudo oferece subsídio ao desenvolvimento de políticas com foco em eficiência energética de edificações, processamento de resíduos, uso de fontes renováveis, melhoria e ampliação dos sistemas de transportes coletivos, incentivo ao uso de bicicletas, uso de veículo com emissões nulas nas frotas do governo, além do desenvolvimento de normas, padrões e indicadores de eficiência energética para os setores da economia.

Haja vista os compromissos estabelecidos, as ações nacionais e estaduais, bem como as propostas de caminhos para a neutralidade de emissões, o presente Plano Estadual de Energia 2050 de São Paulo adotou a meta de atingir o balanço nulo das emissões até 2050, para o conjunto global das atividades do Estado de São Paulo, a partir da

definição de um roadmap que será apresentado como conclusão dos trabalhos neste documento.

---

## Eixos Estruturantes para o PEE/SP 2050

---

Os pilares da política energética indicada neste documento são os seus propósitos (normalmente dois ou três, no máximo), que sustentam o pensamento estratégico no processo de sua construção. Os propósitos devem ser gerais e abrangentes o suficiente para que sejam atemporais e transcendam governos, tornando a questão energética, uma política de Estado e não governamental.

Historicamente, os pilares do setor de energia nacional são: a modicidade tarifária (competitividade), a segurança energética e a sustentabilidade. Esses três pilares contribuem para embasar as políticas emanadas do poder público no Brasil no que concerne à energia.

O primeiro pilar da modicidade e competitividade visa minimizar os custos setoriais, promovendo uma tarifa módica no mercado regulado e preços competitivos no mercado livre, através da competitividade por preço e qualidade entre as fontes estratégicas e dos setores produtivos do Estado de SP.

No contexto do PEE/SP 2050, a busca por competitividade, que incorpora a modicidade tarifária e preços competitivos, deve ser vista objetivando um equilíbrio do hoje com o futuro. Isto é, investimentos em tecnologias iniciais podem ser mais caros hoje, porém no futuro podem trazer menor impacto ambiental e social, além de maior garantia de atendimento da demanda a menores preços.

O pilar de segurança energética, por sua vez, compreende a necessidade de atendimento da demanda, por meio do planejamento e execução de ações de provimento de infraestrutura e otimização do sistema.

O último pilar visa criar um ambiente sustentável para uma transição energética justa e com menos emissão. A sustentabilidade, fator fundamental para o desenvolvimento da sociedade moderna, deve contemplar a universalização do acesso e o equilíbrio das ações sob o tripé ambiental, social e econômico, levando em conta, inclusive, a maior necessidade de recursos para expandir e operar o sistema na presença de fontes energéticas renováveis, porém, não controláveis.

Como a energia impacta diretamente toda a economia, estes três pilares, Modicidade, Segurança e Sustentabilidade, fundamentam a busca por energia mais competitiva, módica e segura, de forma a garantir o atendimento à demanda, respeitando as questões sociais, ambientais e econômicas.

O passo seguinte de um pensamento estratégico são as definições das diretrizes, que podem ser temporais e devem refletir o pensamento do governo em exercício.

O PEE/SP, com horizonte de análise até 2050, apresenta resposta no campo energético ao objetivo do PAC de “Alcançar a neutralidade de emissões líquidas de gases de efeito estufa até o ano de 2050”.

Para tanto, o PEE/SP 2050 adota o objetivo do PAC como orientador para sua diretriz principal que considera: A contribuição do setor de energia para o Estado alcançar a neutralidade de emissões líquidas de GEE até 2050. Esta diretriz em conjunto com os pilares supramencionados, compõem a estrutura estratégica do PEE/SP 2050.

A adoção dessa diretriz no campo energético é fundamental para que se possa atingir a neutralidade de carbono no Estado de São Paulo. Observe-se que no ano de 2019<sup>5</sup>, 54% das emissões de CO<sub>2</sub> no Estado de São Paulo emergiram do setor de energia (considerando o transporte e a energia propriamente dita em conjunto), 23% foram geradas no setor agropecuário, 11% decorrem das atividades de processamento de resíduos, 10% são provenientes do uso da terra e da mudança e uso de terras e florestas (UTMUTF) e 3% das emissões são oriundas dos processos industriais (SEEG, <https://plataforma.seeg.eco.br/>, 2022) (PAC2050/SEEG, 2022).

Fundamentado no direcionamento dos pilares e das diretrizes apresentadas, além de considerar o contexto do Estado de São Paulo, foram definidos inicialmente, na primeira fase do projeto, 17 áreas temáticas<sup>6</sup>, descritas a seguir, que consubstanciaram o relatório da Fase 1 do projeto.

1. Visão de futuro tecnológico / Tendências em temas disruptivos
2. Cenários econômicos, considerações sobre a produtividade da economia e cenários de oferta e demanda dos energéticos de interesse
3. Cenários de oferta e demanda dos energéticos de interesse
4. Biomassa, Biocombustíveis e Resíduos Sólidos Urbanos
5. Disponibilidade hídrica e usos múltiplos
6. Eólica “Offshore”

---

<sup>5</sup> Optou-se por apresentar os dados do ano pré pandemia para caracterizar um cenário construído em um contexto econômico normal, sem as influências das ações de contenção da pandemia.

<sup>6</sup> Nesta segunda fase, os resultados do trabalho destes 16 grupos foram complementados com análise qualitativas e apresentados no formato de 9 tópicos, cada um correspondente a um caderno: Cenários macroeconômicos; Demanda e balanço energético; Oferta de energia elétrica; Gás natural e biometano; Transporte; Hidrogênio; Mudanças climáticas; Emissões de gás de efeito estufa (GEE); e Mecanismos de mercado para crédito de carbono.

7. Usinas Híbridas
8. Eletromobilidade
9. Mecanismos de Mercado
10. Hidrogênio Verde e novas gerações de combustíveis
11. Balanço de Emissões
12. Mudanças Climáticas
13. Gás natural, petróleo e derivados
14. Eficiência energética
15. Resposta da Demanda e Redes Inteligentes
16. Resposta da Demanda e Recursos energéticos distribuídos
17. Energia nuclear – pequenas centrais nucleares

Essas 17 áreas temáticas, por sua vez, trabalharam norteadas por 6 eixos estruturantes para identificar as ações necessárias que permitem traçar a trajetória para se migrar da posição atual detalhada no diagnóstico e alcançar a visão de futuro e as projeções calculadas de consumo energético e resultados de emissões evitadas, com base nas premissas adotadas na cenarização. Os eixos estruturantes que balizam a construção do plano de ações estratégicas são:

1. **Planejamento:** Ações, de característica de gestão, que permitam construir uma visão de futuro com diretrizes, metas e direcionamentos de áreas específicas e a estratégia ou planos para atingir este futuro, além de monitorar o caminho a ser percorrido e disseminar a informação ao público em geral;
2. **Tecnologia:** Ações de P&D, capacitação de mão de obra, normatização e programas específicos que viabilizem e acelerem rotas tecnológicas que favoreçam a redução de emissões na visão de futuro idealizada;
3. **Infraestrutura:** Ações que promovam a otimização e ampliação da infraestrutura básica para assegurar as propostas de cada áreas temáticas;
4. **Socioambiental:** Vale ressaltar que a visão Socioambiental é parte do pilar sustentabilidade que norteia todos os outros eixos, portanto aqui limita-se apenas as ações de gestão de recursos naturais, resíduos e impactos;
5. **Mercado:** Ações de governança da Secretaria que promovam o mercado seja por meio de incentivos fiscais, não fiscais, compras públicas, a cadeia produtiva e novos modelos de negócios observando e, quando necessário, se adaptando aos novos vetores de transformação do setor elétrico (descarbonização, digitalização, descentralização e diversificação);
6. **Regulação:** promover um ambiente regulatório favorável para que as tecnologias e novos modelos de negócios planejados possam se viabilizar. Destaque-se ainda, a relevâncias dos eixos legal e regulatório, que formam a

---

estrutura capaz de viabilizar a materialização do planejamento, agregando os sinais adequados para que a livre concorrência possa receber os sinais e incentivos corretos, rumo à expansão sustentada da oferta de energia.

# Metodologia de Desenvolvimento

---

A construção do plano de ações para enfrentamento dos desafios trazidos pelas mudanças climáticas no setor de energia do Estado de São Paulo segue como base a metodologia *foresight*, com subdivisão em quatro etapas: Planejamento inicial, Diagnóstico, Visão de Futuro e Posicionamento (CGEE, 2017).

A primeira etapa, Planejamento Inicial, busca definir as informações norteadoras do pensamento estratégico, dividir temas e criar um processo de integração entre os grupos alinhados aos eixos estratégicos. Nesta primeira etapa, são definidos os pilares da política energética, a diretriz geral, os eixos estruturantes e o quadro conceitual que norteia o desenvolvimento do estudo. Em capítulo inicial específico, focado nos eixos estruturantes, apresenta-se de forma breve as informações balizadoras para construção do pensamento estratégico.

A segunda etapa do trabalho, compõe-se do Diagnóstico. Nele são levantadas as informações internas e externas ao Estado de SP, referentes à situação atual e as potencialidades e desafios futuros para cada tema elencado na etapa anterior. Portanto, são levantados dados técnicos, estruturais, programas, planos e ações do governo, de forma a identificar pontos que possam ser trabalhados na construção da estratégia, objetivando definir ou orientar o estabelecimento de visão geral sobre cada tema.

Na terceira etapa, Prospecção e Visão de Futuro, serão detalhadas e estudadas com maior propriedade, as tendências e estratégias de futuro já descritas. Nesta etapa são definidas as premissas e realizadas as primeiras projeções consolidando a visão de todos os segmentos estudados.

A quarta etapa, é o Posicionamento. Neste ponto do desenvolvimento do trabalho, são consolidadas e analisadas as metas propostas, que no caso do PEE 2050 RtZ, resultam do cálculo e acompanhamento do balanço de emissões, a partir do qual se assegura quanto cada segmento pode contribuir com o Race to Zero e Race to Resilience.

Por fim, são consolidados as estratégias e o processo de monitoramento para alcançar a Visão de Futuro, bem como suas projeções, com base nas análises realizadas no Diagnóstico. Sintetizados no Roadmap (plano de ações) segmentado por eixo estruturante.

O plano adota um conjunto de métodos e ferramentas que inclui dados secundários e primários. No primeiro grupo de dados, o trabalho consiste em levantamento

bibliográfico de bases científicas e não científicas, mas de preferência, oficiais e públicas.

O segundo grupo de dados, o levantamento utiliza a metodologia participativa: reuniões, workshops e/ou pesquisas estruturadas ou semiestruturadas, que possam agregar ao processo, envolvendo stakeholder setoriais.

Para este segundo grupo foram realizadas reuniões de grupo (workshops), reuniões bilaterais com stakeholder setoriais específicos, além das reuniões de acompanhamento do Governo. Por fim, a versão completa das quatro etapas concluídas passa por nova análise do governo, seguida da análise da sociedade, por meio da consulta pública.

Vale ressaltar que a metodologia participativa propõe formatos para levantar informações de stakeholders setoriais impactantes no processo de forma rápida e de menor custo, mas é fundamental deixar claro que este formato não representa estatisticamente uma amostra do universo do Estado. Por este motivo existe a etapa de consulta pública que então permite que todas e todos interessados tenham acesso, uma vez que a documentação concernente estará disponível em sistema de livre acesso.

As metodologias específicas de cálculos adotadas em cada segmento, tendo em vista suas particularidades, são descritas na sequência.

Conforme já destacado anteriormente, o plano de energia foi construído com base em três pilares da política energética: modicidade, segurança e sustentabilidade, sendo desenvolvido em duas fases, a primeira, com enfoque qualitativo e de pesquisas, encerrada ao final de 2022 e esta segunda fase, onde são quantificadas as grandezas energéticas e as respectivas pegadas de carbono do cenário de mitigação das emissões cotejada com o cenário base, ressaltando-se que a quantificação realizada nesta segunda etapa condiciona o plano de expansão apresentado.

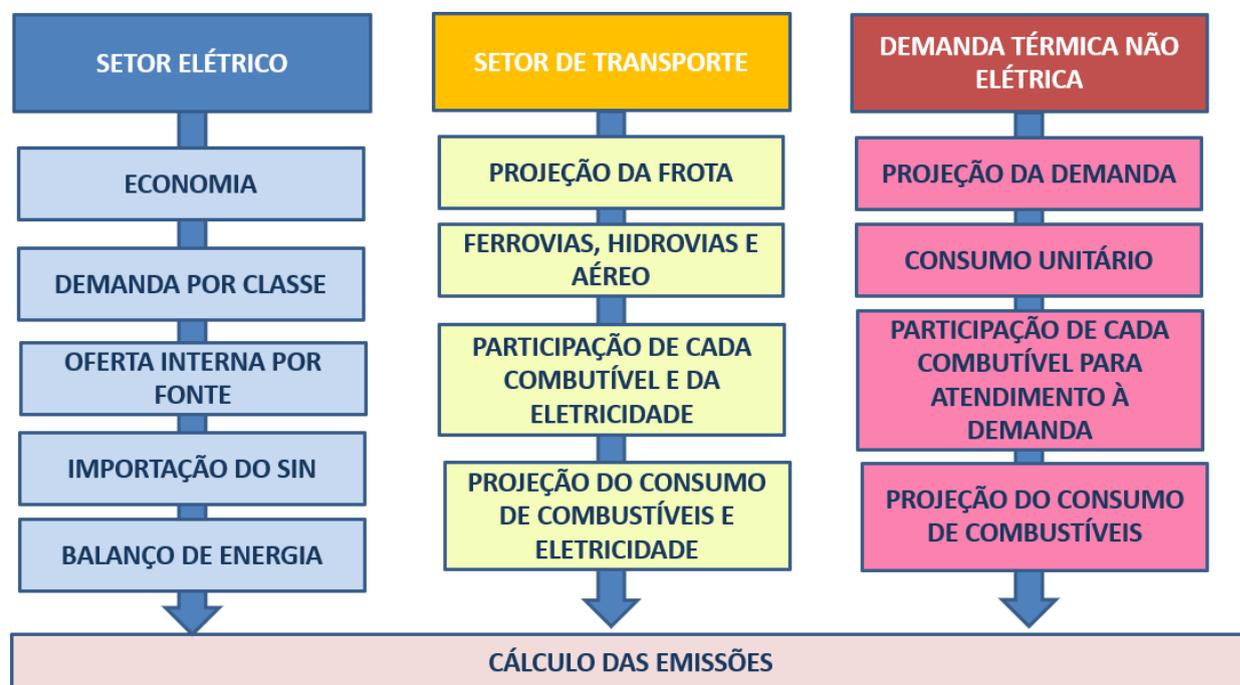
A estrutura dos trabalhos foi estabelecida sobre 3 setores: elétrico, transportes e os energéticos de forma geral. Na Figura 9 são apresentadas as frentes de atuação que nortearam a metodologia e o desenvolvimento das atividades, destacando-se que os cenários para a evolução da economia, elaborados pela equipe da LCA Consultoria Econômica, formaram a base de todas as projeções no âmbito do plano, garantindo-se assim, a coerência de todas as projeções, seja da demanda por eletricidade, demanda térmica não elétrica ou projeção da frota veicular.

O cálculo das emissões foi elaborado a partir da expectativa do balanço de eletricidade do Estado de São Paulo, considerados os fatores de emissão das fontes internas de

eletricidade e a emissão média da geração do sistema interligado, para a parcela de importação de eletricidade pelo Estado de São Paulo.

Para o setor de transportes, as emissões foram calculadas com base na metodologia desenvolvida e aplicada no PAC 2050 (PAC2050/SEEG, 2022), considerando-se a evolução na eletrificação da frota veicular, assim como potencial de biogás e hidrogênio de baixo carbono. Para a demanda térmica, considerou-se as emissões esperadas para o consumo projetado de cada combustível que compõe a matriz do mercado consumidor, levando-se em conta a eletrificação e os ganhos de eficiência na utilização de energéticos fósseis.

Figura 9 - Frentes de atuação para elaboração do PEE/SP 2050



Para o cálculo da demanda de eletricidade foram considerados as variáveis representadas. Na Figura 10, pode-se observar a conexão entre as várias frentes de trabalho para elaborar-se a projeção da demanda de eletricidade.

Para as demandas energéticas (consumo não elétrico) e para o setor de transportes, a metodologia utilizada no cálculo das demandas está apresentada na

Figura 11.

A metodologia empregada na determinação da quantidade de hidrogênio de baixo carbono a ser produzida no Estado de São Paulo (ESP) até o horizonte de 2050, partiu da situação atual (2022), considerando-se os principais setores que utilizam esse

combustível, bem como aqueles para os quais se projeta importantes demandas futuras.

Com relação à evolução temporal da produção e do consumo de hidrogênio no ESP, adotou-se três vertentes de análise, mostradas na Figura 12:

- I. O crescimento da produção e do consumo atual de hidrogênio de acordo com a evolução do PIB estadual.
- II. A introdução de novas aplicações e/ou a substituição de combustíveis fósseis no contexto energético estadual.
- III. A instalação de fábricas de hidrogênio e seus derivados (amônia, metanol, etc.) no ESP com a finalidade de exportação.

*Figura 10 - Metodologia para projeção da demanda de energia elétrica*

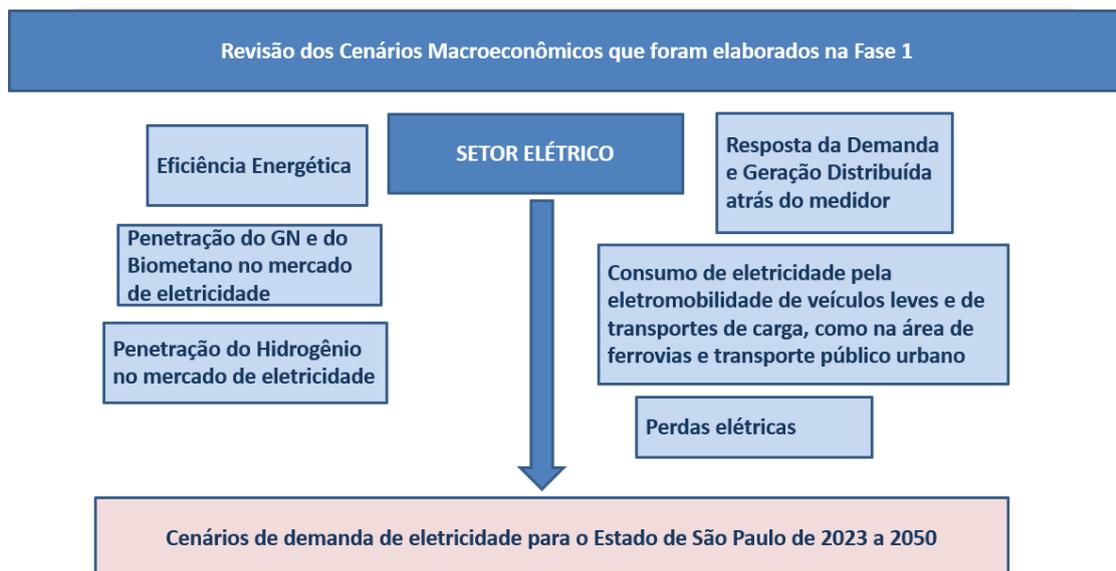


Figura 11 - Metodologia de cálculo das demandas do setor de transportes e de demandas térmicas

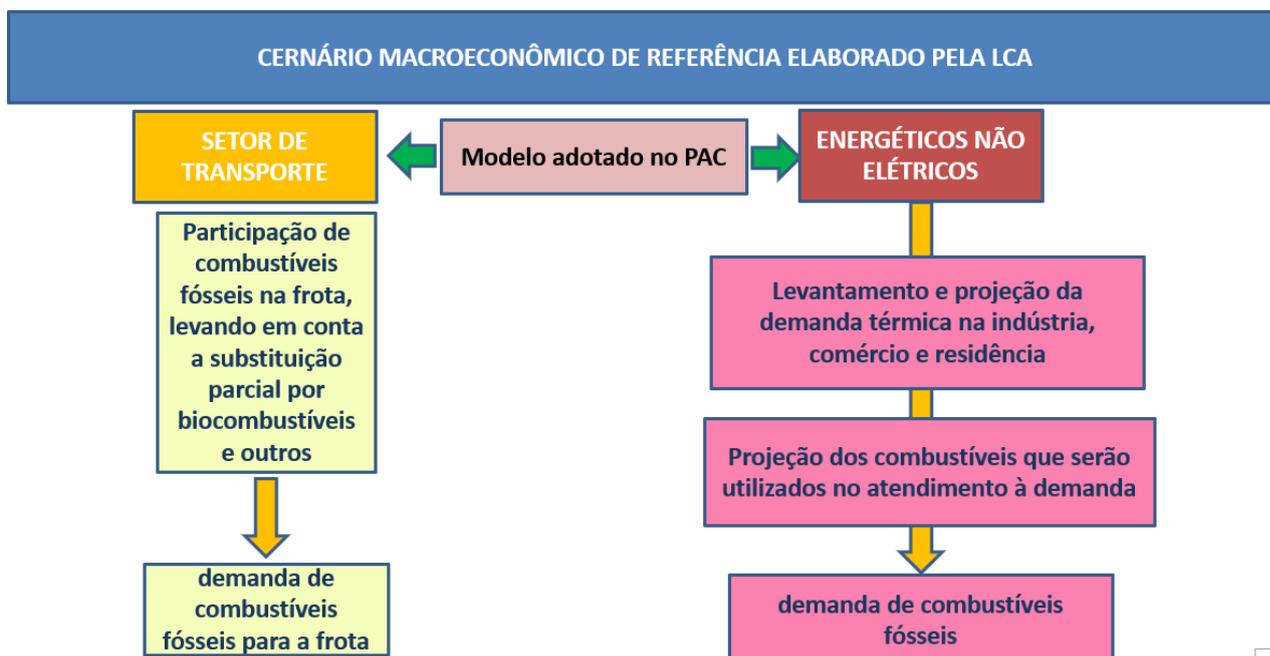
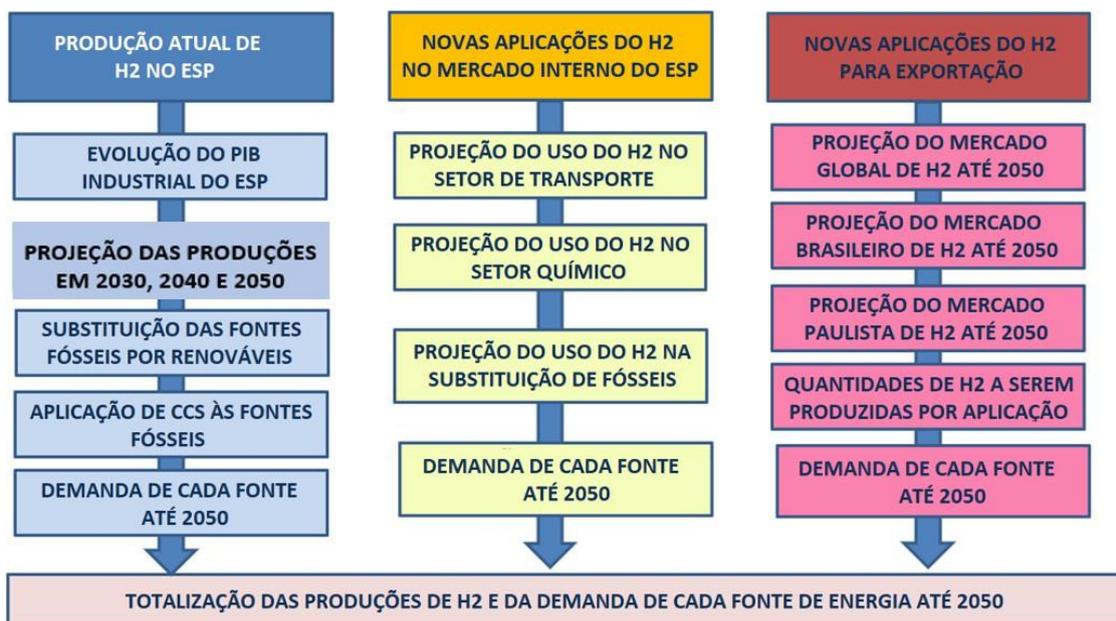


Figura 12 - Metodologia utilizada na determinação das quantidades de hidrogênio a serem demandadas no ESP



No primeiro caso, considerou-se o quadro atual de produção/consumo de hidrogênio no Estado. Para a evolução desse quadro, utilizou-se as projeções do PIB do setor industrial do ESP, conforme estabelecido neste relatório, considerando-se as perspectivas mundiais para o uso desse combustível, refletindo esta tendência ao nível nacional brasileiro e, em seguida, ao plano estadual.

Para analisar as vertentes de novas aplicações para o mercado interno, bem como novas aplicações para exportação, foram realizadas duas abordagens para a estimativa das quantidades de hidrogênio a serem produzidas no ESP até o horizonte de 2050: uma análise top-down e outra bottom-up.

Na segunda abordagem considerou-se as perspectivas das empresas do ESP em incrementar suas produções atuais para além do crescimento do PIB estadual e com o desenvolvimento de novos projetos e plantas de hidrogênio, chegando-se às estimativas para o Estado. As comparações entre essas abordagens proporcionaram um quadro mais sólido para as estimativas utilizadas no trabalho.

No caso da análise top-down, adotou-se um conjunto de premissas sobre o quadro atual do consumo de hidrogênio no âmbito global, nacional e estadual:

- Consumo mundial de hidrogênio (2022): 94 MtH<sub>2</sub>/ano (91 MtH<sub>2</sub>/ano em 2019)
- Consumo brasileiro de hidrogênio (2019): 0,4 MtH<sub>2</sub>/ano (0,44 % do consumo mundial)
- O ESP produz e consome atualmente cerca de 0,21 MtH<sub>2</sub>/ano (48 % do Brasil)
- Setores de consumo: petroquímico (76%); fabricação de amônia (19 %); outros (5 %)
- Fontes de energia utilizadas atualmente: gás natural (95 %); eletricidade da rede (5 %)
- Emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção/consumo: 2,3 MtCO<sub>2</sub>-eq/ano
- Perspectivas de evolução desse quadro: evolução no PIB industrial paulista

Para o cenário de 2050, foram adotados os objetivos e as metas estabelecidas em estudos e roadmaps de diferentes países:

- Consumo mundial de hidrogênio (2050): entre 320 e 530 MtH<sub>2</sub>/ano (DNV, 2022); (IEA, 2021b)
- Valores já anunciados pelos países (2050): 250 MtH<sub>2</sub>/ano
- Valor esperado para o Brasil (2050): 10 MtH<sub>2</sub>/ano (aprox. 3 % do mundial)
- A produção/consumo atual evoluirá de acordo com o PIB industrial do ESP
- Serão introduzidos novos empreendimentos de produção no ESP para:
  - (1) ampliação dos usos atuais como insumo químico;
  - (2) substituição de energéticos fósseis consumidos no estado;

- (3) introdução de novas aplicações do hidrogênio (transporte; geração de calor);
- (4) exportação de hidrogênio e seus derivados (amônia, metanol etc.).

Para os cálculos quantitativos acerca dos processos de produção e tecnologias de utilização do hidrogênio, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Reforma do gás natural (90% de metano): 3,5 kg GN/kg H<sub>2</sub> (4,6 m<sup>3</sup>/kg H<sub>2</sub>)
- Reforma do biometano: 3,2 kg CH<sub>4</sub>/kg H<sub>2</sub> (4,2 m<sup>3</sup>/kg H<sub>2</sub>)
- Eletrólise da água: 50 kWh/kg H<sub>2</sub> (30 bar)

Como fontes de energia para os processos de produção de hidrogênio, levando-se em conta a realidade atual e as perspectivas para o ESP, foram considerados os seguintes energéticos:

- gás natural;
- eletricidade: rede (majoritariamente hidráulica), solar fotovoltaica e eólica offshore;
- biomassas: biometano.

Para o cômputo das emissões de GEEs associadas aos processos de produção e utilização do hidrogênio, adotou-se os seguintes fatores (IEA, 2023):

- hidrogênio de reforma do gás natural sem CCS: 11 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>;
- hidrogênio de gás natural com CCS: 0,7 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>;
- hidrogênio de eletrólise com eletricidade da rede brasileira: 5 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>;
- hidrogênio de eletrólise com eletricidade solar e/ou eólica: 0,1 - 1 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>;
- Hidrogênio de biomassas: 1 - 5 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>.

# Mudanças Climáticas e seus Impactos

---

## Mudança climática em curso

Os impactos das mudanças climáticas causadas pelas atividades antrópicas associados aos da variabilidade natural do clima (como, por exemplo, os do fenômeno El Niño) constituem um dos maiores desafios a serem enfrentados, tanto na atualidade, quanto nos anos vindouros, uma vez que demandam preparação e respostas em todos os níveis de governança.

Nessa conjuntura, é de central importância a articulação de esforços para o planejamento de medidas que possam reduzir os impactos associados às variações na média de temperatura, precipitação, etc., como também nos riscos e danos dos eventos extremos afetando as áreas de energia e agricultura, que são totalmente dependentes das condições climáticas. Por exemplo, em 2021, o Brasil enfrentou uma das piores secas em 90 anos, levando a níveis críticos dos reservatórios das hidrelétricas do centro-sul do país (Bevacqua, Chaffe, Chagas, & AghaKouchac, 2021) (Cuartas, et al., 2022) (Freitas, et al., 2022).

Embora as ações de descarbonização para redução de riscos e impactos tenham aumentado globalmente, as medidas de adaptação ainda são insuficientes como se evidencia pelos casos observados em todas as regiões do planeta. No Brasil, vários episódios podem ser elencados, como é o caso da seca de 2014 que afetou o sudeste do Brasil, causando escassez no suprimento de água nas residências (Marengo, et al., 2015), e o caso dos ventos intensos e chuva em dois episódios de ciclones extratropicais no sul do Brasil, um em junho e outro em julho de 2023 que, juntos, causaram o óbito de pelo menos 20 pessoas. O problema ainda é maior nas expectativas do futuro, pois projeções climáticas para o final do século apontam aumento da frequência, intensidade e duração dos eventos extremos tanto de clima (secas, ondas de calor etc.), quanto de tempo (total diário de chuva com volumes muito acima do valor climatológico, por exemplo).

Diante desse cenário, além da elaboração das medidas de descarbonização, é necessário dimensionar a ameaça climática já em curso para verificar se tais medidas são realmente efetivas para as condições específicas do Estado de São Paulo. Neste trabalho, foram aplicados métodos estatísticos em projeções climáticas globais com granularidade baixa para a geração de informações com resolução espacial de 5 km, para serem utilizados como base primária de dados para incorporar os resultados no plano de descarbonização.

Adotou-se como premissa de trabalho que o clima atual serve de base para o desenvolvimento do plano e que as mudanças no clima apontadas são consideradas para fazer ajustes na trajetória do plano de ação definido. Em síntese, esse relatório disponibiliza insumos técnico-científicos sobre como a mudança do clima impacta potencialmente o setor energético de São Paulo, em termos da segurança energética, sustentabilidade e competitividade do setor.

## Clima atual em São Paulo

O padrão climático do Estado de São Paulo é influenciado, em grande parte, por sistemas atmosféricos que se desenvolvem fora das fronteiras do Estado. Por isso, essa seção traz uma síntese do padrão climático do Brasil para esclarecer as características do clima no Estado de São Paulo.

Na maior parte do Brasil, o clima é caracterizado por um período chuvoso (outubro a março) e outro seco (abril a setembro), que corresponde a um clima típico de monção (Teodoro, Reboita, Llopart, Rocha, & Ashfaq, 2021), (Ferreira & Reboita, A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast, 2022). No verão (dezembro a fevereiro), geralmente a região mais chuvosa do país se estende da Amazônia, passa pela região centro-oeste e chega à região sudeste, como mostra a Figura 13 c e d, onde consta a precipitação (mm/dia) e os ventos (m/s) no inverno (JJA) e verão (DJF) no período de 1993-2016.

As Figura 13 a e c representam os dados do *Climate Prediction Center (CPC)* e nas Figura 13 b e d da ERA5 oriundos das previsões do *European Centre for Medium-Range Forecast (ECMWF)* - SEASS. Com o maior aquecimento da superfície continental em relação ao inverno, aumenta a convecção (movimentos ascendentes na atmosfera), contribuindo, junto com outros sistemas atmosféricos, como o jato de baixos níveis a leste dos Andes, para a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

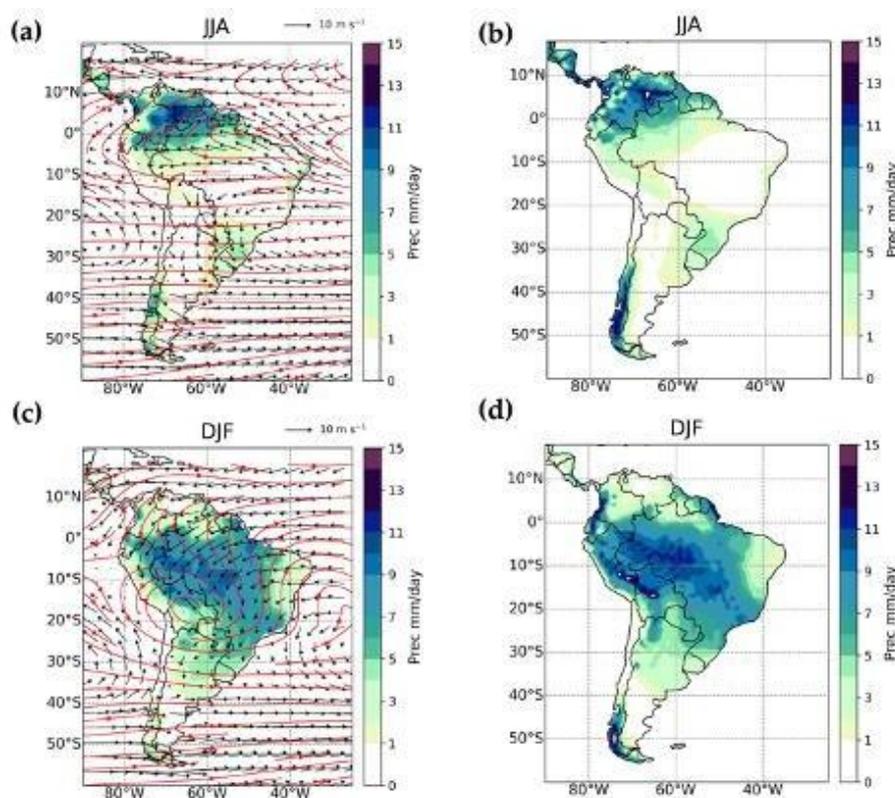
A ZCAS é uma banda de nebulosidade e precipitação, orientada no sentido noroeste-sudeste, que persiste por mais de três dias consecutivos e atinge o sudeste do Brasil, principalmente o Estado de São Paulo, chegando ao oceano Atlântico Sul (sua localização coincide com a região mais chuvosa mostrada na Figura 13 c).

No outono (março a maio), a precipitação começa a diminuir e, no inverno, atinge os menores volumes (Figura 13 a,b). Fato que está relacionado com a expansão do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), o que dificulta a atividade convectiva e o avanço de sistemas frontais para as regiões sudeste e centro-oeste do país. A partir da primavera (setembro a novembro), a precipitação volta a ser mais abundante sobre o país.

A climatologia mostrada na Figura 13, b,d, é o padrão esperado a se repetir ano a ano, entretanto, os mecanismos de variabilidade natural do clima somados às mudanças climáticas em curso, causam alterações nesses padrões ou, em outras palavras, causam déficits ou excesso de precipitação bem como mudanças na média das temperaturas.

Isso destaca a necessidade de previsões climáticas sazonais acuradas, pois muitos setores econômicos, como o de energia no Brasil, são dependentes da oferta de precipitação, vento e radiação solar, dada a relevante participação de fontes renováveis na matriz elétrica e, portanto, de características intermitentes e sazonais. Nesse sentido, a Figura 13b mostra a habilidade do modelo SEAS5 do ECMWF, com mais de 20 membros, em simular a precipitação sazonal no período de 1993 a 2016. O modelo é assertivo ao representar o padrão espacial da chuva, mas tende a superestimar os valores na região de atuação da ZCAS. Mais detalhes sobre a qualidade das previsões do ECMWF na América do Sul podem ser encontrados em (Ferreira, Reboita, & Drumond, Evaluation of ECMWF-SEAS5 Seasonal Temperature and Precipitation Predictions over South America, 2022).

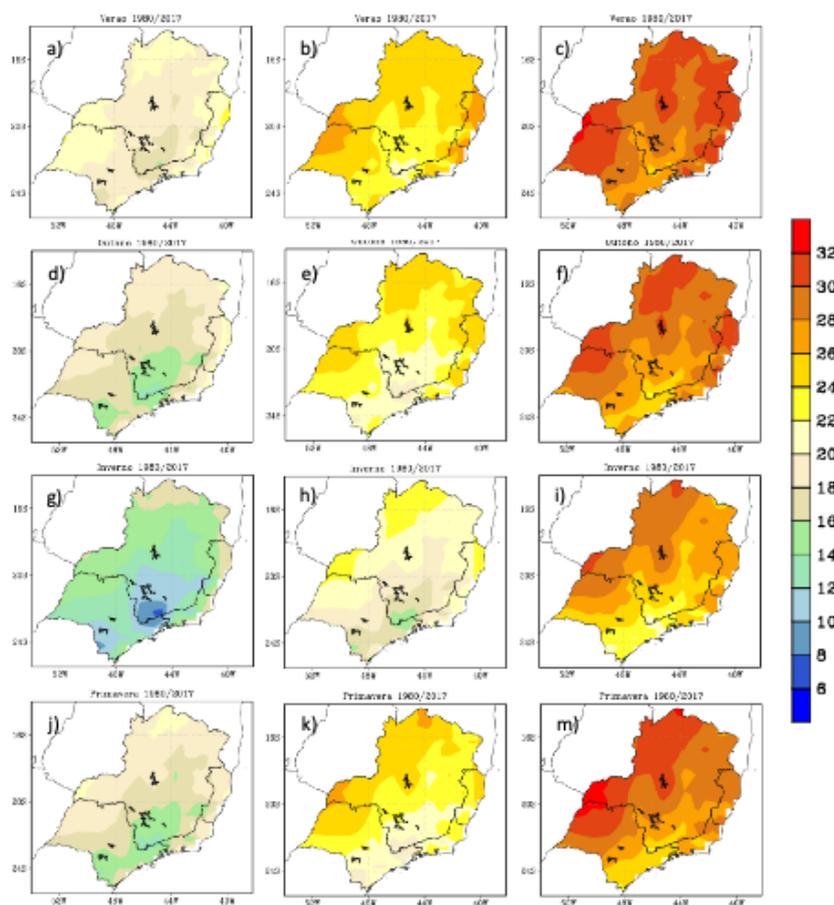
Figura 13 - Climatologia da precipitação e dos ventos



Fonte: (Ferreira & Reboita, A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast, 2022).

Na Figura 14 é mostrada a climatologia sazonal da temperatura (°C) mínima (esquerda), média (centro) e máxima (direita) obtida de (Vasconcellos & Reboita, 2021) para a Região Sudeste do Brasil no período de 1980 a 2017. A temperatura mínima (máxima) é a menor (maior) temperatura registrada no dia, enquanto a temperatura média é a média de todos os valores observados no dia e, também, pode ser aproximada pela média entre o menor e maior valor diário.

Figura 14 - Média sazonal das temperaturas (oC) mínima, média e máxima



Como São Paulo é o Estado da região sudeste em latitudes mais altas, suas temperaturas são mais baixas que as dos demais Estados da região. Em todas as estações do ano, as menores médias de temperatura no Estado de São Paulo são registradas nas áreas montanhosas da Serra do Mar e da Mantiqueira, enquanto as maiores ocorrem no noroeste do Estado, região mais plana e afastada do oceano (Lemes, Reboita, & Torres, 2019); (Vasconcellos & Reboita, 2021). Na média sazonal, as menores temperaturas ocorrem no inverno e as maiores no verão. A variabilidade sazonal da temperatura do ar está associada ao caminho aparente do sol, pois durante

o verão os raios solares são perpendiculares ao Trópico de Capricórnio no Hemisfério Sul, favorecendo o aquecimento do Estado de São Paulo e, no inverno, os raios solares são perpendiculares ao Trópico de Câncer no Hemisfério Norte, tornando as temperaturas mais baixas no hemisfério austral.

No verão (inverno), a temperatura média na Serra da Mantiqueira é de cerca de 20-22°C (14-16°C) e aumenta para oeste, chegando a cerca de 26-28°C (22-24°C) no noroeste do Estado de São Paulo.

## Principais projeções nas variáveis climáticas

O processo para geração de projeções climáticas é bastante complexo. O *World Climate Research Program* (WCRP) coordena o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) que é responsável por elaborar protocolos para que os grupos que realizam modelagem com modelos climáticos globais padronizem as configurações dos modelos e os dados a serem disponibilizados numa base de acesso livre (*Earth System Federation Grid*, ESGF).

Como as projeções fornecidas são de modelos globais, a resolução horizontal é grosseira (~100 km), não permitindo uma representação das características regionais do clima (Ambrizzi, Reboita, Rocha, & Llopart, 2018). Portanto, outros grupos de pesquisadores obtêm as projeções dos modelos globais e as usam como condições iniciais e de fronteiras em modelos climáticos regionais. Essa técnica é conhecida como *downscaling* dinâmico.

O problema do *downscaling* dinâmico demanda variáveis em alta frequência e em vários níveis da atmosfera geradas pelos modelos globais, o que muitas vezes não está disponível na plataforma ESGF e demanda muito tempo de processamento e conhecimento especializado em modelos regionais. O WCRP também coordena um grupo que é responsável por gerar protocolos para a realização das simulações/projeções com modelos regionais.

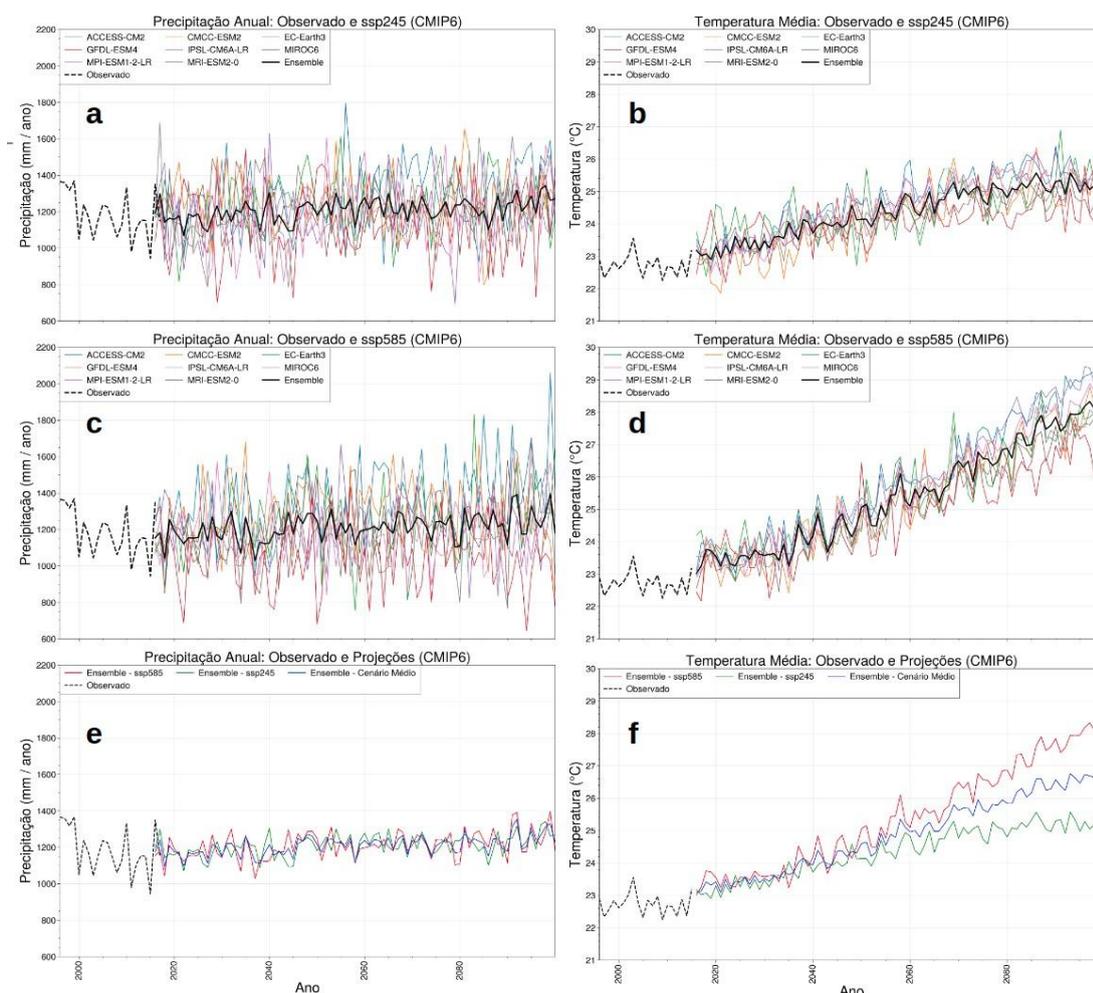
Uma vez que o CMIP elabora os protocolos para as projeções climáticas, o tempo necessário para executá-las é longo e, até que os grupos de modelagem climática regional executem e liberem suas projeções, isso pode exceder a mais de três anos. Por exemplo, o sexto relatório de avaliação do Painel Governamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), publicado em 2021 (IPCC, 2021), apresentou resultados de projeções climáticas com modelos globais da versão 6 do CMIP (CMIP6), enquanto os resultados de modelos climáticos regionais foram aqueles obtidos com modelos dirigidos pelo CMIP5.

Até o presente, não estão disponíveis projeções dos modelos climáticos regionais dirigidos com os dados do CMIP6 na plataforma ESGF. Para contornar a indisponibilidade de projeções climáticas regionais, técnicas menos custosas computacionalmente podem ser empregadas, que são as de *downscaling* estatístico, sendo oportuno ressaltar que os procedimentos mais simples do *downscaling* estatístico necessitam de dados observados em alta resolução para ajuste de funções estatísticas a serem aplicadas nas projeções climáticas.

Dessa forma, a primeira etapa da metodologia é a geração de dados em pontos de grade em alta resolução, seguida da interpolação espacial das projeções climáticas globais para a grade das observações e aplicação das técnicas estatísticas.

Para a elaboração da Figura 15 foi aplicada a técnica de *downscaling* estatístico em oito modelos climáticos do CMIP6.

Figura 15 - Projeções climáticas



O período histórico corresponde ao período entre 1995 e 2014, e o período de projeção corresponde ao período entre 2015 e 2099. Dois cenários são utilizados: um

similar ao “mundo atual” (SSP2-4.5) e outro bem pessimista, considerando uma sociedade consumista e sem preocupações com o meio ambiente (SSP5-8.5). A média dos dois cenários fornece um cenário intermediário. Os dados mostrados na Figura 14 são valores médios para a precipitação e temperatura média do ar somente sobre o Estado de São Paulo. Enquanto a precipitação mostra uma pequena tendência de aumento, a tendência na temperatura do ar é bastante elevada e estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiança.

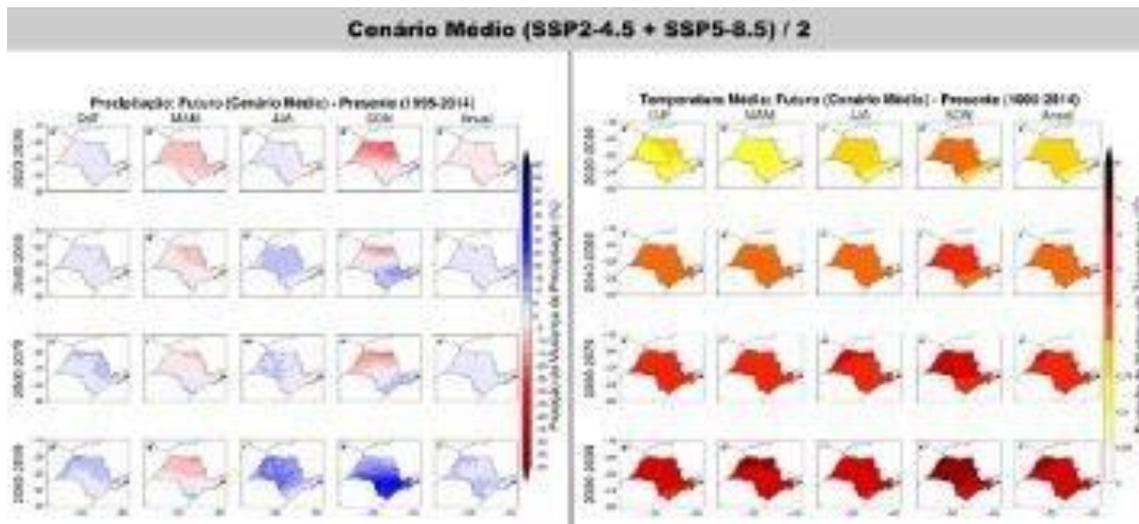
Outra diferença entre ambas as variáveis é que a dispersão entre os modelos é maior na precipitação do que na temperatura do ar, o que indica uma maior fonte de incerteza nas projeções da precipitação. Na Figura 15 e-f, tem-se apenas os *ensembles* do cenário intermediário. No final do século, o *ensemble* intermediário indica um aumento de mais de 3,5°C na temperatura do ar em relação ao presente.

Na Figura 15 são apresentadas as mudanças projetadas por períodos e estação do ano, para a precipitação e temperatura média do ar, no cenário intermediário considerando o cenário SSP2-4.5 e os períodos 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 e 2080-2099.

As colunas, da esquerda para direita, indicam: a média dos meses de DJF, MAM, JJA, SON e a média anual. A projeção de déficit de precipitação que aparece no período 2020-2039 tende a mudar o sinal para excesso no final do século e essa característica é bem evidente na primavera e média anual (Figura 15). Já a tendência de aumento das temperaturas ocorre sobre todo o Estado e com o aumento sendo maior no final do século (Figura 16).

Ressalte-se que o sinal das projeções de precipitação e temperatura obtidos no presente estudo concordam com trabalhos que analisaram (a) as projeções climáticas diretamente nos modelos globais do CMIP6 (Almazroui, et al., 2021), (b) que usaram esses modelos juntamente com a técnica de *downscaling* estatístico e 50 km de resolução horizontal e (c) com os modelos do CMIP5 juntamente com a técnica de *downscaling* dinâmico (Reboita, et al., 2022). Enquanto os modelos regionais RegCM e REMO concordam, em geral, com o sinal do CMIP6 no Estado de São Paulo, o modelo regional Eta projeta condições de déficit de precipitação (Reboita, et al., 2022). Isso é uma fonte de incerteza intrínseca às características de cada modelo climático.

Figura 16 - Mudanças projetadas na precipitação (%) e temperatura (°C)



## Principais impactos nas projeções nas vazões

As vazões dos principais rios da região onde se insere o Estado de São Paulo, mas também de outras que interferem diretamente nos recursos hídricos do Estado, como os da bacia do Paraná e bacia do Paraíba do Sul são afetadas diretamente pela precipitação e pela mudança na cobertura do solo como também pelo uso consuntivo.

As projeções de vazão são geradas a partir da aplicação do Modelo de Grandes Bacias – MGB-IPH (Collischonn, et al., 2007). Na Figura 17 são apresentadas as diferentes etapas do processo de construção das projeções, que incluem alterações do clima, uso e cobertura do solo e nos usos consuntivos da água.

As etapas incluem a calibração do modelo hidrológico a partir de dados hidrológicos observados e mapas diversos de características físicas da bacia. Com o modelo MGB-IPH ajustado, as projeções dos modelos climáticos para o período histórico são assimiladas para gerar vazões e o resultado é avaliado para verificar possíveis erros sistemáticos a serem corrigidos. Os usos do solo e usos consuntivos são avaliados quanto às tendências históricas e, com base nas projeções climáticas, são projetadas modificações para os períodos futuros. Todas as alterações projetadas passam pelo modelo hidrológico para gerar as séries de vazão dos períodos futuros, que são comparadas com o período histórico projetado.

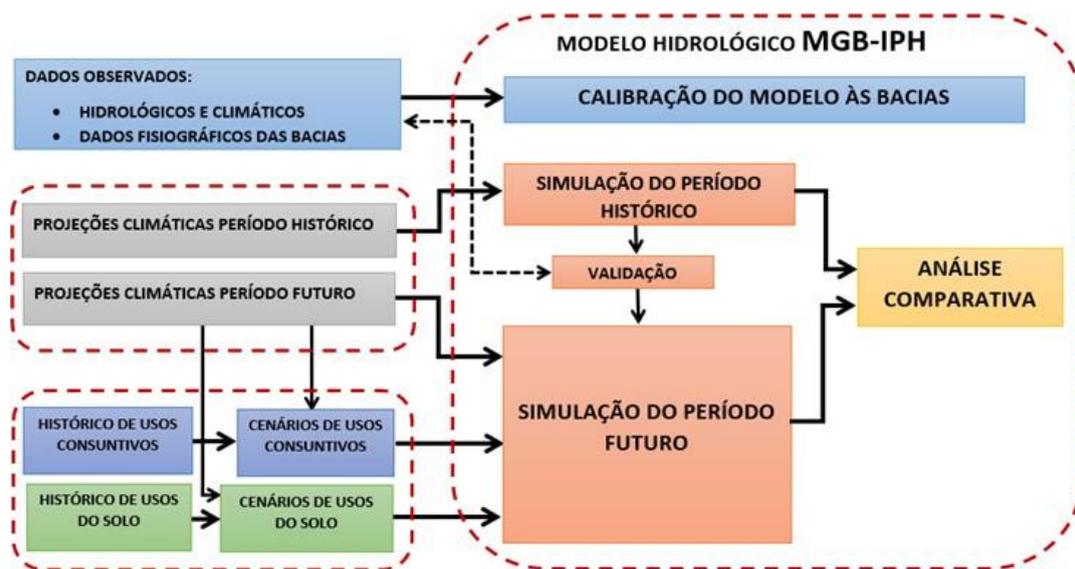
O MGB é um modelo conceitual que foi desenvolvido por (Collischonn W. , 2001), com base na estrutura do modelo LARSIM (Bremicker, 1998) e com algumas adaptações do modelo VIC-2L (Liang, Lettenmaier, Wood, & Burge, 1994).

Basicamente, compõe-se de módulos para o cálculo de balanço de água no solo, evapotranspiração, propagação de escoamento dentro de uma célula e pela rede de drenagem. Os processos representados no MGB são: interceptação, balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos nas mini bacias e escoamento na rede de drenagem.

Os dados principais de entrada são a precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica (Bayer & Collischonn, 2013).

Para obter um modelo que mais se aproxime da resposta hidrológica, é necessário ajustar parâmetros do modelo para as bacias das respectivas usinas hidrelétricas. Para calibração do modelo foi usado a Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) das vazões e do logaritmo das vazões (NSElog).

Figura 17 - Fluxograma da metodologia da modelagem hidrológica utilizando o MGB



Um maior detalhamento foi feito para as usinas contidas no Estado de São Paulo, que estão localizadas nas bacias hidrográficas do rio Paraná e Paraíba do Sul, conforme apresentado na Figura 18 e na Figura 19.

Observa-se pelas estatísticas que o ajuste pode ser considerado de muito bom a bom (Moriasi, 2007), com poucas exceções como nos reservatórios de Billings e Guarapiranga, devido à pequena escala das bacias e à forte influência da ocupação urbana. Destaca-se que os valores de NSE a qualificam melhor o ajuste das vazões

médias e altas, enquanto o NSElog é mais representativo das vazões do período de estiagem.

## Uso e ocupação do solo

Para a avaliação das mudanças no uso e ocupação do solo, que podem afetar as vazões dos rios, utilizou-se dos mapas obtidos junto ao projeto (MapBiomass, 2023), que dentre os seus produtos, disponibilizam a evolução anual da cobertura e uso da terra (1985 a 2021) para o território brasileiro, que foram projetados para o período futuro, para o mesmo horizonte dos usos consuntivos. A partir dessa análise a parametrização das alterações de uso e ocupação do solo se dá pela modificação nos valores dos parâmetros de vegetação do modelo MGB, sendo eles: albedo, índice de área foliar, resistência superficial e altura da vegetação.

Figura 18 - Estatística de calibração do modelo MGB Nash-Sutcliffe para as UHEs de São Paulo

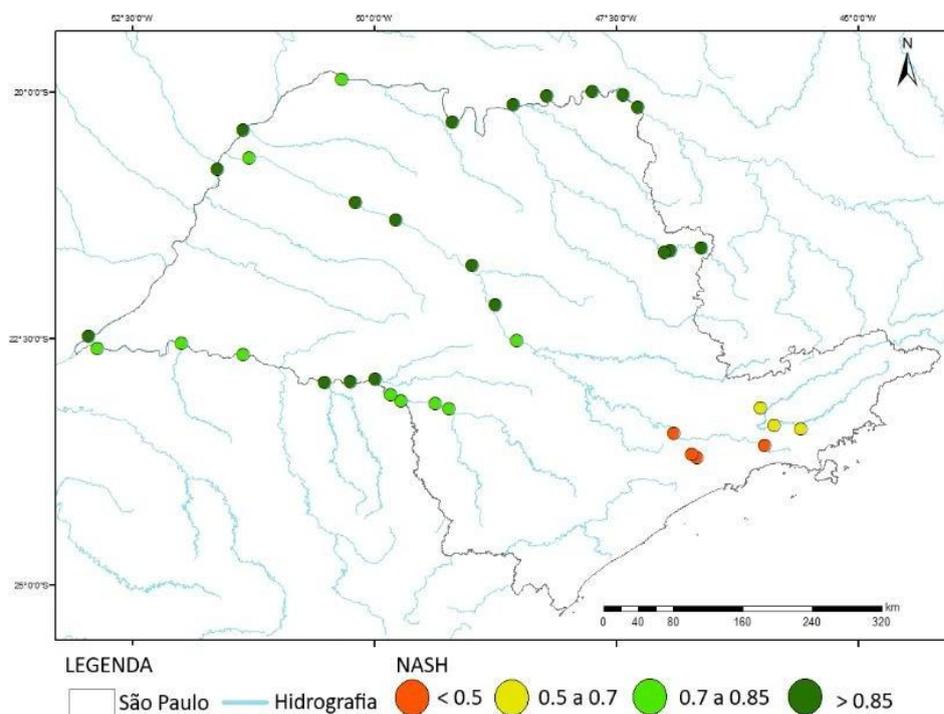
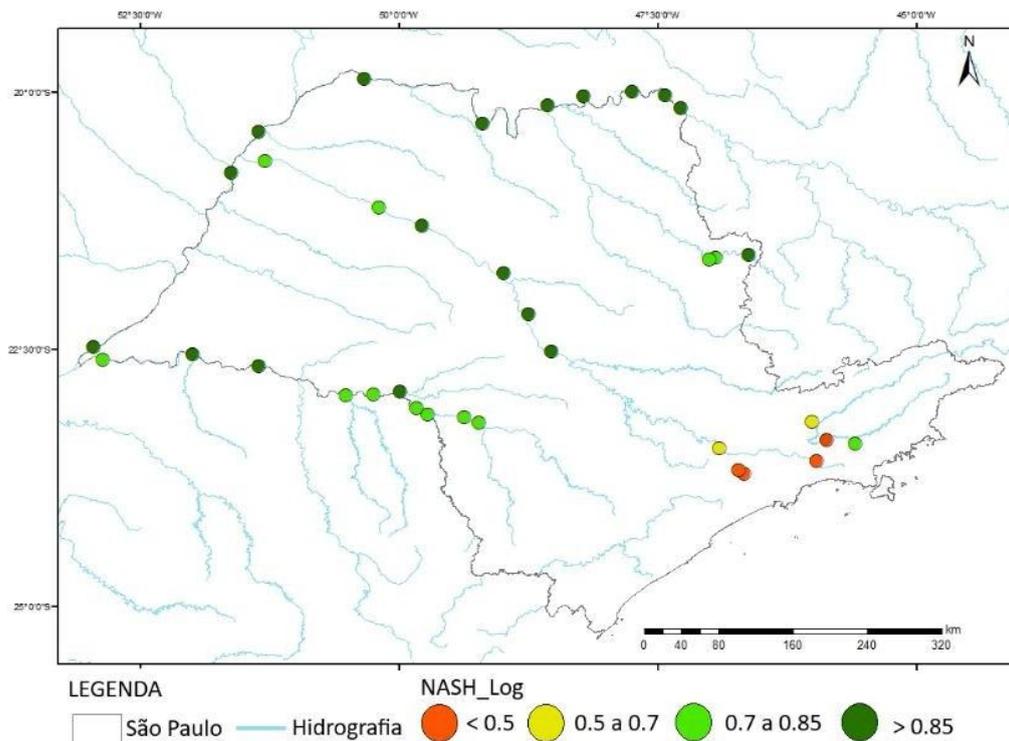


Figura 19 - Estatística de calibração do modelo MGB Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões para as UHEs de São Paulo

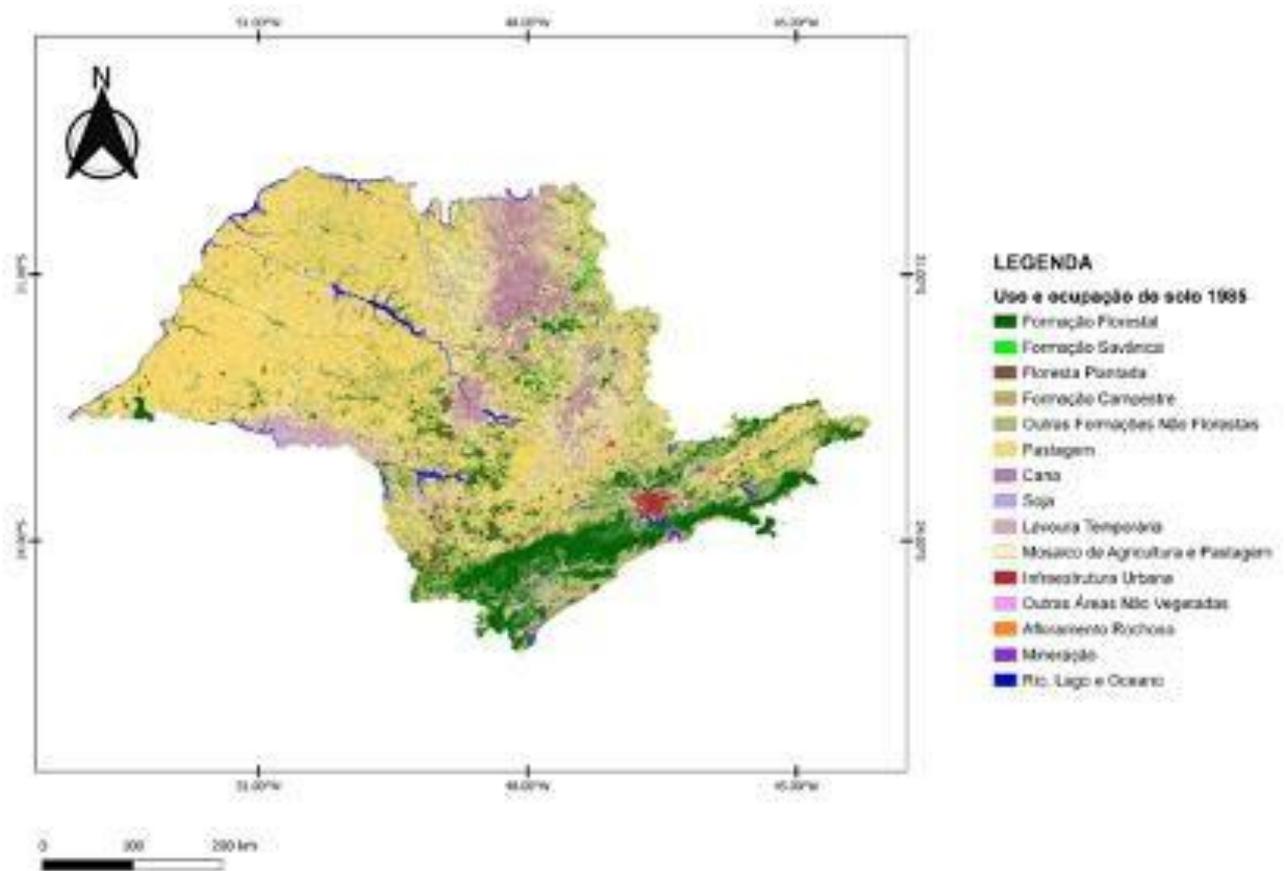


A Figura 20 e a Figura 21 apresentam os mapas de uso e ocupação dos solos dos anos de 1985 e 2021, respectivamente, de onde se verifica um crescimento nas últimas décadas nas culturas de cana-de-açúcar e soja, em substituição às pastagens. Com base nas tendências observadas nos últimos anos, projetou-se um cenário tendencial até o ano 2050, indicando uma tendência de estabilidade nas alterações ocorridas nas últimas décadas, conforme apresentado na

Figura 22.

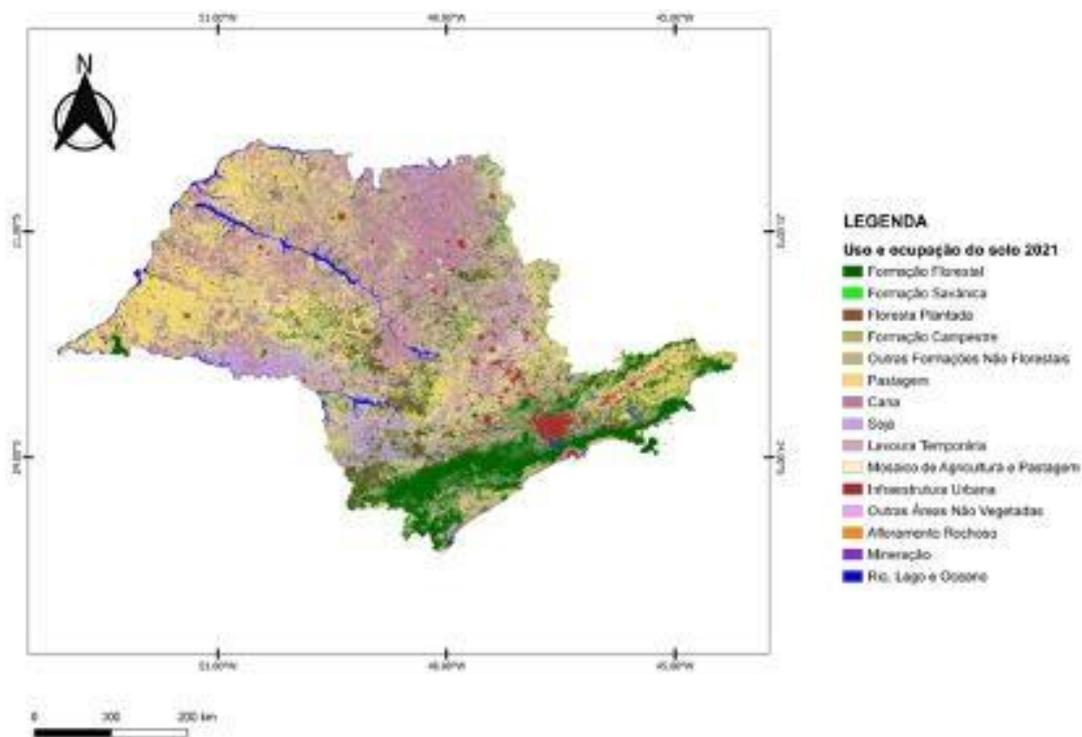
Dessa forma, para as projeções de vazão do período futuro considerou-se apenas um cenário de mudança nos usos do solo, para todos os modelos climáticos e cenários de emissão de gases de efeito estufa, uma vez que as alterações futuras são de menor magnitude em relação ao histórico recente.

Figura 20 - Uso e ocupação do solo da região do estado de São Paulo no ano de 1985



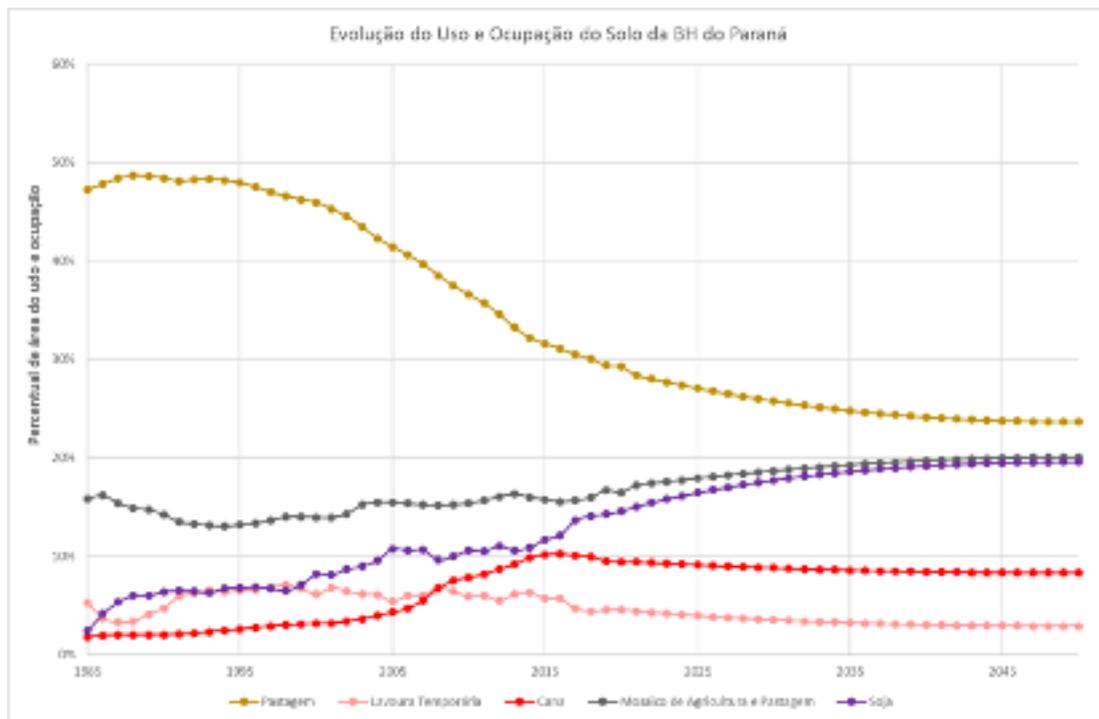
Fonte: (MapBiomass, 2023)

Figura 21 - Uso e ocupação do solo da região do estado de São Paulo no ano de 2021



Fonte: (MapBiomass, 2023)

Figura 22 - Histórico e projeção de mudanças no uso e ocupação do solo para a bacia do rio Paraná - Horizonte até 2050.



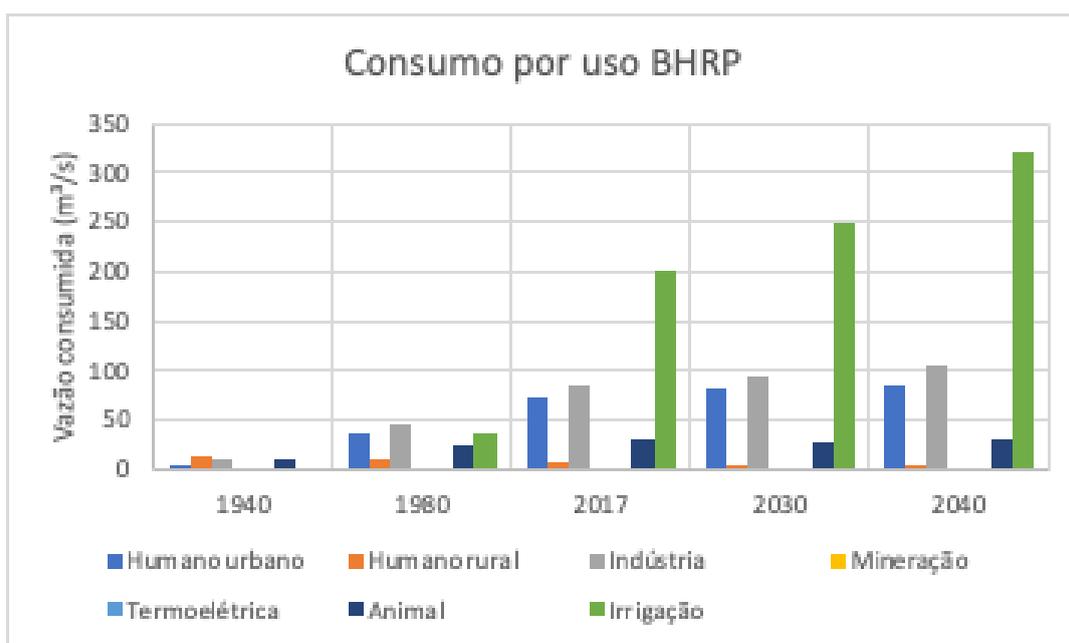
Fonte: (MapBiomass, 2023)

## Uso consuntivo da água

Para a contabilização do consumo da água foram utilizados os resultados do Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil (ANA, 2019), que apresenta um diagnóstico (1931 a 2021) das demandas para os municípios e para as usinas hidrelétricas, além disso, projeções (2021 a 2040) das demandas hídricas. A partir dessas informações as projeções puderam ser prolongadas até o ano de 2050 Com base nas taxas de crescimento tendencial dos últimos anos, de cada setor de consumo. A partir dessa metodologia ainda não se consideram as influências das mudanças climáticas, cujos impactos podem alterá-las significativamente. Adotou-se a premissa de que essas projeções formam um cenário de referência, sobre o qual é aplicada a influência das mudanças no clima. Ou seja, considerou-se que este cenário irá ocorrer independente de cenários climáticos, mas deve ser corrigido em função das alterações climáticas projetadas por modelo individualmente.

A partir do documento de usos consuntivos da água obtidos juntos a ANA foi possível verificar os padrões de consumo da água e a evolução deste na bacia do rio Paraná, de 1940 a 2040, onde se verifica que com o decorrer dos anos a demanda hídrica tem aumentado na região acompanhando o crescimento populacional. Os dados serão atualizados até 2040, nova projeção fornecida, e, projetados para o período futuro e incorporados a modelagem do MGB. A Figura 23 apresenta a evolução do consumo de água, por setor de uso, na bacia do rio Paraná desde 1940 até 2021, bem como a projeção realizada pela ANA até 2040.

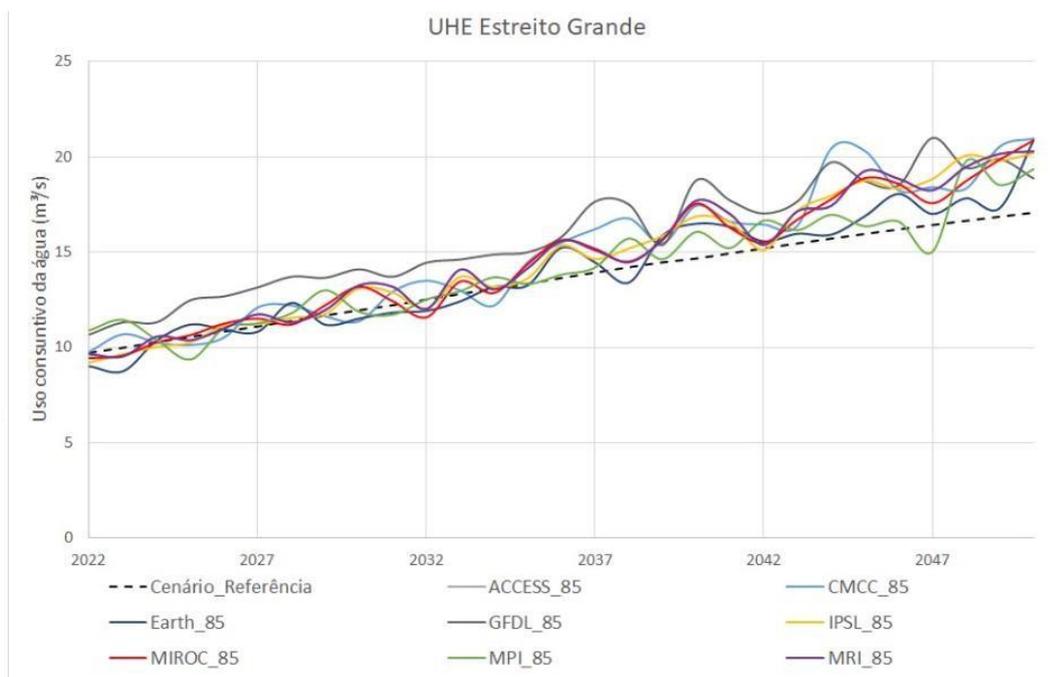
Figura 23 - Evolução do consumo de água na bacia do rio Paraná



Fonte: (ANA, 2019)

Para aplicar as mudanças climáticas aos cenários de referência foi adotada a evapotranspiração de referência –  $ET_0$ , calculada pela equação de Thornthwaite. Para esse cálculo foram consideradas alterações nas variáveis velocidade do vento e temperatura, oriundas das projeções dos modelos climáticos. Determinaram-se, então, os valores médios a montante das bacias de cada usina. Na Figura 24 são apresentados os resultados para o caso da UHE Estreito Grande no cenário SSP2-8.5.

Figura 24 - Projeções de usos consuntivos da UHE Estreito Grande, para o cenário de emissão de gases de efeito estufa SSP5-8.5



## Projeções de vazão

Uma vez desenvolvido o downscaling das projeções e construídos os cenários de usos do solo e usos consuntivos, esses dados alimentaram o modelo hidrológico MGB-IPH e foram geradas projeções de vazão natural afluente às usinas hidrelétricas.

Na Figura 25 e na Figura 26 são apresentadas as anomalias de vazões, para todas as bacias das 36 usinas simuladas, considerando a combinação de usos do solo e cenários de consumo de água por usos consuntivos, com a indicação do percentual de alteração indicada pela média do conjunto de modelo de projeção, no período 2015-2050 e cenários de emissão SSP2-4.5 e SSP2-8.5.

Esses mapas são bem representativos do comportamento geral dos resultados, pois estão representados os *ensembles* dos modelos para os dois cenários de emissão.

Figura 25 - Projeções de alterações naturais afluentes médias às usinas hidrelétricas do Estado de São Paulo.  
Ensemble dos modelos cenário SSP2-4.5

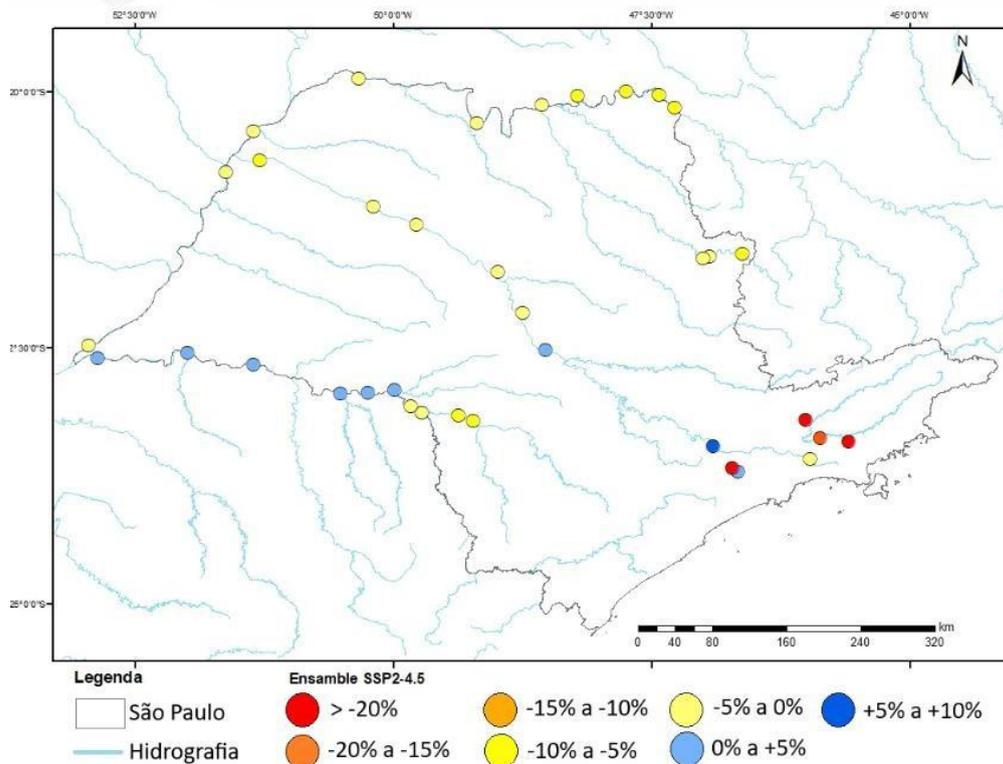
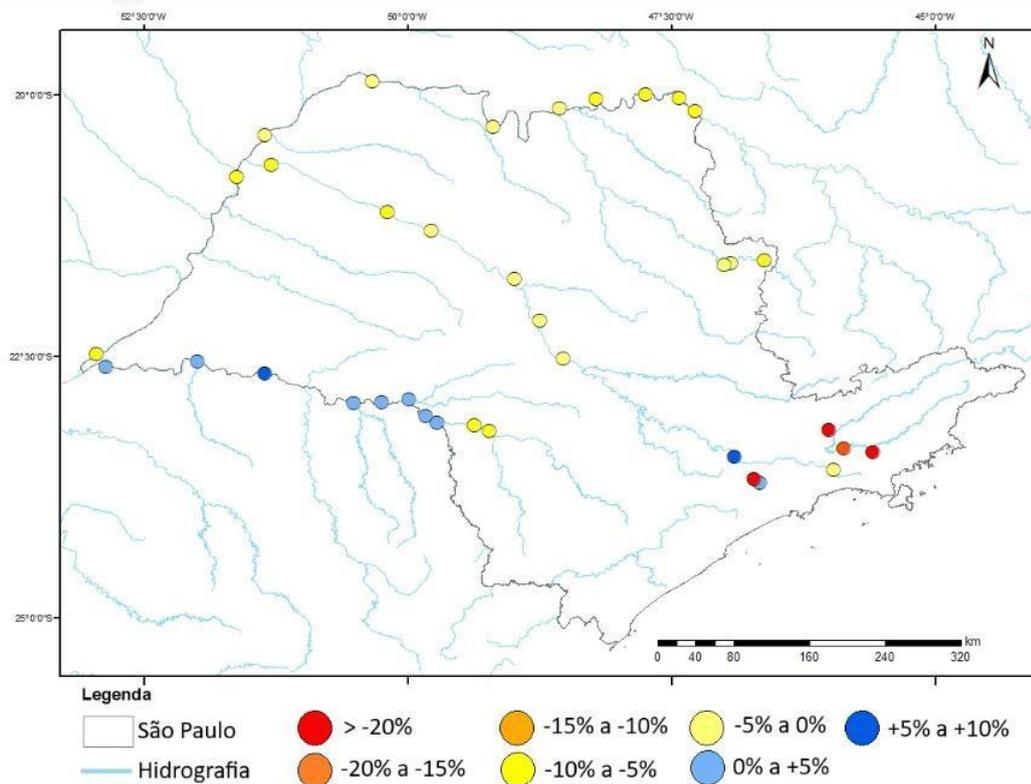


Figura 26 - Projeções de alterações naturais afluentes médias às usinas hidrelétricas do Estado de São Paulo.  
Ensemble dos modelos cenário SSP2-8.5



Observam-se claramente as reduções de vazão média para os rios mais ao norte alinhado com o efeito "el niño" para a região N e NE do país, enquanto ao sul do ESP já há uma aproximação dos efeitos na região Sul, onde as projeções de precipitação tendem a variar em função do modelo climático global considerado, fato que denota uma dificuldade em se afirmar se o ESP vai tender a experimentar uma diminuição ou aumento de vazões.

É possível verificar um decréscimo de 4.15% até 2050 nas vazões médias de todo o ESP considerando os dois cenários de emissão e a diminuição devido ao uso consuntivo conforme apresentado nas figuras. O impacto apenas considerando os usos consuntivos é de - 1,40% o que deixa 2,75% de queda para o efeito direto da variação climática.

A maior variação negativa é de 30% para a bacia do Paraíba do Sul sendo este valor referente às vazões médias da bacia.

Os resultados obtidos para a bacia do Paraíba do Sul, com uma redução mais acentuada do que nas demais, é um resultado coerente com diversos estudos similares. Essa característica se deve porque a região da Bacia do Paraíba do Sul é uma zona de transição, apresentando tendência negativas, enquanto que as demais bacias de SP apresentam tendências positivas, destacando-se que esse comportamento está de acordo com os resultados obtidos dos modelos climáticos e que se acentua quando se aplicam os modelos de conversão de chuva em vazão.

Os resultados apresentados para os valores médios para o ESP são influenciados pela configuração da bacia do Paraíba do Sul, encaixado entre as serras do Mar e da Mantiqueira, uma vez que a resolução original dos modelos climáticos não tem resolução que permita isolar essas áreas. Além disso, o efeito do relevo combinado com a baixa densidade de estações de medição de chuva nas cabeceiras do Paraíba do Sul pode ter influenciado no resultado do downscaling estatístico para essa região.

## **Considerações finais - Mudanças climáticas**

Com base nos modelos climáticos globais disponibilizados no último IPCC e posteriormente regionalizados, foram simuladas as projeções climáticas para o Estado de São Paulo. Estudos foram feitos para a projeção do clima até o final do século, indicando aumento de temperatura, poucas variações na precipitação no período de outono, inverno e primavera em relação ao período histórico e grandes incertezas na projeção da precipitação durante o verão no ESP.

No verão, quando há aumento das incertezas das previsões, devido à maior variabilidade observada no histórico, alguns modelos climáticos projetam escassez de chuva, enquanto outros preveem precipitação acima dos valores do período histórico.

Esta diversidade é oriunda da dificuldade observada na projeção climática da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) onde está inserido o ESP. No entanto, existe uma certa consonância nos modelos quanto aos eventos extremos como a intensificação da chuva diária acima do percentil de 95% o que gera sinais de alerta para o planejamento de estruturas e de busca de sistemas mais resilientes.

Outro destaque deve ser feito ao se projetar um aumento de temperatura máxima e média, aumentando a evaporação e o consumo de água, aumentando ainda a carga energética para climatização e refrigeração, além de impactar a eficiência de processos industriais. A partir deste conhecimento é possível traçar possíveis políticas de enfrentamento das ameaças climáticas buscando adaptação dos sistemas energéticos como também de outras estruturas existentes, ajustando os planos de investimentos em infraestrutura que normalmente são construídos sem considerar estas alterações no clima.

No que se refere às aflúências às usinas hidrelétricas, tendo o modelo hidrológico ajustado, com as projeções de precipitação e temperatura oriunda do modelo climático, projeções de uso do solo e de usos consuntivos da água, foram geradas as projeções de vazão afluente para os aproveitamentos hidrelétricos em análise.

É possível verificar um decréscimo de 4.15% até 2050 nas vazões médias de todo o ESP considerando os dois cenários de emissão e a diminuição devido ao uso consuntivo. O impacto apenas considerando os usos consuntivos é de - 1,40% o que deixa 2,75% de queda para o efeito direto da variação climática. A maior variação negativa é de 30% para a bacia do Paraíba do Sul sendo este valor referente às vazões médias da própria bacia.

# Cenários Macroeconômicos

---

## Economia mundial

No estágio atual da globalização, as economias dos países tornaram-se interdependentes, de tal sorte que os fatores locais passaram a ter impacto mundial e vice-versa. São cada vez mais raras as situações em que se verifica a possibilidade de circunscrever a abrangência de fatos relevantes para a economia às fronteiras do país onde tiveram origem.

Assim, ao se avaliar a perspectiva do crescimento econômico brasileiro e paulista, é essencial que se tenha clareza sobre a perspectiva mundial. Para que se obtenha os cenários das perspectivas econômicas do Estado de São Paulo, é importante que se considere os cenários para o nosso País, particularmente, além da visão internacional, tendo em vista que o ESP é exportador de produtos e portanto, sua economia é afetada em parte, diretamente pela condição econômica internacional.

Os trabalhos acerca dos cenários macroeconômicos utilizados na elaboração deste Plano Estadual de Energia foram executados pela empresa de consultoria Luciano Coutinho Associados (LCA), especializada em análises econômicas com amplo reconhecimento Nacional e renome internacional, apontando-se, com base nesses estudos, os principais aspectos e vetores da macroeconomia mundial, brasileira e paulista, conforme descrito nos itens a seguir.

De acordo com a análise do Banco Mundial, corroboradas pelas expectativas trazidas pelo Goldman Sachs para a década atual (2020/2030), o menor crescimento e o envelhecimento da população deverão reduzir, ainda mais, o já baixo crescimento potencial e tendencial do mundo no horizonte 2022/2030. Essas características esperadas para a demografia, além de indicarem menor disponibilidade de mão de obra, apontam para uma maior pressão sobre os sistemas previdenciários e, portanto, sobre as contas públicas e a carga tributária, fechando um ciclo que retroalimenta as barreiras para o crescimento econômico.

Para além da demografia menos favorável, ganhos menores de produtividade nos países que estão na fronteira tecnológica e os efeitos negativos das anunciadas mudanças climáticas também pesam negativamente nas atuais perspectivas de médio e longo prazo para o crescimento das economias de forma geral. Ainda assim, países emergentes deverão continuar crescendo mais do que os países já avançados, embora a taxas menores do que as observadas historicamente.

De acordo com a pesquisa do investimento global, elaborado pela Goldman Sachs, quando se avalia as economias mundiais em valores absolutos, medidos em US\$, em 2050 a China passará a ser a maior economia do mundo e o Brasil que nos anos 2000 era a décima economia, a partir de 2050 passará à oitava posição, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Maiores economias mundiais medidas em US\$

Ranking	1980	2000	2022	2050	2075
1	United States	United States	United States	China	China
2	Japan	Japan	China	United States	India
3	Germany	Germany	Japan	India	United States
4	France	United Kingdom	Germany	Indonesia	Indonesia
5	United Kingdom	France	India	Germany	Nigeria
6	Italy	China	United Kingdom	Japan	Pakistan
7	China	Italy	France	United Kingdom	Egypt
8	Canada	Canada	Canada	Brazil	Brazil
9	Argentina	Mexico	Russia	France	Germany
10	Spain	Brazil	Italy	Russia	United Kingdom
11	Mexico	Spain	Brazil	Mexico	Mexico
12	Netherlands	Korea	Korea	Egypt	Japan
13	India	India	Australia	Saudi Arabia	Russia
14	Saudi Arabia	Netherlands	Mexico	Canada	Philippines
15	Australia	Australia	Spain	Nigeria	France

Source: Goldman Sachs Global Investment Research

## Economia brasileira

Considerando-se a época em que as projeções macroeconômicas foram elaboradas e sabendo-se que ao longo da preparação de um plano de longo prazo, não é possível atualizar as projeções de crescimento da economia em função do surgimento de novos fatos, antes de se apresentar as projeções para o Brasil e, para o Estado de São Paulo em particular, é importante destacar que:

1. Cenários de médio e longo prazo da LCA incorporam as projeções populacionais mais recentes do IBGE, divulgadas em 2018 e ainda baseadas, em boa medida, no Censo de 2010 (já que a Contagem Populacional de 2016 foi cancelada por falta de recursos).
2. Dados do Censo de 2022/23 deverão começar a ser divulgados em junho deste ano de 2023.
3. Estimativas recém-divulgadas apontam que a população brasileira é significativamente MENOR do que se imaginava (203 vs quase 215 milhões), crescendo quase metade do que se estimava antes. Isso deverá gerar um impacto nada desprezível não somente nas projeções, mas também no passado brasileiro (desde 2010), já que as estimativas populacionais impactam o cálculo de diversos indicadores utilizados para se estimar o PIB brasileiro.

4. Ademais, em 2024 o IBGE deverá divulgar uma ampla revisão das Contas Nacionais (a última ocorreu em 2015, com base no ano de 2010). Em geral, tais revisões levam a alterações do PIB nominal e da taxa de variação do PIB em volume para cima, na medida em que o IBGE incorpora novos setores/produtos, que costumam ser aqueles com maior dinamismo. Contudo, não é possível antecipar a magnitude dessas revisões.

Quando se trata de projeções de longo prazo, o crescimento do PIB pode ser definido em função da dinâmica de três variáveis que devem ser utilizadas para decompor e explicar a evolução da economia: a) População; b) Razão entre População Ocupada e População Total; e c) Produtividade do Trabalho. Tais variáveis, por sua vez, são afetadas por diversos outros condicionantes (macroeconômicos, microeconômicos, institucionais, dotação de recursos naturais etc.)

Na projeção elaborada pela LCA neste trabalho, para o período 2023-2050 admite-se que a produtividade do trabalho (PIB VAPB / PO) na economia brasileira irá crescer cerca de 1,8% a.a., tendo em vista que a Força de Trabalho deverá crescer perto de zero nesse período, após ter variado +2,2% a.a. entre 1990 e 2010 e +1,2% a.a. entre 2011 e 2022, pelo fato de que na média 1982-1994, a produtividade do trabalho variou -0,5% a.a. e em 1995-2022, variou +0,6% a.a. (+1,2% a.a. durante o período do superciclo de *commodities*, 1999 a 2011), o cenário de referência traçado neste projeto, já carrega, em si, uma certa dose de otimismo

Destaque-se que as estiagens observadas entre 2012 e 2021 subtraíram cerca de 1 p.p. ao ano da produtividade agregada de nossa economia durante esse período devido à elevada dependência que o bom desempenho econômico brasileiro tem da disponibilidade de períodos chuvosos abundantes, seja para a geração de eletricidade, seja para o agronegócio. Como a matriz elétrica está se tornando gradativamente menos dependente de hidreletricidade e as chuvas voltaram a se aproximar da média em 2022/2023, essa restrição de oferta deverá ser fortemente aliviada nos próximos anos.

Portanto, o Cenário de Referência incorpora a reversão de alguns choques desfavoráveis e persistentes de oferta, bem como a maturação de reformas implementadas nos últimos anos e a implementação de outras reformas, fatores que deverão elevar a produtividade da economia brasileira.

O Cenário de referência também incorpora perspectiva de que a extração de petróleo e gás natural no Brasil deverá crescer quase 80% até o final desta década (após dobrar desde a descoberta do pré-sal, em 2006/2007) e que o País continuará tendo um dos menores custos de produção do mundo nas décadas de 2030 e 2040, observando-se no entanto, que a demanda global por petróleo, hoje em cerca de 100 milhões de

barris por dia, deverá cair para 30 milhões em 2050, caso os países trilhem o cenário *Net Zero* de emissões de GEE em 2050.

Com base nessas premissas, adotando-se a metodologia de projeções empregada pela LCA, na Figura 28, apresenta-se a projeção do crescimento de PIB para o Brasil.

Figura 28 - Projeções de crescimento de PIB para o Brasil

	PIB Brasil: var. % em volume			População Brasil: var. %
	Base	Pessimista	Otimista	
<b>2023</b>	1.7	-0.5	3.0	0.7
<b>2024</b>	1.5	0.6	3.4	0.6
<b>Média 2025-30</b>	2.0	1.2	2.9	0.5
<b>Média 2031-40</b>	1.8	1.2	2.6	0.3
<b>Média 2041-50</b>	1.7	1.0	2.4	0.0

Projeções LCA em 31/05/2023

Destaque-se que:

1. Sem a reforma tributária (IVA), os ganhos de produtividade do Brasil nos próximos anos e décadas tende a ser semelhante ao observado no passado. Esse é o cenário Pessimista, que admite uma virtual ausência de convergência do PIB per capita brasileiro em direção às economias mais desenvolvidas;
2. No cenário Otimista, para além das premissas do Cenário Base, boa parte dos riscos favoráveis levantados como expectativas se materializariam, com a produtividade do trabalho crescendo cerca de 2,5% a.a., gerando convergência bem mais rápida ante aos países da fronteira tecnológica (nos quais a produtividade deverá crescer pouco menos de 1% a.a. nesse horizonte).

## Economia paulista

Considerando-se a forte correlação entre o PIB brasileiro e o paulista, com base nas projeções elaboradas para o Brasil, foram gerados os resultados de crescimento do PIB do Estado de São Paulo, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Projeção de crescimento do PIB do Estado de São Paulo

	PIB SP: var. % em volume			População SP: var. %
	Base	Pessimista	Otimista	
<b>2023</b>	1.6	-0.6	2.8	0.7
<b>2024</b>	1.4	0.3	3.2	0.7
<b>Média 2025-30</b>	1.7	1.1	2.8	0.6
<b>Média 2031-40</b>	1.5	1.0	2.4	0.3
<b>Média 2041-50</b>	1.3	0.7	2.0	0.1

Projeções LCA em 31/05/2023

Observa-se que no horizonte de projeção, a taxa de crescimento de São Paulo é inferior à taxa de crescimento brasileira e, sobre esse aspecto, destaca-se que:

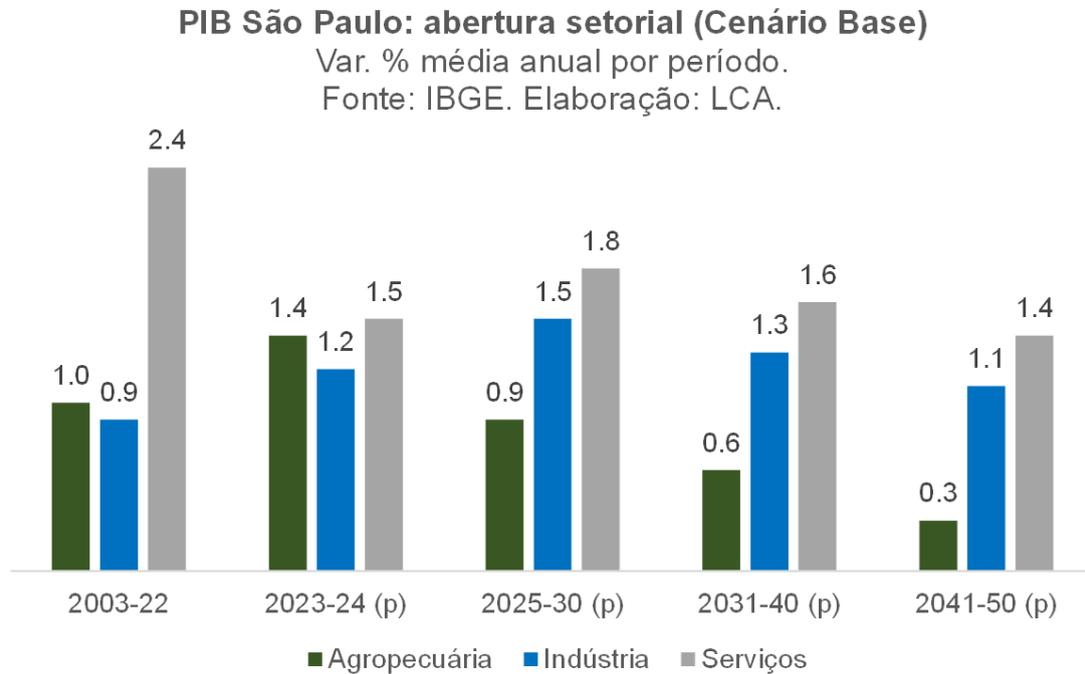
- a despeito dessa redução da diferença de PIB per capita, o PIB de SP em termos absolutos ainda continuaria sendo o maior dentre as UFs;
- dada a relevância sistêmica de SP (efeito direto e *spillovers* para outros estados), políticas locais que impulsionem o crescimento do PIB do estado também poderiam gerar efeitos sobre o PIB brasileiro como um todo.

Para as projeções setoriais da economia do Estado, observa-se o crescimento apresentado na Figura 30, cumprindo destacar que embora o PIB de Serviços deva continuar liderando o crescimento do PIB de SP sob a ótica da oferta, o cenário Base da LCA projeta uma redução da diferença entre o crescimento desse setor e aquele da Indústria nas próximas décadas, posto que:

- De fato, o crescimento do PIB Indústria de SP em 2025-50 deverá ser até maior do que a expansão média observada em 2003-2022.

- Isso reflete sobretudo os impactos esperados da reforma da tributação indireta (sobre o consumo), que deverá ser implementada entre 2026 e 2032.

Figura 30 - Crescimento setorial do PIB Paulista



Todos os setores da economia ganham com a reforma tributária, já que o PIB brasileiro será bem maior do que sem essa mudança na estrutura dos tributos. Não obstante, a indústria é quem mais deverá ganhar, já que hoje é o segmento mais prejudicado pelas diversas distorções do sistema tributário brasileiro.

# Setor Elétrico

---

## Considerações Gerais

Nas últimas décadas, o mercado de energia elétrica está passando mundialmente por mudanças drásticas principalmente decorrentes do novo regime de mudanças climáticas e da aceleração do uso intensivo de novas tecnologias digitais, que culminou na era da Quarta Revolução Industrial, e permitiu ao consumidor de eletricidade participar de forma ativa no contexto da cadeia de geração, transmissão, distribuição, comercialização e consumo de eletricidade.

Em meio a essas mudanças, muitos países em todo o mundo estrategicamente implementaram políticas públicas para acelerar a mudança para uma nova economia baseada em energia renovável, eficiência energética e desenvolvimento sustentável, com o objetivo final de substituir totalmente outras fontes de energia não renováveis. Para acelerar a transição energética é necessária a recapacitação dos sistemas públicos de transmissão e distribuição de energia, que foram originalmente projetados e construídos para operar como sistemas centralizados de energia convencional e base fóssil, em sistemas descentralizados, baseados em energia renovável.

Além disso a modernização em discussão está também alavancada pela questão da mudança climática, nos esforços dos países em aumentarem a resiliência das redes de distribuição e transmissão e capacitarem estes sistemas para absorver e hospedarem crescentemente novos projetos de produção de energia limpa, por fontes de energia renováveis, principalmente eólica e solar. O clima e as condições meteorológicas extremas estão impactando cada vez mais os sistemas de energia em todo o mundo.

A maioria dos modelos e rotas de descarbonização projetam o setor elétrico como chave para a redução de emissões em outros setores, como por exemplo, a partir da eletrificação de processos produtivos. À medida que a dependência da eletricidade da sociedade cresce com a eletrificação do transporte, edifícios e outros setores para cumprir as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, será imperativo que o sistema de energia seja planejado e projetado para absorver a demanda adicional, ao mesmo tempo em que seja adaptado para as mudanças de eventos climáticos extremos.

O investimento proativo, em vez de respostas reativas, após situações de crise, pode resultar em custos gerais mais baixos a longo prazo e garantir os benefícios sociais de um sistema de energia de potência altamente confiável, resiliente e seguro.

Dado o papel projetado do setor elétrico na descarbonização de outros setores, a confiabilidade e a resiliência das unidades geradoras e da rede elétrica são fundamentais para alcançar as reduções de emissões em toda a economia necessárias para atender às metas climáticas.

A modernização efetiva da infraestrutura de geração, transmissão e distribuição é um pilar sólido, necessário e fundamental para uma sociedade sadia e economicamente sustentável, uma vez que ligada à economia, a disponibilidade de energia elétrica é um pressuposto para bem-estar da humanidade.

A questão central dessa estratégia é expandir o uso de energia renovável e ao mesmo tempo reduzir o consumo de energia por meio da eficiência energética. Para isso, a transição energética pode ser mais eficiente por meio da chamada transformação digital, que combina tecnologia de informação e comunicação - TIC aplicadas nos sistemas de energia elétrica. A transformação digital proporciona a transição dos sistemas convencionais para uma energia mais inteligente, potencializando ganhos mais expressivos, menores custos e investimentos globais, se tornando o desafio mais premente para os formuladores de políticas e indústrias relacionadas.

A digitalização não afeta apenas a demanda e a oferta de energia, mas também altera o próprio sistema energético. Em particular, a digitalização de uma indústria de energia elétrica pode romper as fronteiras entre os setores de energia e integrar todo o sistema energético. Além disso, a digitalização cria uma oportunidade para a habilitação de interações automáticas, quebrando as fronteiras entre consumidores e fornecedores no mercado de energia e equilibrando a oferta e a demanda em tempo real.

Em vários países foram oferecidos estímulos para a modernização dos serviços e das tarifas reguladas, fazendo com que as concessionárias se tornassem mais centradas no cliente.

No caso do Brasil, a sociedade já vem digitalizando uma série de atividades e serviços, com a instalação crescente de dispositivos inteligentes, o que se constitui em fator muito relevante, aumentando a urgência desta transformação no setor elétrico.

## **Demanda de Energia Elétrica**

Neste trabalho desenvolve-se e aplica-se uma metodologia para projeção dos cenários de evolução do consumo de eletricidade no horizonte 2023/2050 para o Estado de São Paulo, com base nas projeções de evolução do Produto Interno Bruto (PIB) associado à economia paulista no mesmo horizonte.

As projeções macroeconômicas utilizadas como base para a definição dos cenários de demanda foram elaboradas pela Luciano Coutinho Associados (LCA), conforme já apresentado.

A evolução do consumo de eletricidade é utilizada na construção do balanço de eletricidade do Estado, indicando a dependência de geração externa para suprimento da demanda estadual, norteador essencial para a definição de políticas e estabelecimento de diretrizes visando o objetivo do “net zero” em energia elétrica.

Por meio da definição de cenários direcionam-se as características da oferta e da demanda, e ajustam-se os caminhos a serem trilhados pelas políticas energéticas, visando sinalizar adequadamente, em consonância com os objetivos almejados no projeto, as novas ofertas de energia dentro do Estado de São Paulo que atendam às exigências de descarbonização e para que a demanda, tanto residencial quanto industrial e comercial, também cresçam, sem que seja necessário aumentar a carbonização. O direcionamento adequado a nível de balanço de oferta e demanda de eletricidade promovem a melhor segurança energética, garantia de competitividade e sustentabilidade para a economia do Estado.

A metodologia é descrita sucintamente através do desenvolvimento dos tópicos de visão geral, a seguir, e do detalhamento para cada classe de consumo, onde se apresentam os desenvolvimentos realizados que culminaram na criação do modelo de projeção de demanda empregado na construção das projeções. O foco principal deste capítulo concentra-se na apresentação da metodologia desenvolvida, especificação do modelo de projeção de demanda e resultados obtidos na aplicação.

Salienta-se que a orientação do desenvolvimento do modelo teve como objetivo a criação de um método capaz de gerar cenários sensíveis às principais variáveis inerentes à temática, como a projeção da variação do PIB e o crescimento da população, para sustentar o cálculo de taxas de crescimento do consumo de energia elétrica para o Estado de São Paulo.

### **Visão geral sobre a metodologia aplicada**

Amplamente utilizada no planejamento e operação do setor elétrico a projeção de demanda influencia diversas decisões dos agentes e norteiam as mais diversas políticas traçadas pelas instituições setoriais. Por sua vez, as projeções de longo prazo estão fortemente atreladas à evolução das variáveis econômicas, demográficas e da dinâmica dos diferentes setores da economia.

As projeções de demanda podem ser feitas com diversos tipos de modelos. Os mais comuns na literatura são os dos tipos “top-down”, “bottom-up” e de outros que utilizam técnicas de Inteligência Artificial. A literatura disponível sobre o tema

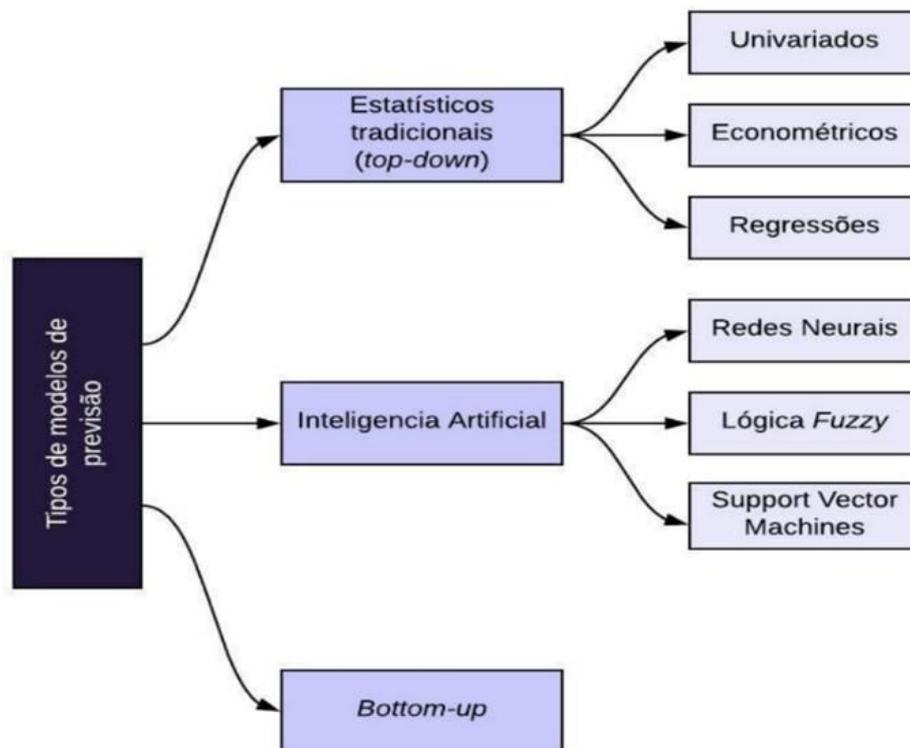
apresenta, amplamente, a divisão dos modelos de previsão nessas três classes citadas. A Figura 31 apresenta as principais características dos modelos citados.

A metodologia desenvolvida neste trabalho utiliza-se de um modelo de previsão estatístico econométrico tradicional (top-down), para o qual se apresenta a aplicação e os resultados obtidos.

A metodologia é similar à utilizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), considerando as variáveis disponíveis para as análises e com possibilidade de sensibilidades de eficiência energética, agregação de perdas e cenários de geração distribuída atrás do medidor, provenientes de modelos “bottom-up”.

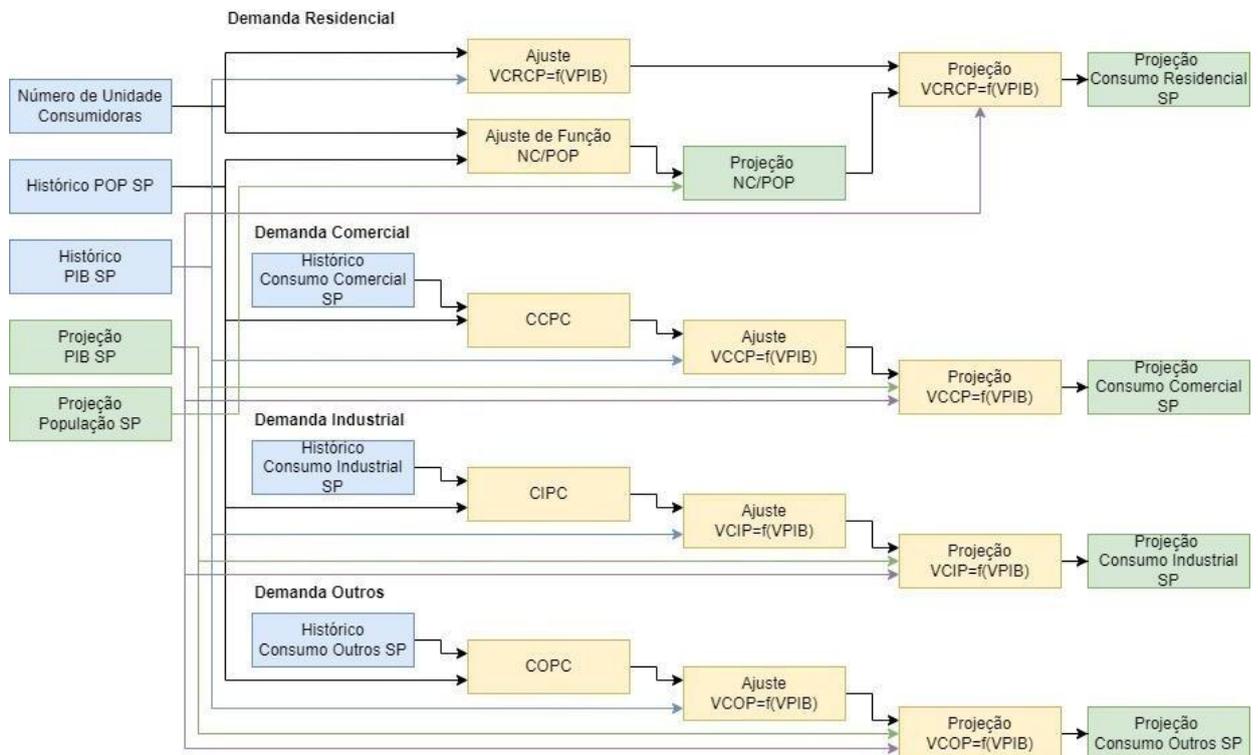
O foco da projeção de demanda é a elasticidade Consumo X PIB em base anual. Contudo, para dois parâmetros específicos, utilizados como insumo para os cálculos, foi adotado o histórico mensal como base de ajustes, são estes: (i) correlação entre crescimento populacional e o crescimento do número de consumidores, e (ii) a sazonalidade da demanda em base mensal, para eventual utilização dos cenários projetados em base mensal, sem interferir na relação entre demanda e PIB. A Figura 32 apresenta o fluxograma detalhado do modelo de previsão desenvolvido.

Figura 31 - Classes de Modelos de Previsão



Fonte: Elaboração Própria

Figura 32 - Fluxograma Modelo de Projeção



Fonte: Elaboração própria

## Resultados

A demanda de energia elétrica total do Estado de São Paulo em 2021 foi de 15,4 GW médios, com aumento de 5,6% em relação ao ano anterior, sendo este aumento explicado principalmente pela retomada após o arrefecimento da pandemia da Covid-19 no ano de 2020. Contudo, comparando-se o ano de 2021 com o ano de 2019, o aumento é de 1,5%, conforme pode-se observar na Figura 33.

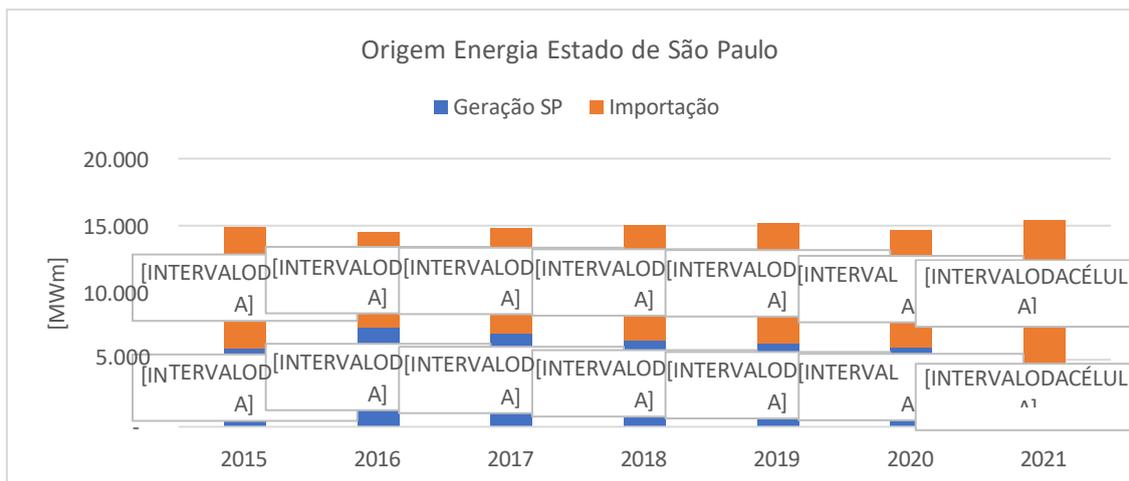
Figura 33 - Carga Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria

Da energia consumida dentro do Estado de São Paulo uma pequena parcela é gerada dentro do próprio Estado. Nas perspectivas apresentadas no PPE 2020 esperava-se um aumento da geração dentro do Estado com objetivo de atender mais de 50% da carga através de geração interna, contudo, apenas em 2016 foi verificada geração “própria” superior a 50% da carga do Estado (Figura 34) e cada vez mais verifica-se o aumento da importação de energia.

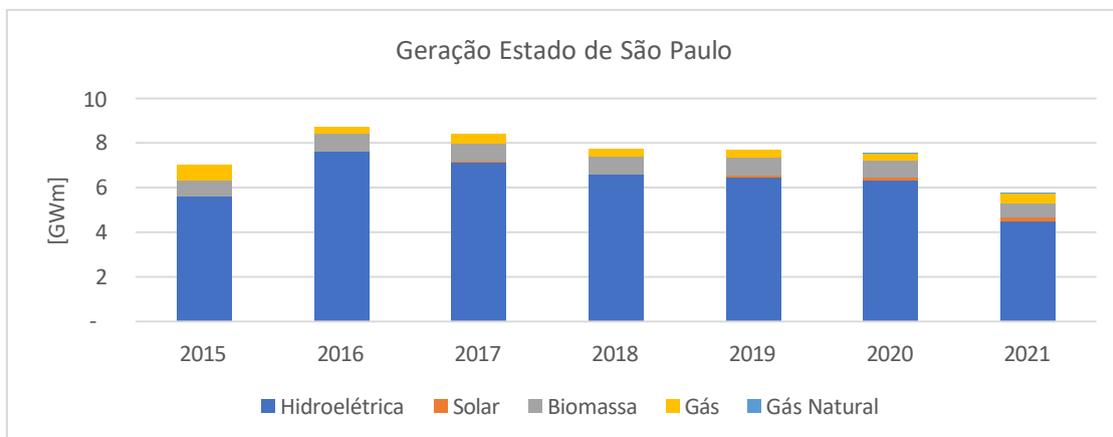
Figura 34 - Origem da Energia Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria

Dentre a geração interna ao Estado de São Paulo destaca-se a geração hidroelétrica, responsável por 78% da produção no ano de 2021 e 84% no ano de 2020. Além disso, observa-se a crescente avanço da participação da geração solar e uma retomada na geração a gás natural no ano de 2021, conforme apresentado na Figura 35.

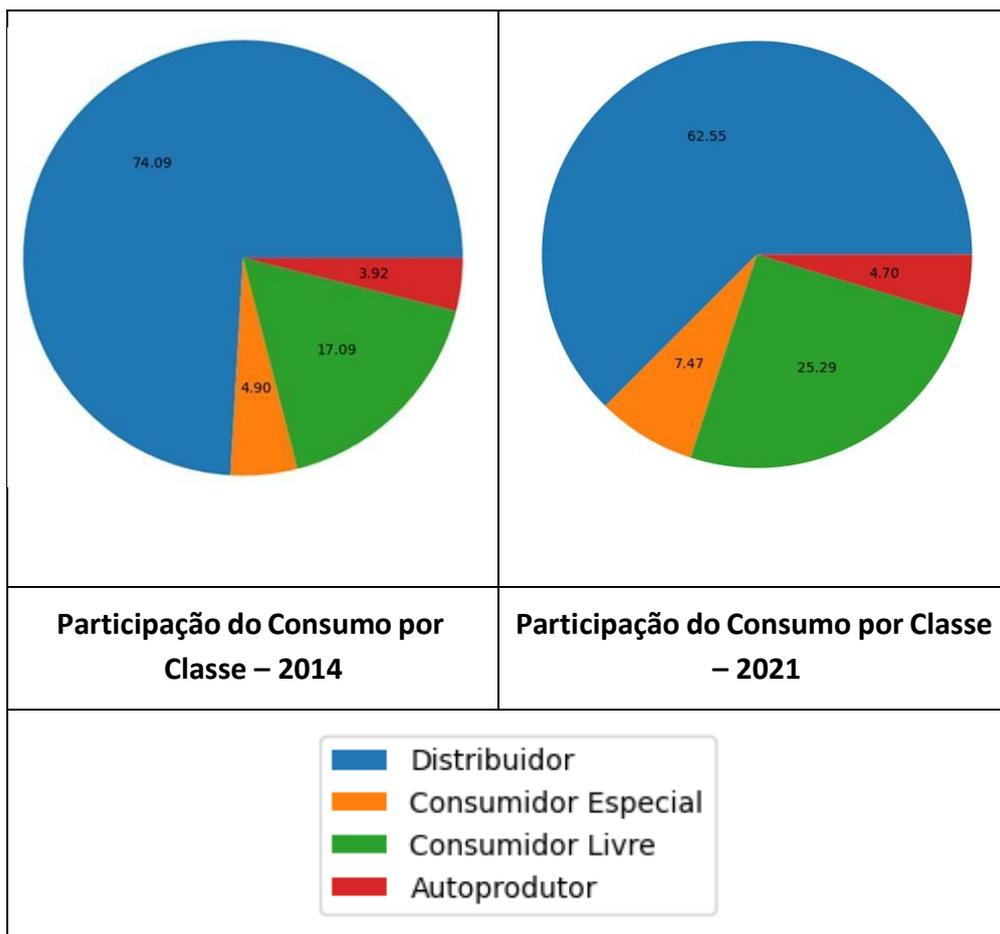
Figura 35 - Geração Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria

Do lado da demanda, o Estado de São Paulo representa 26% do Sistema Interligado Nacional<sup>7</sup> e 46% do Submercado Elétrico Sudeste/Centro Oeste no ano de 2021, sendo a maior Estado consumidor. Apesar do pouco crescimento da demanda nos últimos 7 anos, observa-se uma crescente diminuição do consumo através das distribuidoras e o aumento do Mercado Livre de Energia no Estado (Figura 36) aumentando a participação de Consumidores Livres e Especiais.

Figura 36 - Participação do Consumo por Classe



Fonte: CCEE,2022

### Evolução histórica da demanda de energia elétrica no Estado de São Paulo

Nesta seção é apresentado o diagnóstico do lado da demanda de energia do Estado de São Paulo. Para o levantamento da disponibilidade energética do Estado, é construído

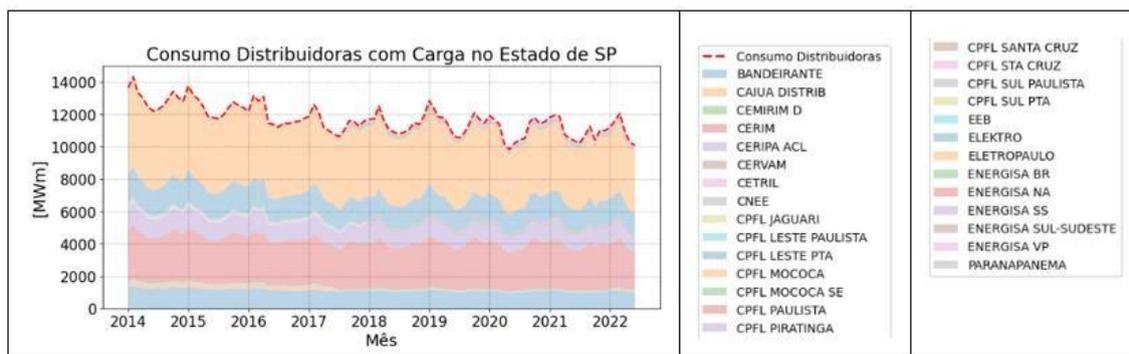
<sup>7</sup> Ref: Infomercado CCEE

o balanço, considerando o resultado dos demais grupos de trabalho, garantindo-se a coerência dos resultados no bojo do projeto como um todo.

Diante da importante representatividade do consumo de eletricidade no Estado de São Paulo, a Figura 36 apresenta as principais classes de consumo na perspectiva da Câmara de Comercializadora de Energia Elétrica (CCEE) conforme verificado em 2014 e 2021, observando-se a crescente evolução na participação do mercado livre e dos consumidores especiais, além dos autoprodutores de eletricidade. Essa evolução está associada, particularmente, à relevância e evolução do consumo industrial.

Conforme pode ser observado na Figura 37, o consumo apontado pelas distribuidoras, para o mercado cativo em suas respectivas áreas de concessão dentro do Estado de São Paulo, é decrescente nos últimos 8 anos com 28 agentes desta categoria, sendo o maior deles, a Eletropaulo, que atende a região metropolitana de São Paulo - Capital.

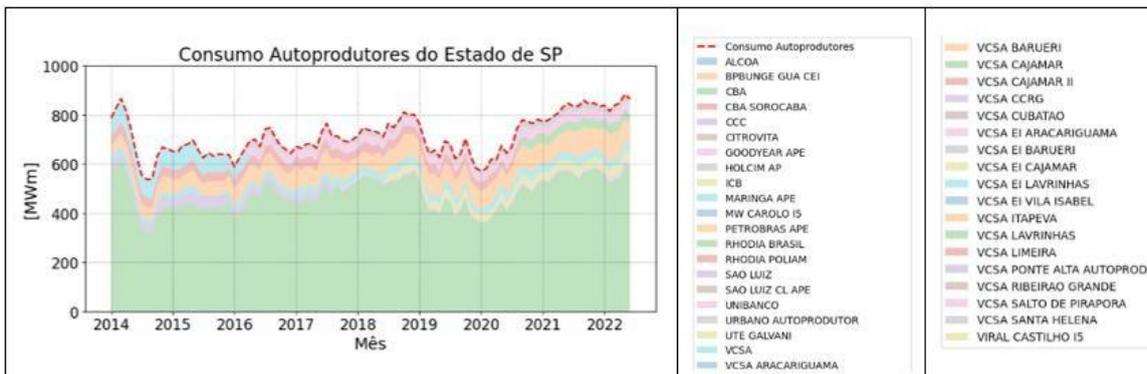
Figura 37 – Distribuidoras



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 38 é apresentada a evolução no consumo dos autoprodutores de energia elétrica no Estado de São Paulo que tem como maior agente, a Companhia Brasileira de Alumínio responsável por mais de 50% do consumo dessa categoria. Observa-se que a partir de 2020 o consumo suprido pela autoprodução no Estado tem apresentado crescimento.

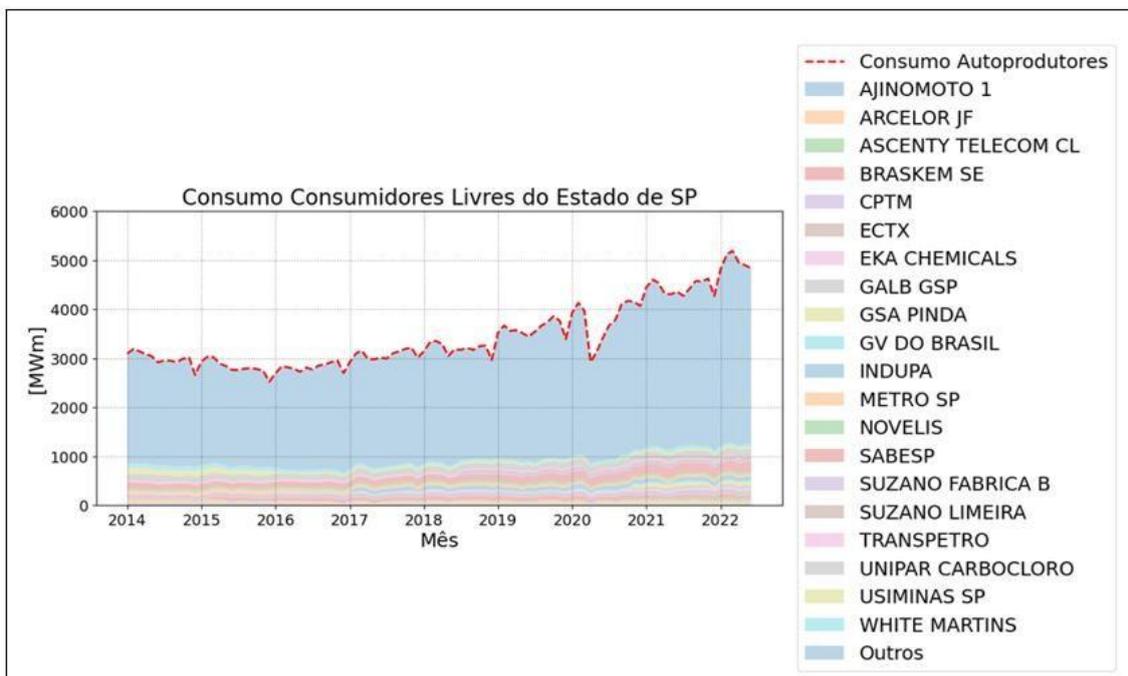
Figura 38 – Autoprodutores



Fonte: Elaboração própria

O número de consumidores livres tem crescido no Estado de São Paulo, e a carga antes alocada nas distribuidoras é contabilizada fora delas. Até junho de 2022 são contabilizados 2181 Consumidores livres no Estado onde 20 destes tiveram carga superior a 30 MW médios no ano de 2021 e foram representados individualmente na Figura 39.

Figura 39 - Consumidores Livres



Fonte: Elaboração própria

A Figura 40 mostra que em 2017 houve um aumento significativo na carga de consumidores especiais, que desde então se manteve com tendência de redução. Em junho de 2022 foram contabilizados 4494 Consumidores Especiais dentro do Estado de São Paulo.

Figura 40 - Consumidores Especiais



Fonte: Elaboração própria

Os principais resultados obtidos com a aplicação da metodologia para projeção do consumo de eletricidade para o Estado de São Paulo, considerando a correlação histórica do consumo com o crescimento do PIB, que dão a visão de futuro no horizonte até 2050, são apresentados a seguir.

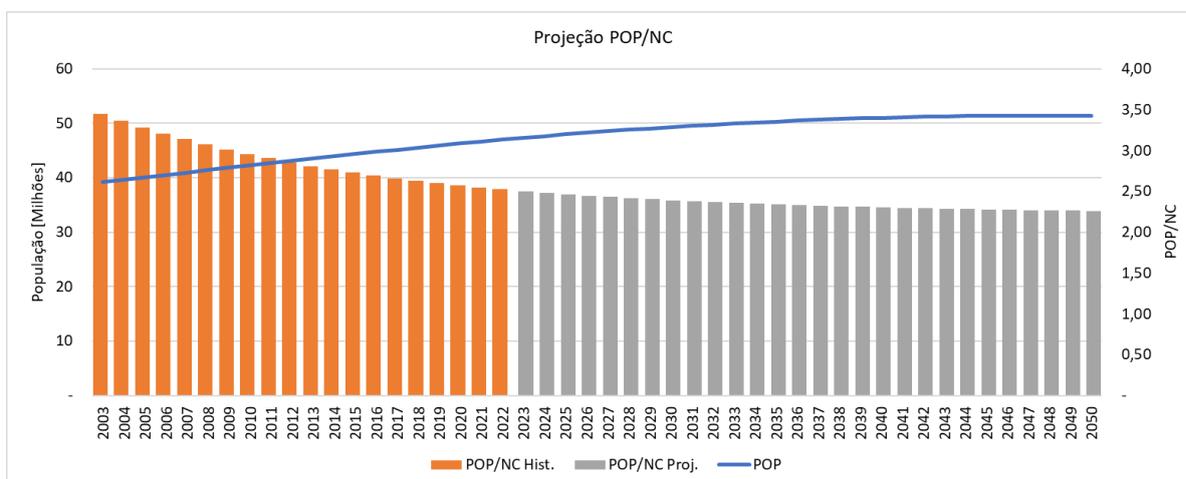
### Projeção de consumo da Classe Residencial

Projeção de consumo da classe residencial tem como principais premissas o desenvolvimento econômico representado pelo crescimento do PIB e o crescimento do número de consumidores residenciais influenciado diretamente pela projeção da população.

A linha contínua da Figura 41 representa a evolução populacional paulista histórica e projetada, enquanto as barras mostram a evolução do número de habitantes por unidade consumidora residencial, indicando quantos habitantes se utilizam, em média, de cada unidade consumidora.

Assim, da Figura 41, pode-se notar que embora a população cresça, há uma tendência de que cada unidade consumidora residencial abrigue um número cada vez menor de habitantes, observando-se que em 2003 havia cerca de 3,5 habitantes por unidade e a projeção é de que esta relação decaia para cerca de 2,3 habitantes por unidade consumidora até 2050, de modo que diante da projeção de população do Estado feita pelo IBGE, existe a tendência de que a redução de habitantes por domicílio continue caindo, porém com uma menor taxa, alcançando o valor de 2,3 habitante por unidade consumidora residencial em 2050.

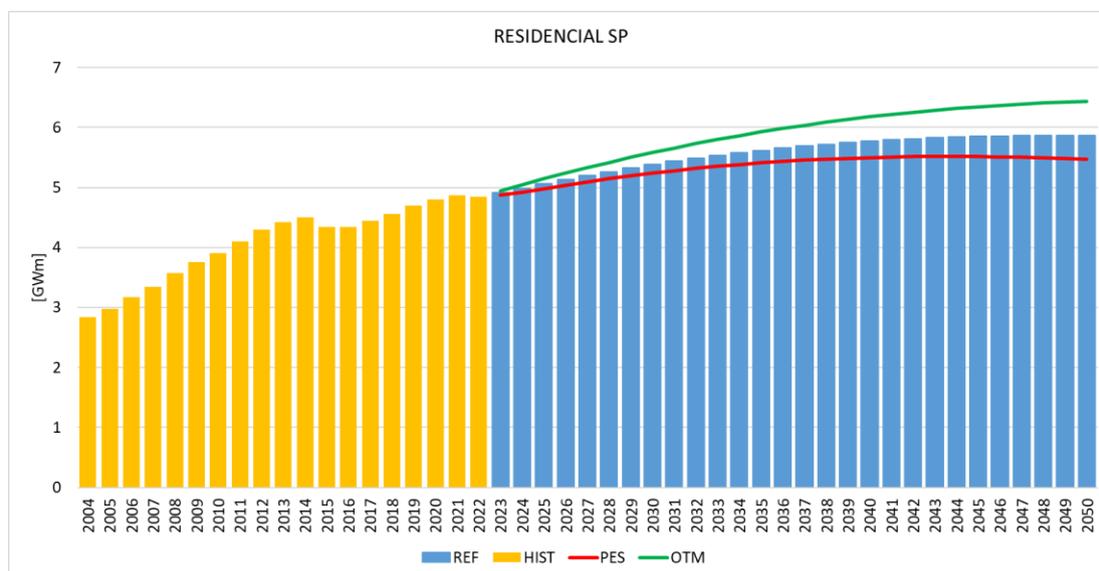
Figura 41 – Relação histórica e projeção do número de consumidores residenciais e população



Fonte: Elaboração própria

A metodologia considerando o PIB de Referência apresenta a projeção de demanda residencial com tendência de alta de 2022 até o ano de 2040. Após 2040 considera-se uma estagnação do consumo residencial acarretado principalmente por um crescimento do PIB inferior a 2% neste período, conforme apresentado na Figura 42.

Figura 42 - Consumo da Classe Residencial Estado de São Paulo



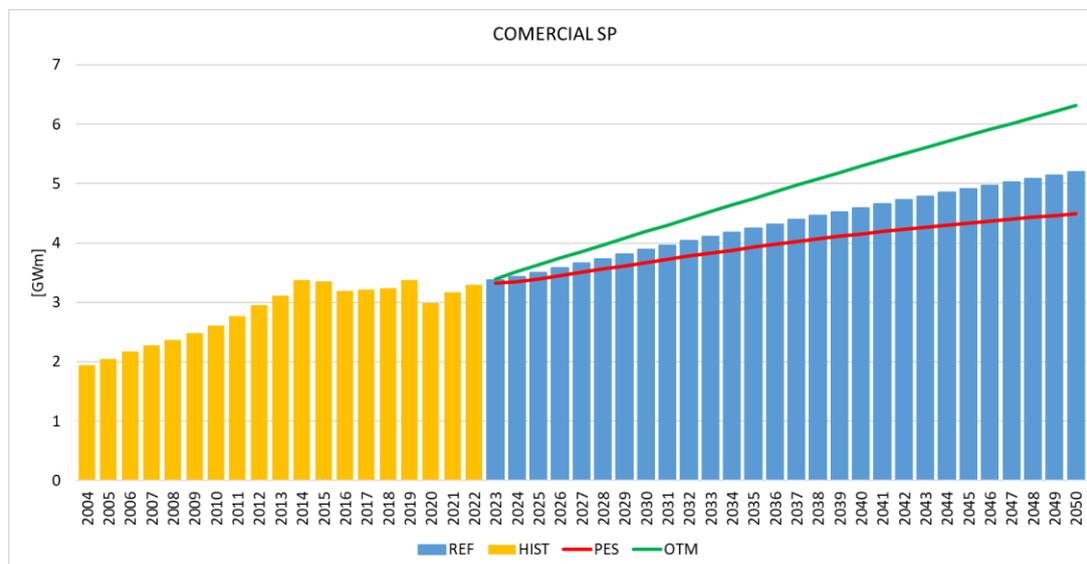
Fonte: Elaboração própria

### Projeção de consumo da Classe Comercial

Diferentemente do consumo residencial, o consumo comercial tem uma melhor resposta mesmo com taxa de crescimento de PIB menos elevado, apresentando

crescimento em todo o período projetado e alcançando 2050 com um consumo anual de 5,2 GWm, 64% maior que o realizado em 2021, conforme apresentado na Figura 43.

Figura 43 - Consumo da Comercial Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria

### Projeção de consumo da Classe Industrial

A classe industrial de consumo é a que mais sofre influências de variáveis macroeconômicas, não só do PIB interno como externo. Uma parcela do consumo industrial está atrelada a fatores internos e está associada ao consumo per capita. Essa parcela é denominada da indústria tradicional.

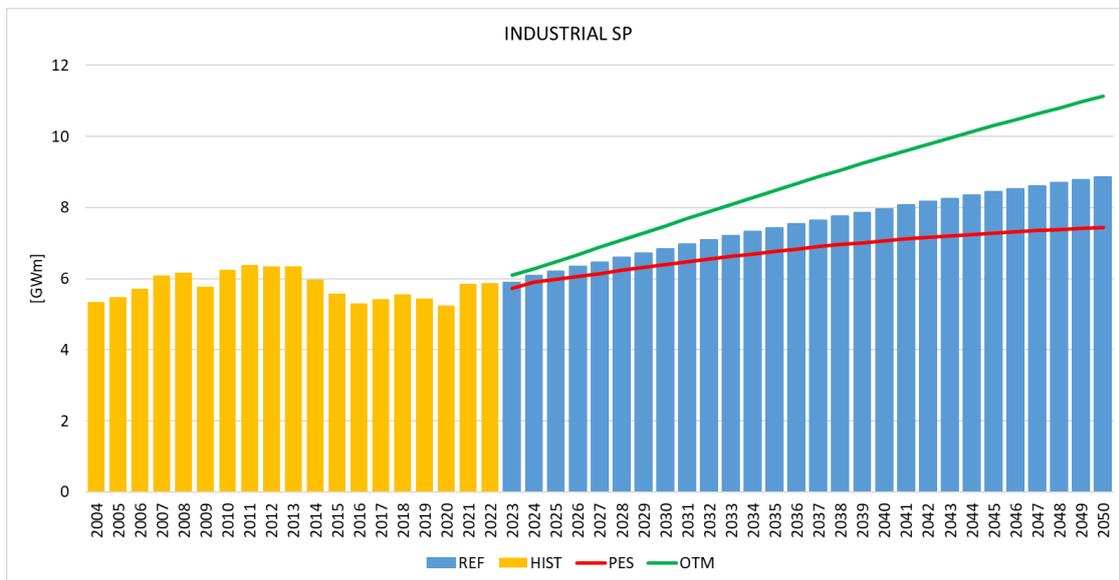
Contudo, ao comparar a elasticidade entre a indústria tradicional e o total do consumo do setor industrial nota-se uma estabilidade no consumo da indústria tradicional e uma sensibilidade maior com a variação do PIB em relação ao consumo industrial total.

Outro aspecto é a determinação de uma premissa inicialmente compatível com a abordagem simplificada dos outros setores, onde se determina a projeção da variação do PIB e crescimento populacional.

Os setores industriais serão inicialmente tratados conjuntamente (Cimento, Ferro Gusa e Aço, Ferro-Ligas, Mineração e Pelotização, Não-Ferrosos e outros da Metalurgia, Química, Alimentos e Bebidas, Têxtil, Papel e Celulose, Cerâmicas e Outros) mas poderão ser estratificados diante da necessidade. Essa necessidade se apresenta especialmente ao considerar políticas de incentivo em determinados setores da indústria e ao se projetar cargas com porcentagem significativa no consumo industrial como, por exemplo, produtores de alumínio.

A projeção do setor industrial conjunta considerando a elasticidade PIB São Paulo é apresentada na Figura 44, onde se observa a expectativa de retomada no consumo industrial de 6 GWm no ano de 2021 para 8,8 GW no ano de 2050.

Figura 44 - Consumo da Classe Industrial Estado de São Paulo

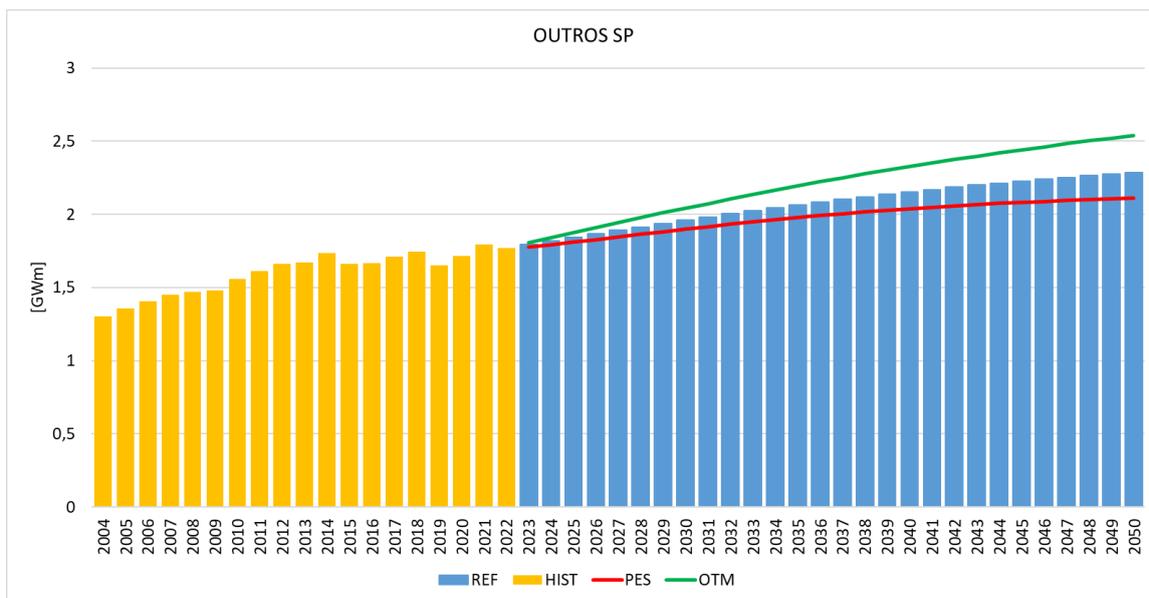


Fonte: Elaboração própria

### Projeção de consumo da Classe Outros

Assim como o consumo residencial a projeção para o Consumo de Outros tem um menor crescimento devido aos PIB considerados após 2040 (Figura 45).

Figura 45 - Consumo da Classe Outros Estado de São Paulo

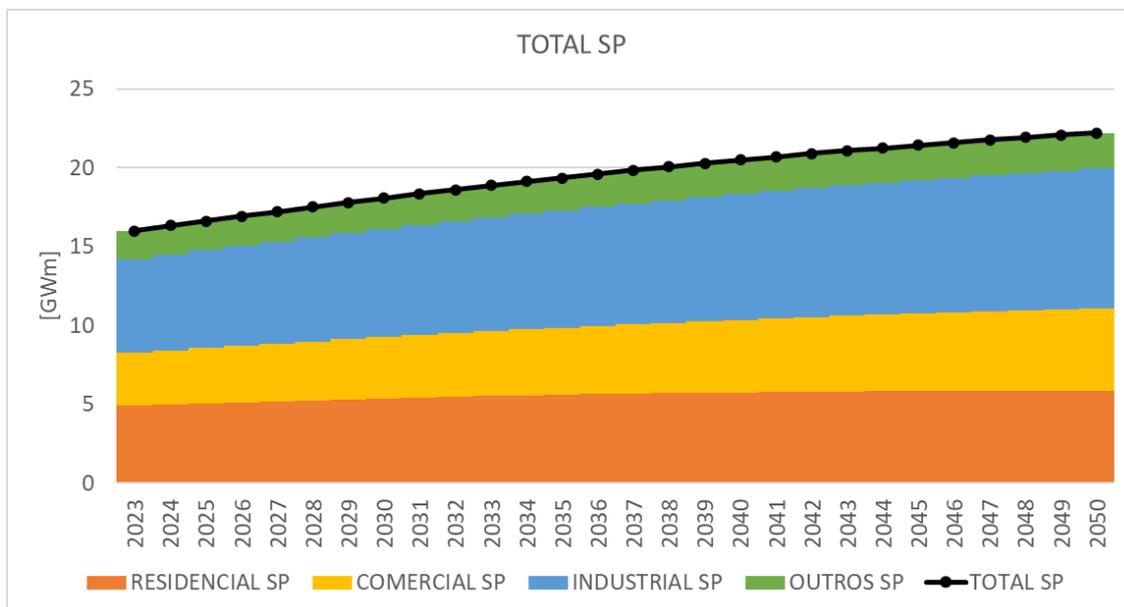


Fonte: Elaboração própria

### Projeção de consumo Total pelo PIB

Considerando a projeção de consumo apresentada na Figura 46, verifica-se um aumento de 40,7% de 2022 até 2050, sendo a maior participação neste valor do crescimento da indústria (50,8% de aumento no mesmo período).

Figura 46 - Consumo por Classe Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria

Entretanto este crescimento para o cenário de referência é antes de se contabilizar ganhos com eficiência energética, geração distribuída, redes inteligentes e perdas,

além de não computar o aumento de consumo pela eletrificação de processos produtivos e produção de hidrogênio de baixo carbono.

### Projeção da carga na barra da geração

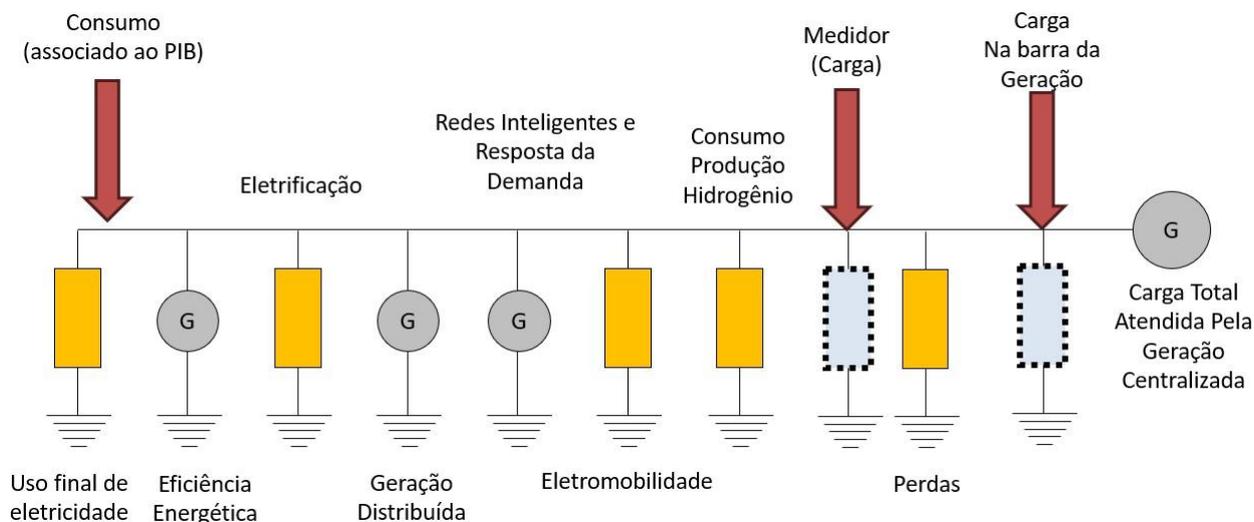
Considerando-se a projeção de crescimento macroeconômico de referência, utilizado como base para elaboração de todo o plano de energia, a projeção da demanda por energia elétrica, por ser essencial na definição do planejamento da expansão e da operação do setor elétrico e por influenciar diversas decisões dos agentes, representa o primeiro passo para nortear a elaboração de todo o plano do ponto de vista do setor elétrico.

As projeções da demanda de eletricidade no curto prazo afetam a operação do sistema e estão associadas principalmente a questões conjunturais, como por exemplo, a ocorrência de frentes frias ou ondas de calor, enquanto as projeções de mais longo prazo estão fortemente atreladas à evolução das variáveis estruturais da economia, demografia e da dinâmica dos diferentes setores das atividades econômicas, bem como às mudanças nos hábitos de consumo.

A metodologia de projeção da demanda de energia elétrica aplicada neste trabalho utiliza-se de um modelo de previsão estatístico econométrico tradicional (“*top-down*”), similar ao modelo utilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que considera as variáveis estruturais disponíveis para as análises, como a evolução da economia e crescimento populacional, com a possibilidade de realizar estudos de sensibilidade quanto aos critérios de eficiência energética, agregação de perdas e cenários de geração distribuída atrás do medidor, provenientes de modelos “*bottom-up*”. A projeção de demanda por eletricidade para o Estado de São Paulo levou em conta a projeção do cenário de Referência para a evolução da economia que foi elaborada pela LCA Consultoria, equipe agregada aos trabalhos nesta segunda fase do projeto, conforme já citado.

A evolução da geração distribuída atrás do medidor, além de aspectos relacionados à eletrificação da frota veicular circulante, dentre outros aspectos, impactam na definição do consumo de energia elétrica. Desse modo, apresenta-se, na Figura 47, as definições associadas ao Consumo, que com a evolução no perfil do consumidor, necessita da determinação do ponto da cadeia de geração até o consumo, a que se refere a grandeza calculada ou medida, como por exemplo, a carga na barra do consumo que se refere ao consumo efetivamente realizado pelo consumidor, a carga no medidor, que é o valor medido no ponto de faturamento do consumo e a carga na barra de geração, destacando-se assim, que com a evolução nas características dos consumidores de eletricidade, é relevante destacar a que conceito a grandeza projetada se refere.

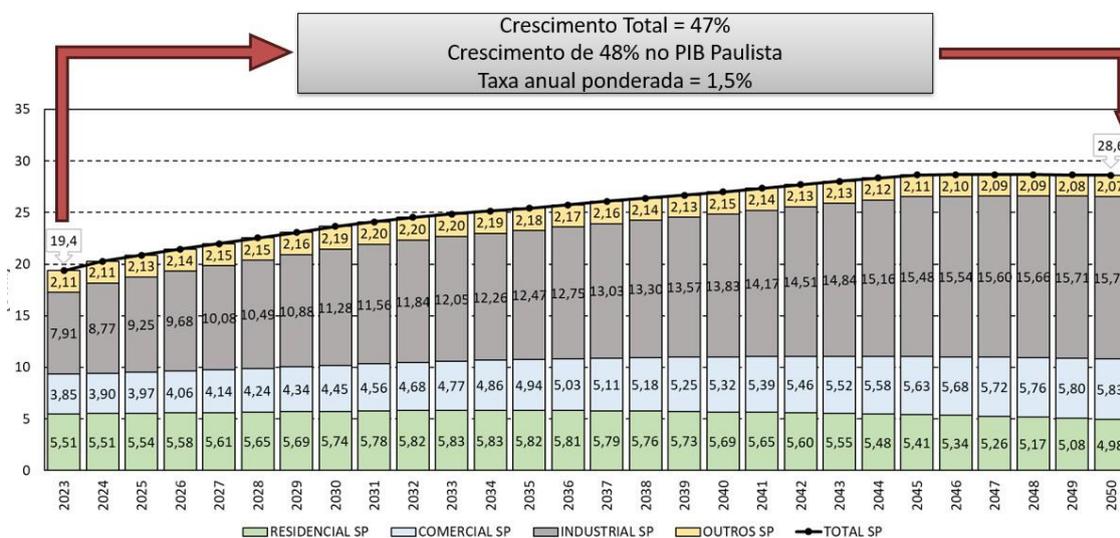
Figura 47 - Conceitos associados ao consumo e à carga de eletricidade



Fonte: Elaboração própria

A quantidade de eletricidade no ponto de consumo está diretamente conectada ao crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) da economia como um todo. Esta grandeza é a base das projeções do lado do consumo. Entretanto, para efeito de avaliação da necessidade de expansão da geração, a grandeza que se utiliza como referência é a carga na barra da geração, que agrega todos os fatores relevantes para se dimensionar a expansão da capacidade de geração centralizada necessária para fazer frente à demanda, inclusive às perdas de transmissão e de distribuição. Na Figura 48 apresenta-se a evolução da carga na barra de geração para o Estado de São Paulo no horizonte 2023/2050, fruto dos estudos e cálculos de projeções elaboradas no âmbito deste projeto, reforçando-se que o cenário de crescimento da economia considerado foi o cenário de referência.

Figura 48 - Crescimento da carga de eletricidade na barra de geração para o Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria

Observe-se que o crescimento total da carga na barra de geração no horizonte 2023/2050 é da ordem de 47%, que significa cerca de 1,5% na taxa média ponderada anual dentro do período (TCMA), destacando-se que o crescimento total esperado para o PIB no cenário de referência é da ordem de 48%, conforme ilustrado na Figura 76.

As projeções de consumo e carga apresentadas levam em conta as expectativas de redução de consumo de eletricidade através de programas de eficiência energética, fator crucial para alcançar as metas de redução de emissões de GEE's. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), é possível reduzir o consumo de energia em 35% e aumentar a eficiência energética na economia em 4% ao ano até 2030, sem comprometer o desenvolvimento socioeconômico dos países (IEA, 2021).

No Estado de São Paulo, em um cenário de implementação bem-sucedida de medidas de mitigação de emissões para atingir a meta de emissão zero, estima-se uma redução de 34,7% no consumo de eletricidade em 2050, frente ao consumo que ocorreria naquele ano, na hipótese de não se adotar programas de efficientização no consumo. Essa redução seria composta por 28,7% no setor residencial, 28,3% no setor comercial, 41,9% no setor industrial e 36,7% nos demais setores, em comparação com um cenário sem adoção de políticas públicas voltadas à redução nas emissões.

No que diz respeito a outras fontes de energia, além da energia elétrica, a eficiência energética poderia representar uma redução de 30,4% na demanda em relação ao cenário sem políticas de redução nas emissões, composta por queda de 43,9% no setor residencial, 29,6% no setor comercial, 30,5% no setor industrial e 12,4% nos demais setores.

Esses elementos trazidos pelo tema da eficiência energética foram considerados respectivamente, para o cenário pessimista, a situação em que não se teria ganhos de eficiência e no cenário base, ou de referência construído para dar suporte ao plano de energia do Estado visando o Net Zero, onde foram considerados os ganhos de eficiência tanto para a energia elétrica, quanto para os demais energéticos, incluídos os processos de efficientização no consumo dos edifícios.

As mudanças de comportamento e o acesso a novas tecnologias e informações por parte dos consumidores de eletricidade apontam para as necessárias e até certo ponto, urgentes adaptações na prestação dos serviços de eletricidade aos consumidores, que cada vez mais, demandam tratamento dispensados aos clientes em um mercado de livre e adquirem a capacidade de interagir de forma biunívoca com a empresa prestadora dos serviços. Nesse contexto se inserem a Geração Distribuída atrás do medidor e as Redes Inteligentes de Energia ou *Smart Grids*, que são a

infraestrutura de transporte e logística necessária para integrar, habilitar e orquestrar, de forma otimizada, as medidas e tecnologias necessárias desde a produção de energia até o seu uso final pelos consumidores, para o atingimento da meta de balanço nulo de emissões até 2050.

O Setor Elétrico Brasileiro vem discutindo reformas no arcabouço legal e regulatório, na chamada “modernização do setor elétrico brasileiro”, focando na abertura do mercado de energia, a eliminação de subsídios e a reavaliação dos modelos de negócios do setor. Entretanto, o Programa não prevê os investimentos necessários na modernização dos sistemas de transmissão e distribuição (T&D) de energia elétrica.

Portanto, o papel do Governo do Estado de São Paulo nesta frente de atuação será fundamental para assegurar que a transição energética rumo à redução nas emissões de GEE’s seja viabilizada, integrando as demais frentes de ação e abrindo caminho para uma maior eletrificação da economia. Para isso são propostas 8 medidas principais, que em resumo, objetivam remover barreiras, facilitar e acelerar a transição tecnológica dos sistemas atuais de T&D para a incorporação de tecnologias de redes inteligentes e de resposta da demanda:

- Desenvolver política local para implementação de Medição Inteligente e Resposta a Demanda;
- Desenvolver incentivos à implantação de Armazenamento de Energia
- Incentivar empresas do setor elétrico e operadoras de telecomunicações para o compartilhamento de infraestruturas;
- Atuar para identificar gargalos e fragilidades de T&D, desenvolvendo planos especiais de renovação e de contingência para eventos climáticos extremos;
- Atuar junto a ANEEL / MME para remover barreiras regulatórias identificadas e desenvolver política local de incentivo a investimentos em modernização da infraestrutura;
- Incentivar Empresas e Consumidores a implementarem sistemas de geração local distribuída e sistemas de autoprodução, através de linhas de financiamento;
- Facilitar a adoção das tecnologias de redes inteligentes através de benefícios fiscais e isenções específicas ao longo de sua cadeia de suprimento, fomentando o desenvolvimento da indústria paulista;
- Exigir dos grandes consumidores e “prossumidores” o fornecimento de informações obrigatórias a respeito de seus recursos energéticos distribuídos e definir níveis mínimos de eficiência para suas instalações e edificações.

O estímulo, à Resposta da Demanda e aos Recursos Energéticos Distribuídos visam contribuir com a diretriz geral de minimizar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Estado de São Paulo. A expansão dos Recursos Energéticos Distribuídos

(REDS) a partir de fontes renováveis, a possibilidade de associação a Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias (SAEB), a participação em programas de Resposta da Demanda (RD) e novos modelos de negócios, estimularão o desenvolvimento de REDs com competitividade, segurança e sustentabilidade, levando-se em conta o cenário econômico de referência definido.

O ESP possui a maior capacidade instalada acumulada de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) no Brasil, e valores médios anuais de irradiação global horizontal diária similares aos de áreas do Nordeste. Mesmo assim, apresenta participação baixa da fonte solar em usinas de Autoprodução de Energia (APE) e de outras fontes que não a solar em MMGD.

Como Visão de Futuro, identifica-se que políticas nacionais existentes e metas definidas no Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo – Net Zero 2050 (PAC 2050) podem impulsionar o desenvolvimento de REDs no ESP no horizonte do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031. Porém, em uma visão de longo prazo, há necessidade de elaboração de um plano estratégico sobre RED's em âmbito nacional e o desafio da participação do ESP como stakeholder das instituições setoriais neste processo, de maneira a nortear um desenho de mercado e orientar as evoluções regulatória e normativa levando em conta metas de redução de emissões de GEE.

As macroações recomendadas para o ESP buscam a expansão de Micro e Mini Geração Distribuída - MMGD e Usinas de Autoprodução de Energia - APE baseadas em Usinas Fotovoltaicas- (UFV, que não emitem Gás de Efeito Estufa - GEE em sua operação, bem como o uso de Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias - SAEB e participação em Resposta da Demanda - RD para benefícios individuais e sistêmicos, além do desenvolvimento de novos modelos de negócios, por meio de ações do ESP que envolvem:

- (i) estímulo a públicos-alvo;
- (ii) atuação como stakeholder de instituições setoriais;
- (iii) incentivo à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I); e
- (iv) capacitação profissional e tecnológica.

Estas recomendações têm por objetivo direcionar as rotas tecnológicas consideradas mais adequadas para que os Recursos Energéticos Distribuídos - RED contribuam com a diretriz geral de zerar o balanço das emissões de Gás de Efeito Estufa - GEE no ESP até 2050.

## Considerações finais sobre a demanda de eletricidade

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta demonstram que a despeito do decaimento das taxas de evolução do PIB de São Paulo no horizonte de 2023 a 2050, a expectativa de crescimento na carga líquida do Estado é da ordem de 9,2 GWmed, já descontando a geração distribuída que reduz a carga a ser atendida pela expansão da capacidade de geração centralizada.

O Estado de São Paulo é importador líquido de energia elétrica e portanto, para garantir a trajetória de emissão de GEEs líquida reduzida até 2050 e ao mesmo tempo, garantir o suprimento da eletricidade necessária ao seu crescimento econômico, deverá promover as políticas de geração interna com menores emissões do que as observadas no Sistema Interligado Nacional.

As projeções elaboradas neste trabalho dimensionam o esforço necessário para atingimento da meta de reduzir-se o balanço de emissões.

Os cenários de evolução do consumo e da carga de energia elétrica elaborados servirão de base para a definição das políticas do setor de energia elétrica paulista visando a redução das emissões de GEE no horizonte de análise.

Dado que a evolução no consumo de eletricidade está condicionada à evolução da economia, que apresenta diferentes tendências ao longo do tempo, é essencial que para a adequada avaliação das políticas de redução da emissão de GEEs, se promovam revisões periódicas dos trabalhos, em período de no máximo 4 (quatro) anos, realizados neste projeto, de modo que eles sejam atualizados periodicamente, em função das mudanças nas expectativas da economia, para que se possa acompanhar o traçado da curva de redução nas emissões de forma coerente com a realização da demanda por eletricidade.

## Eficiência Energética

Seguindo-se o modelo econométrico para projeção de demanda elétrica, foram projetados os percentuais de eficiência energética segundo dois cenários:

- ✓ **Pessimista:** onde o incremento setorial de eficiência energética é aquele que acontece naturalmente pela evolução tecnológica do mercado;
- ✓ **Referência:** onde, mediante sucesso das políticas estaduais Net Zero, o incremento setorial de eficiência energética é decorrente da inserção de equipamentos, processos e projetos integrados com ganhos sistêmicos e tecnológicos além do usual.

As projeções foram estratificadas pelos setores: residencial, comercial, industrial e outros. De forma geral, independentemente do tipo de cenário, haverá ganhos anualizados de EE na energia elétrica ao longo de todo o período projeto.

No caso do cenário Pessimista (PES), o menor ganho consolidado ao longo do período é do setor industrial (9,2%) seguido por outros (9,5%). Esse baixo ganho de eficiência do setor industrial, também se reflete no baixo ganho de eficiência global (13,2%), como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - percentuais consolidados por setor para todo o período até 2050

Eficiência Energética - EE [%]									
RESIDENCIAL		COMERCIAL		INDUSTRIAL		OUTROS		Total	
Pess.	Ref.	Pess.	Ref.	Pess.	Ref.	Pess.	Ref.	Pess.	Ref.
17,4%	28,7%	16,8%	28,3%	9,2%	41,9%	9,5%	36,7%	13,2%	34,7%

No cenário de Referência, que considera a aceleração da economia combinado com forte impulso industrial e políticas de eficiência energética voltados às diversas frentes de uso da energia do setor como processo de frio, força motriz e melhores projetos, o setor apresenta ganho porcentual ao longo de (41,8%), seguido por outros. Esses ganhos são impulsionados pelos ganhos sistêmicos que o setor industrial está sujeito a receber, como readequação de tubulações, utilização de energia de outros processos, substituição de equipamentos, retrofit das unidades (Figura 49).

Figura 49 - Ganhos anuais de eficiência energética Consolidado – cenário base e pessimista

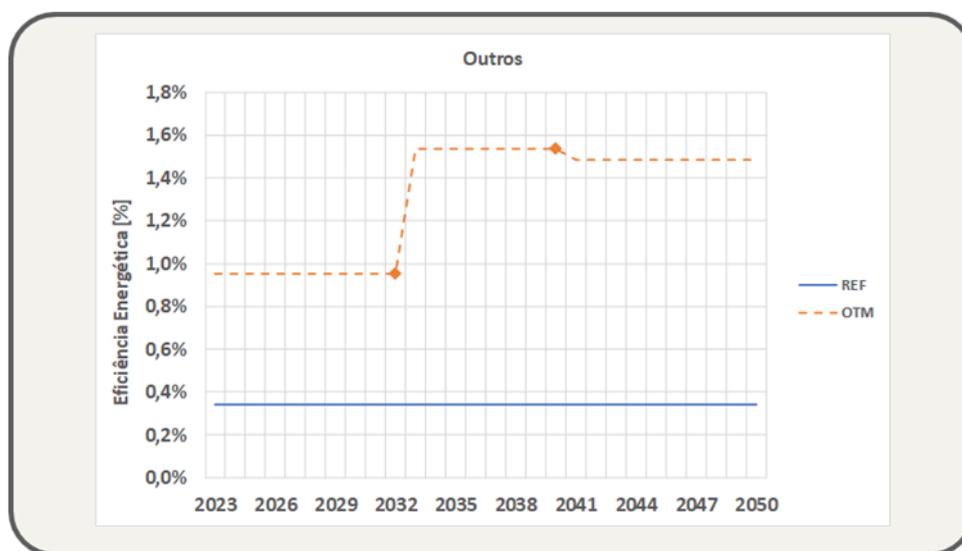
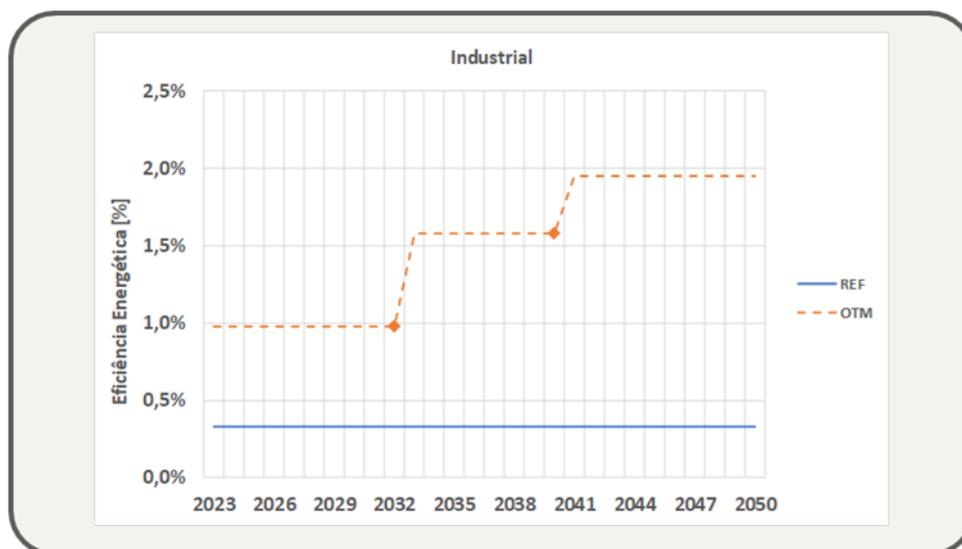
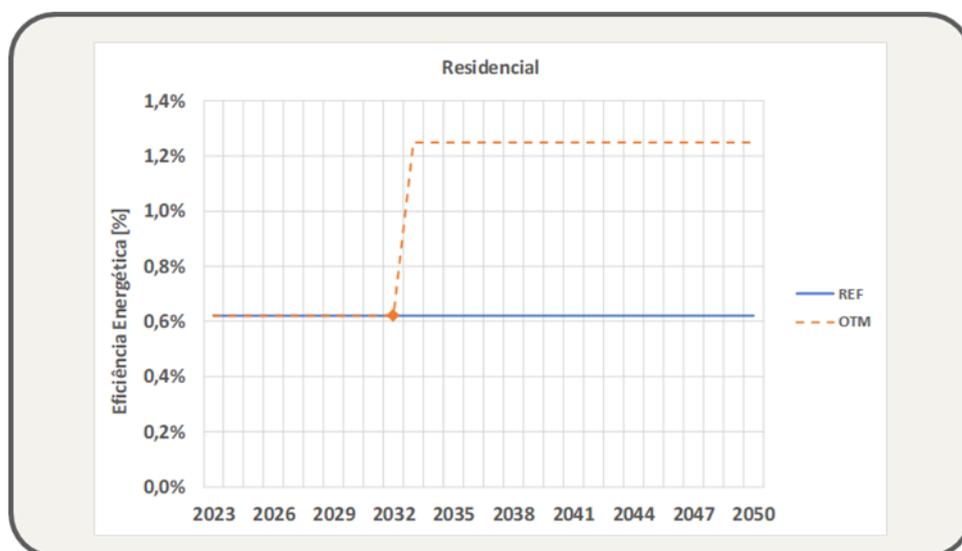


Figura 50 - Ganhos anuais de eficiência energética Setor Industrial – cenário base e pessimista



O Setor Residencial possui uma inércia na primeira década, muito relacionada ao atraso inercial no acesso às novas tecnologias e equipamentos disponíveis no mercado internacional, além de um processo demorado de adaptação das melhores práticas construtivas para as novas unidades residências. Nesse caso, os ganhos de eficiência anual nos dois cenários são equivalentes (0,6% a.a.), tendo alteração no início da década de 2030, quando se projetam ganhos de eficiência (1,3% a.a.) nas novas construções habitacionais e inicia-se o processo de readequação dos projetos de grandes centros habitacionais com vistas à eficiência (Figura 51).

Figura 51 - Ganhos anuais de eficiência energética Setor Residencial – cenário base e pessimista



Embora não extensivos a todos os usos finais, estudos internos do GEPEA-USP (Gimenes, 2021) mostram que a penetração das lâmpadas LED no mercado residencial de baixa renda ainda é pouco expressiva. No condicionamento ambiental, os estudos

do (IEA,2018) mostram que as tecnologias ofertadas no mercado brasileiro não são as mais eficientes.

Atrelado a isso, há a substituição de equipamentos de refrigeração antigos, por novos e mais eficientes; toda a iluminação residencial existente no Estado é estritamente por LED de alta eficiência; e considera-se o início do desuso de equipamentos com baixa eficiência em todo o Estado.

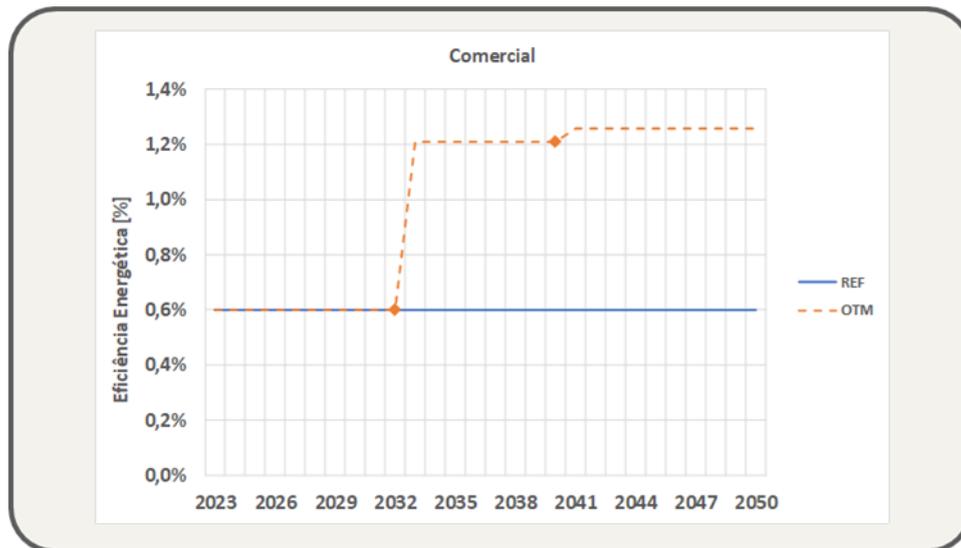
Embora seja considerada a supressão de parte da demanda reprimida das famílias, principalmente de baixa renda, em relação a equipamentos eletroeletrônicos, e de média renda a partir da utilização de equipamentos de conforto térmico, esses equipamentos serão de alta eficiência, acompanhando a projeção de ganho de eficiência mundial estabelecidos no Reports do IEA (2021) e EPE (2021).

Ainda assim, espera-se um crescimento de até 40% no consumo elétrico nas residências de pessoas de alta renda devido à ampliação de equipamentos para conforto térmico – frio e quente -, que pode inclusive ser intensificado pelas mudanças climáticas, ponto fortemente indicado como objeto de pesquisas para os próximos anos. Portanto, o consolidado de ganho de eficiência do setor é de aproximadamente 17% para o cenário Pessimista e de 28% para o de Referência.

Os Setores Comercial e Residencial possuem uma inércia na primeira década, resultando num ganho de eficiência de 0,6% a.a. em ambos os cenários.

No entanto, haverá alteração dos ganhos de eficiência no início da década de 2030, quando se projetam ganhos de eficiência de (1,2% a.a.) relacionados a ampliação das ações de EE nas grandes unidades comerciais do país. Tais ganhos são esperados a partir da readequação dos edifícios; substituição de equipamentos de refrigeração e climatização; por novos e mais eficientes; utilização de monitoramento e recursos IoT. Essas ações nas grandes unidades comerciais tendem a induzir o processo de efficientização das médias e pequenas unidades, tanto que, a partir da década de 2040 há um incremento do ganho de eficiência, que passa a ser de 1,4% a.a. (Figura 52).

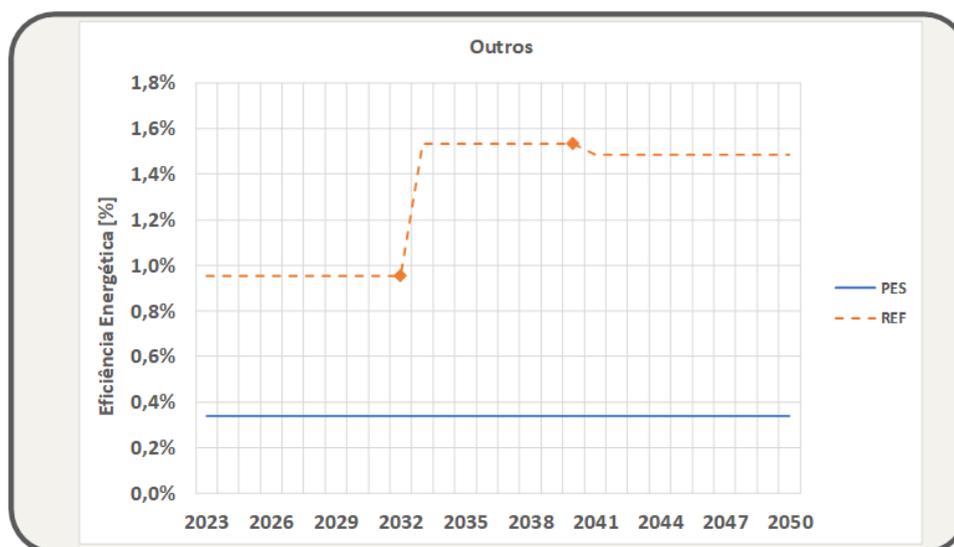
Figura 52 - Ganhos anuais de eficiência energética Setor Comercial – cenário base e pessimista



A evolução da eficiência nos estabelecimentos comerciais de pequeno e médio porte se dá principalmente pela dinâmica de abertura e fechamentos dessas unidades ao longo do tempo, implicando na readequação dos estabelecimentos aos novos padrões e regulações de eficiência considerados no cenário. Por fim, o consolidado de ganho de eficiência do setor é de aproximadamente 17% e 28%, respectivamente para os cenários Tendencial e Otimista, pouco menor que os ganhos de eficiência do setor residencial.

No caso dos demais setores, é exigido, já para o ano de 2030, que toda a iluminação pública seja de lâmpadas de LED de alta eficiência, com potencial de redução do consumo em até 30%. Esse fator, permite que o necessário Pessimista tenha ganho de eficiência anual (0,3% a.a.) inferior ao ganho de eficiência anual do cenário Referência (1,0% a.a.) já nos primeiros anos da projeção (Figura 53).

Figura 53 - Ganhos anuais de eficiência energética Demais Setores– cenário base e pessimista



A partir da década de 2030 haverá um incremento do ganho de EE ao longo da década (1,53%), resultante do processo de eficientização dos prédios públicos estaduais e posterior fomento à eficientização de outros prédios públicos não vinculados ao Estado. Vale lembrar que, segundo o PROCEL (2019) é possível reduzir o consumo de uma edificação em 30% ao realizar reformas em edifícios existentes de acordo com as instruções de etiquetagem do PBE-Edifica, procedimento já existente. Esse ganho pode ser ainda maior com a construção de novos edifícios podendo atingir 50%.

Essas ações deverão tornar-se menos comuns a partir da década de 2040, devido ao atingimento de grande parte dos edifícios públicos e passam a se concentrar nos ganhos de eficientização a partir da modernização e aparecimento de novas tecnologias de climatização, iluminação e bombeamento de água, dando à última década do período projetado, um ganho de eficiência anual esperado de 1,48% a.a. Ao final do período projetado, eficiência dos demais setores é de aproximadamente 10% e 37%, respectivamente para os cenários Pessimista e Referência.

### Propostas para o cumprimento das metas de eficiência energética

Na Tabela 3 são apresentadas as ações propostas para cumprimento das metas de eficiência energética apresentadas no PEE/SP 2050. Essas ações são acompanhadas de seus respectivos objetivos, desafios e potenciais impactos.

Tabela 3 - Ações propostas para o cumprimento das metas de eficiência energética

Ação proposta	Objetivo	Potenciais impactos
Fortalecimento do mercado de usos finais eficientes	Ações de cunho fiscal no Estado para maiores alíquotas em tecnologias ineficientes e menores nas eficientes com especial atenção aos usos finais de maior impacto no consumo de energia do Estado.	Essa medida visa inibir a compra de tecnologias baratas, porém obsoletas e ineficientes. Como risco identifica-se o fato dos consumidores poderem adquiri-las em outros Estados.
	Exigência crescente nos padrões de eficiência energética para aumentar a eficiência dos equipamentos e processos.	Ações para exigência continuamente crescente nos padrões de eficiência energética em equipamentos fabricados nacionalmente ou importados, com a previsão de descontinuação no mercado de tecnologias obsoletas e sabidamente ineficientes.
	Criação de uma comissão para avaliação contínua dos resultados das políticas em curso	Essa medida visa ampliar as discussões e o monitoramento das políticas de eficiência implantadas no Estado, além de dar subsídios as melhorias, ajustes e modernização das políticas existentes.
	Criação de um programa de estímulo a renovação do parque de iluminação pública dos municípios do Estado com linhas de financiamento incentivadas às PPPs	Diminuição do consumo de energia do setor público, melhoria da iluminação pública (IP) e formação de profissionais especializados e atração e fixação de empresas e fornecedores de equipamentos e serviços no Estado.
	Criação de um programa de efficientização dos prédios públicos do Estado	Diminuição do consumo de energia em prédios públicos, ampliação do mercado de eficiência energética no Estado, com atração de empresas, profissionais e ampliação da arrecadação do Estado. Essa ação acarretaria o desenvolvimento de uma cadeia de serviços e de trabalhadores capacitados no Estado, permitindo inclusive à redução dos custos de projetos de eficiência, tornando os projetos mais acessíveis ao setor privado, ou seja, resultando num Estado indutor de eficiência.
	Criação de um programa de regularização, efficientização dos usos finais em consumidores de baixa renda	Diminuição das perdas comerciais de energia, regularização das ligações ilegais e identificação das populações vulneráveis e sem acesso moderno e legal as fontes de energia.  Esse programa pode resultar num arranjo de política pública que seja exemplo para a Federação, ao conceder acesso à energia, seja de

		forma subsidiada pelo Estado seja a partir da gratuidade do acesso. Resultando na melhoria da gestão do sistema e diminuição do valor da tarifa paga pelos consumidores regulados.
	Criação de um programa para substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares com complementação elétrica por chuveiros eletronicamente controlados	Diminuição do consumo de energia elétrica, principalmente no setor residencial, com impacto direto no valor pago pelo consumidor, gerando benefícios sistêmicos como diminuição do atraso do pagamento das contas de energia elétrica, aumento da adimplência, redução das perdas comerciais.
Indução de Ganhos sistêmicos	Criação de obrigatoriedade de reuso de água em edificações no Estado	Essa medida tem efeito <i>duo</i> , ao diminuir o consumo de água potável no Estado e ao mesmo tempo diminuição do consumo de energia elétrica nas estações de tratamento e bombeamento de água.
	Ação de conscientização de consumidores de todos os setores e disseminação do conceito de uso racional e eficiente de energia no Estado	Ao conscientizar a população sobre os hábitos de consumo e as medidas de eficiência energética, cria-se uma massa crítica que pensa e age de forma a diminuir o consumo de energia elétrica no dia a dia e conscientiza os consumidores a adquirirem equipamentos mais eficientes.
	Ação criação de um Grupo de trabalho para estabelecer uma política de pesquisa sobre ganhos sistêmicos em eficiência energética.	<p>Pesquisa para subsídios à uma formação em projetos permeada por conceitos de eficiência energética.</p> <p>Pesquisa para subsídios à revisão/ ampliação de normas técnicas diversas em construção civil, hidráulica, condicionamento ambiental etc. de forma que projetistas possam ter embasamento normativo para especificações eficientes.</p> <p>Criação de cursos para disseminação do conhecimento adquirido</p>

### Pontos Fortes e Fracos para Eficiência Energética no Estado

A eficiência Energética foi pensada em termos de duas vertentes principais: Evolução Tecnológica e Ganhos Sistêmicos. Na Figura 54 e Figura 55 são resumidos os principais pontos fortes e pontos fracos de cada vertente para o Estado de São Paulo.

## Considerações Finais – Eficiência energética

Os principais resultados demonstram que:

- ✓ No cenário global para alcançar o Net Zero são necessários + 4% a.a de incremento na eficiência energética. No Cenário Pessimista o valor alcançado é 0,5% a.a. e no cenário de Referência é de 1,6% a.a., demonstrando que ainda haverá espaço para ganhos de eficiência e modernização dos equipamentos, processos e usos da energia elétrica em todos os setores da economia paulista.
- ✓ O setor industrial tem grande impacto na totalização dos ganhos de EE do Estado de São Paulo. Nesse caso, deve-se aprofundar a medição e monitoramento dos diferentes subsetores da cadeia industrial, de modo a permitir a melhor identificação, elaboração e efetivação e de políticas públicas específicas para este setor no Estado de SP.
- ✓ A reestruturação de normas de construção, a exigência de certificações em novos edifícios, a readequação de edifícios públicos como vetor de desenvolvimento barreiras aos equipamentos de baixa EE no Estado de SP, e a estruturação de programas integrados de capacitação em EE, são de fundamental importância para se alcançar os ganhos sistêmicos;
- ✓ As leis e as normas para que o Estado de São Paulo atinja as metas *Net zero* gerarão demanda por tecnologias eficientes, profissionais e empresas especializados. Nesse sentido, espera-se que o Estado desenvolva políticas públicas de atração e fixação de empresas de serviços e fabricantes de equipamentos de usos finais mais eficientes. Ademais, o Estado deve fomentar e fortalecer a pesquisa e o desenvolvimento com suporte da FAPESP e dos centros de Pesquisa das Universidades Estaduais Paulistas. Caberá também ao Estado fomentar uma política de capacitação necessária aos ganhos sistêmicos, por meio da ampliação e instrumentalização das Fatec para formação de pessoal técnico (Figura 56).

Figura 54 - Principais Pontos Fortes e Pontos Fracos – Eficiência Energética – Evolução Tecnológica

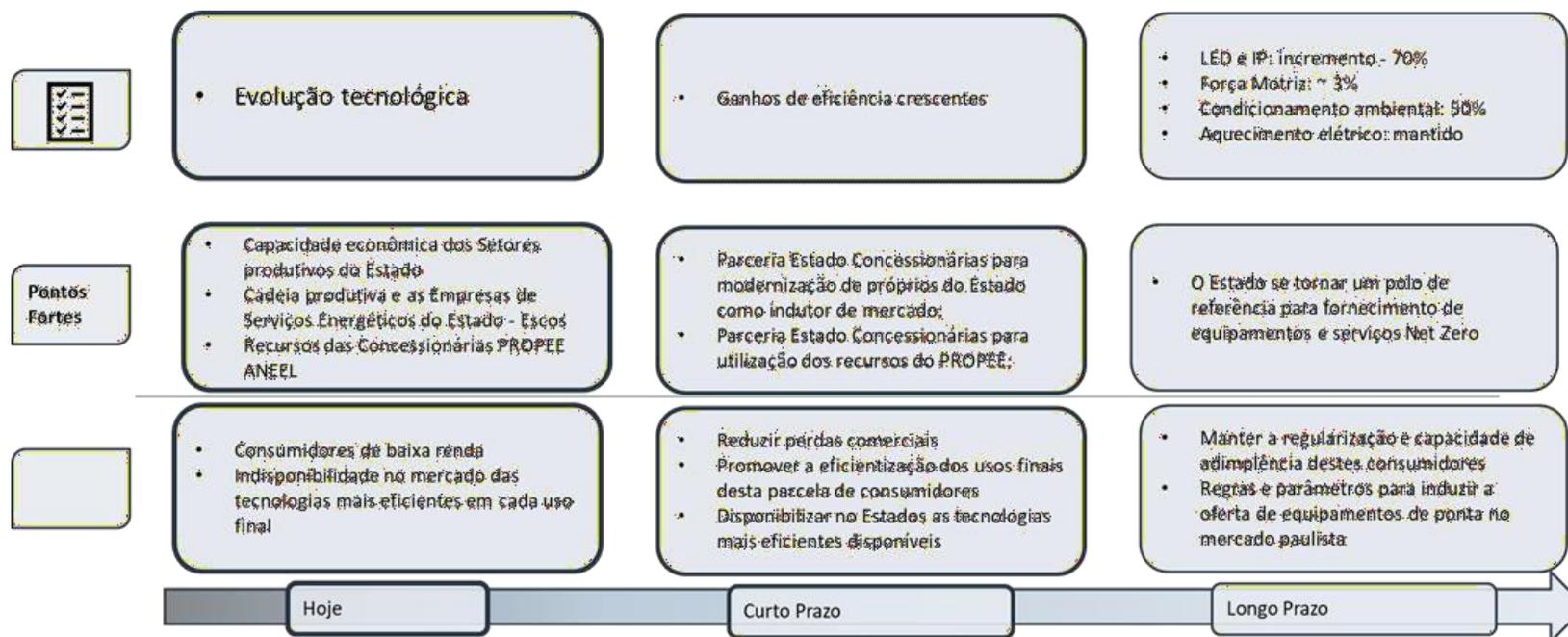


Figura 55 - Principais Pontos Fortes e Pontos Fracos – Eficiência Energética – Ganhos Sistêmicos

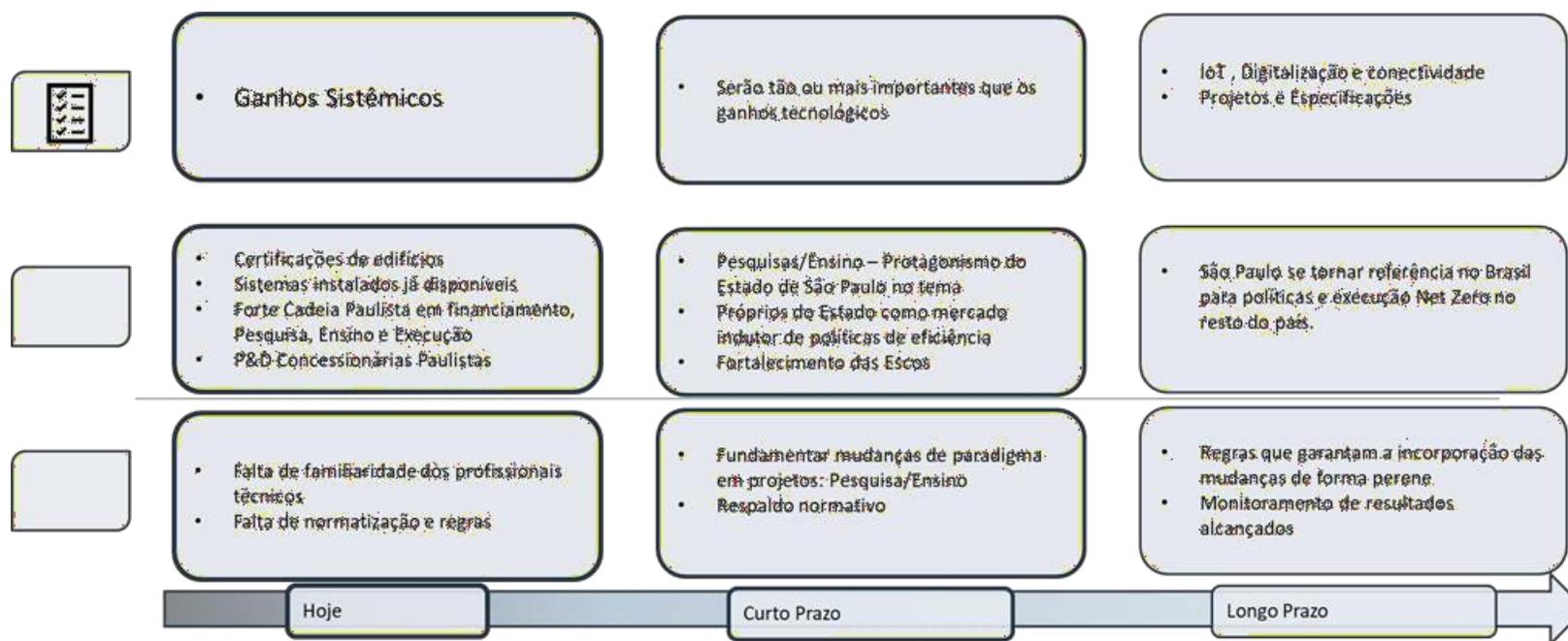
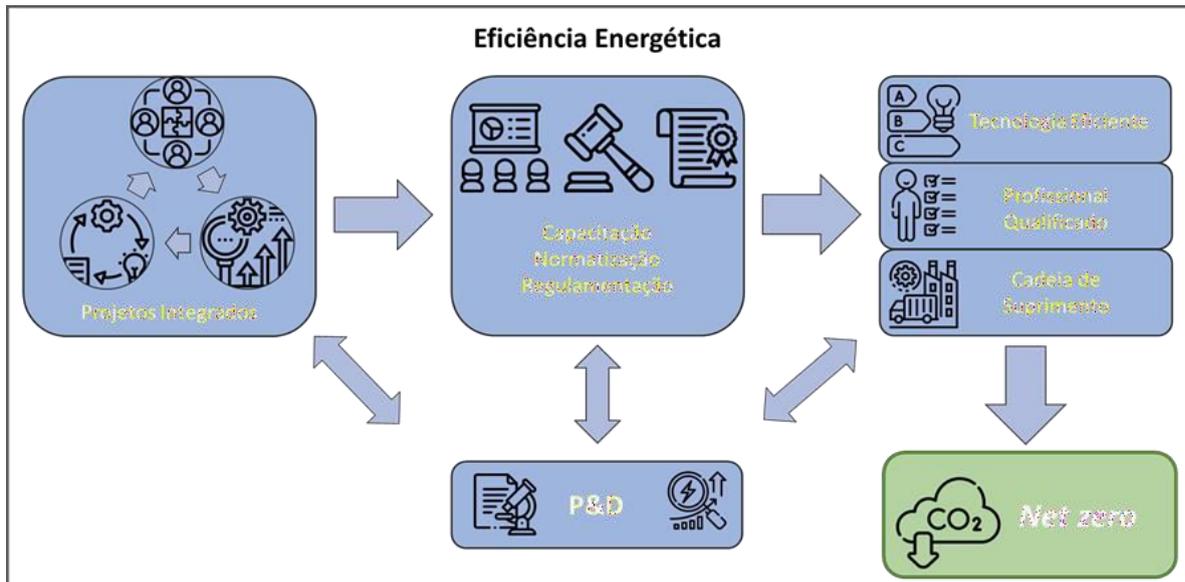


Figura 56 - Diagrama de ações visando ganhos sistêmicos de eficiência energética.



- ✓ A eficiência nos usos finais beneficia, de imediato, os consumidores do setor produtivo devido a redução dos custos com insumo energético, o que se traduz em ganhos de competitividade. Já para os consumidores residenciais, a eficiência se traduz em redução de custos com a fatura de energia. Para os socialmente vulneráveis, aumenta sua capacidade de adimplência e garantia de acesso à energia com concomitante direcionamento dos recursos economizados para outras necessidades básicas. Para estes últimos, o Estado deverá ter políticas para regularização e eficiência de forma a se reduzirem as perdas comerciais e seus impactos econômicos sobre os demais consumidores e sobre a eficiência do setor.
- ✓ Além do surgimento das novas tecnologias que, geralmente são importadas, caberá ao poder público criar assimetrias de mercado de forma que equipamentos menos eficientes sejam preteridos pelo consumidor. Tais assimetrias devem, evidentemente, ultrapassar o Estado de São Paulo. É imperioso que, inclusive pela sua grande representatividade, haja maneiras de promover a eficiência dos sistemas em usos nos clientes de baixa renda, pequenos comércios e demais que tenham maiores dificuldades de investimento, barrando a evolução tecnológica de ser absorvida por esses setores.
- ✓ O estado de São Paulo, cujo protagonismo e pujança econômica já fazem com que a implantação das melhorias tecnológicas seja competitivamente absorvida pelos setores industrial e comercial, deverá criar políticas para direcionar o setor. Além dos ganhos sistêmicos, a evolução tecnológica, especialmente nos

sistemas de iluminação, condicionamento ambiental, aquecimento e força motriz precisam ser incorporados às edificações em todos os setores.

Por fim, como parte dos desafios à eficiência energética no Estado de São Paulo podem-se destacar:

- Inibir a opção dos consumidores por soluções tecnológicas obsoletas e sabidamente ineficientes, porém mais baratas;
- Capacitar o mercado para responder às demandas Net Zero: pesquisa, ensino e capacitação técnica e de nível superior, com a sugestão de criação de um centro para direcionamento e coordenação de pesquisas em eficiência energética que fundamente a formação acadêmica de projetos eficientes nas diversas modalidades de engenharia e arquitetura, bem como a atualização de normas em construções, sistemas hidráulicos, mecânicos e elétricos para embasar e respaldar projetos eficientes. As ações desse centro deverão estar articuladas com FAPESP, universidades estaduais e SEMIL, ABNT.
- Em termos financeiros, o Estado de São Paulo deverá articular a captação de recursos junto ao PROCEL/Eletróbrás e junto ao PROPEE das Concessionárias de Distribuição de energia Elétrica do Estado.
- Avançar na normatização com vistas à eficiência;
- Gerir os desafios dos consumidores de baixa renda: regularização almejando à redução de perdas comerciais, adimplência, acesso a crédito subsidiado e às tecnologias eficientes;
- Modernizar os edifícios do Estado de forma a ser indutor do mercado;
- Criar padrões de eficiência e emissões para as edificações públicas e privadas no Estado;
- Articular - Estado de São Paulo - a captação de recursos junto ao PROCEL/Eletróbrás e junto ao PROPEE das Concessionárias de Distribuição de energia Elétrica do Estado;
- Determinar os ganhos decorrentes das mudanças de construção usual de edificações. Para isso, são necessárias pesquisa que fundamentem e quantifiquem ganhos de eficiência e as possíveis alterações. Este conhecimento irá fundamentar, por exemplo, a alteração de normas de cabeamento elétrico ou dimensionamento de tubulações com especificações mais abrangentes que os atuais, incluindo desempenhos energéticos. A alteração de normas, aliada a uma formação permeada por tais especificações, permitirão aos projetistas elaborarem, com respaldo normativo, projetos integrados e eficientes.

## **Demanda de energia elétrica para produção de hidrogênio de baixo carbono**

Atualmente, há no estado de São Paulo uma produção de cerca de 10 kt/ano de hidrogênio proveniente de processos de eletrólise (subproduto da indústria de cloro-soda, principalmente), que demanda da ordem de 500 GWh/ano de energia elétrica. Com a evolução desse setor, seguindo o PIB industrial paulista, prevê-se que essa demanda deverá atingir 700 GWh em 2050. No momento, a energia elétrica empregada é, essencialmente, a disponível na rede elétrica. De forma a contribuir com a descarbonização da indústria do estado, prevê-se uma migração, de forma progressiva, para a eletricidade produzida por fontes renováveis, devendo chegar a 100 % em 2050.

Já no caso da atual produção de amônia no estado, que se utiliza de gás natural para a produção de hidrogênio, três alternativas de descarbonização estão disponíveis: manter o gás natural, mas com CCS, uso de biometano e mudar o processo de produção para eletrólise com fontes renováveis. Não havendo, no momento, uma definição sobre qual a melhor alternativa, que dependerá das estratégias de cada empresa, optou-se por adotar uma divisão igualitária, ou seja, a adoção de um terço da energia demandada em cada caso. Assim, para o caso específico da energia elétrica, prevê-se uma evolução, da atual demanda nula, para cerca de 400 GWh em 2030, 850 GWh em 2040 e 1.400 GWh em 2050.

Para as novas aplicações do hidrogênio no estado de São Paulo, no setor de transportes e produção de compostos químicos, como amônia, metanol e combustíveis sustentáveis (SAFs), tanto para usos no estado como para exportação, adotou-se a mesma divisão de um terço para cada alternativa, o que resultou em demandas adicionais de energia elétrica da ordem de 4,5 TWh em 2030, 11 TWh em 2040 e 19 TWh em 2050.

Portanto, a demanda de energia elétrica para a produção de hidrogênio de baixo carbono em 2050 no estado de São Paulo deverá ultrapassar 20 TWh que, em termos de potência média, significa quase 3.000 MWmed, ou metade do potencial de energia solar fotovoltaica com viabilidade técnica e econômica no estado.

Destaque-se que a projeção no consumo de eletricidade para produção de hidrogênio de baixo carbono foi computada nas projeções de carga para o Estado de São Paulo.

## Geração distribuída e Redes Inteligentes

Nos estudos de projeção de carga do estado de São Paulo para fins da elaboração do PEE/SP 2050, foi considerado o efeito potencial da Micro e Mini Geração Distribuída (MMGD) e os efeitos da implementação das redes inteligentes e resposta da demanda absorvendo parte do crescimento do consumo.

Para a MMGD, as projeções de geração anual entre 2023 e 2032 foram aqueles considerados no cenário de referência do Plano Decenal de Expansão de energia (PDE) 2032, preparado pela EPE.

Para a estimativa das projeções de MMGD no período 2033 até 2050, ou seja, além do horizonte do PDE 2032, foi utilizado um modelo baseado em regressão linear simples entre as projeções do PDE 2032 e do Plano Nacional de Energia (PNE) do horizonte 2050.

Além disso considerou-se uma proporção de 69% para a MMGD residencial e 31% para a Comercial. Adicionalmente, os números foram objeto de um balizamento com o PDE 2031, de modo a assegurar a coerência entre as projeções feitas para o Estado de São Paulo e as projeções para o Brasil.

Estas projeções adotadas foram intencionalmente conservadoras tendo em vista as incertezas decorrentes da recente mudança da legislação através da publicação da Lei 14300 que regulamenta a MMGD e realinha os descontos dos serviços de rede associados à sua utilização, bem como pela perspectiva de rápido avanço na possibilidade de abertura de mercado ao longo do período previsto pela EPE no PDE 2032, que poderá trazer também novos elementos que diminuiriam a atratividade e trariam outras alternativas aos consumidores para a redução de seus custos da energia elétrica.

A adoção de alternativa mais conservadora também traz a necessidade de uma consideração de incrementos maiores na geração centralizada e de importação de eletricidade pelo Estado de São Paulo para atender o crescimento da demanda, o que é também mais conservador para o plano e ao mesmo tempo coerente com a abertura de mercado atendendo parte da atual expansão da MMGD.

Essa expectativa conservadora sobre a MMGD baseia-se no fato de que o investimento nessa modalidade de geração é decisão exclusiva do consumidor, enquanto as instituições setoriais e as empresas do setor elétrico têm maior gestão sobre a expansão da geração centralizada. Assim, o cenário de menor expansão da MMGD favorece a segurança no abastecimento do mercado no futuro.

O PEE/SP 2050 deverá ser revisado periodicamente e caso se configure uma expansão mais agressiva da MMDG do que a adotada neste trabalho, aumentará o desafio da requalificação das redes de transmissão e distribuição, discutido a seguir.

Para a projeção dos efeitos da implementação das redes inteligentes e da resposta da demanda foi considerado um estudo desenvolvido pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE)<sup>8</sup>, como uma contribuição ao Ministério de Minas e Energia e Aneel.

Neste trabalho foram simulados cenários de resposta da demanda e redução da demanda a partir da implantação de redes inteligentes com base em dados reais dos perfis de consumo do Brasil e a implantação de plano plurianual nacional de medição inteligente em baixa tensão sustentado por políticas públicas.

Este plano teria uma implementação simulada em 8 anos, com início em 2025, abrangendo mais de 88% do volume de energia distribuída no país e cobrindo cerca de 56% do total dos consumidores com medidores inteligentes. Como premissa, o estudo parte dos consumidores maiores para os consumidores menores em baixa tensão e desconsidera inicialmente os consumidores de baixa renda, baixo consumo e também 60% do mercado rural, onde as conexões dos medidores têm um desafio maior e custo mais elevado por unidade consumidora.

O estudo prevê também que cada distribuidora possa elaborar o seu plano de acordo com a sua área, mercado e realidade operativa, pois existe uma grande diversidade de situações no Brasil. O plano prevê a implementação progressiva de tarifas inteligentes com um efeito significativo na demanda elétrica, mas com pouco efeito no consumo total.

O Plano assim estabelecido proporciona uma melhor alocação de custos ao longo dos elos da cadeia para os diversos consumidores e, além disso, promove uma importante educação para o uso racional de energia do lado do consumo, através da oferta de tarifas aderentes a diferentes perfis de uso, oferecendo-se opções reais aos clientes, o

---

<sup>8</sup> Contribuições da ABINEE para o Setor Elétrico Brasileiro: A Medição Inteligente como ferramenta para modernizar o setor elétrico no Brasil – ABINEE para MME e ANEEL – 1º semestre de 2022 link: [https://www.dropbox.com/s/zaviom13nv0w92v/Edicao%20190\\_FINAL\\_fasciculo\\_smartgrid.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/zaviom13nv0w92v/Edicao%20190_FINAL_fasciculo_smartgrid.pdf?dl=0)

que permite atingir tarifas módicas mais apropriadas para cada caso à partir da mudança do hábito do mercado consumidor.

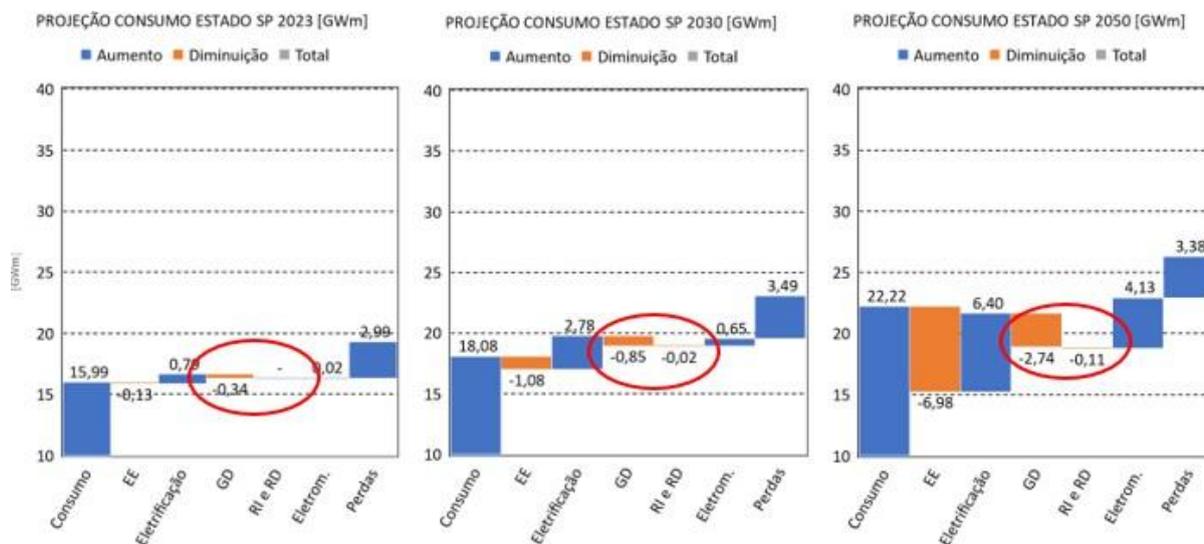
A crescente penetração de MMGD e dos demais RED's é uma realidade e vai ser cada vez mais comum nas unidades consumidoras, tomando papel relevante no suprimento de energia no horizonte do plano.

As Redes Inteligentes na transmissão e distribuição (T&D) são caminho crítico para viabilizar a transição energética que se almeja, agregando o consumidor como agente desta transição.

Para viabilizar a implantação de flexibilidade através de resposta da demanda no Sistema Interligado Nacional (SIN) será necessária a progressiva cobertura de medição inteligente até os clientes de baixa tensão, não se restringindo o programa a clientes de mais alta tensão.

Na Figura 57 observa-se a projeção de energia gerada pela Geração Distribuída e de consumo evitado com a implementação de sistemas de redes inteligentes e resposta da demanda. Essas parcelas reduzem a carga a ser atendida pela geração centralizada e são consideradas nas projeções de carga, reduzindo a carga a ser atendida.

Figura 57 - Expectativa de energia em GD e redução de consumo por SMARTGRID e RD



## Oferta de Energia Elétrica – Geração Centralizada

### Hidroeletricidade

Um aspecto que merece destaque no suprimento de eletricidade para o Estado de São Paulo é a expansão da geração hidráulica no Estado. De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos 2020.2023 (PERH 2020/23) (GOV SP, 2020), há apenas 9 novos empreendimentos de geração hidrelétrica com projetos básicos aprovados no ESP, com potencial total de 372,93 MW, distribuídos em 5 UGRHIs.

Quando se trata de projetos em fases anteriores, especificamente de inventário e estudo de viabilidade, o potencial total salta para 1.502,21 MW. Tendo em vista que cerca de 2/3 da capacidade instalada de energia elétrica no Estado é associada a aproveitamentos hidrelétricos e que o Estado possui uma característica de importador de energia, a expansão da geração de energia através desta fonte ganha relevância estratégica e merece ser avaliada.

O PERH 2020/23, que se caracteriza como uma avaliação oficial das agências do poder público estadual, não apresenta projeções para as demandas dos usos não consuntivos, estando a geração de energia hidráulica incluída neste grupo. Contudo, faz parte deste projeto o desenvolvimento de metodologia que irá estabelecer cenários para a expectativa futura de aumento na geração de energia. Nesta metodologia, que será desenvolvida em um grupo de trabalho específico para esse fim, será incluído um novo fator que prevê a hibridização de tais aproveitamentos hidráulicos para se gerar energia elétrica adicional, a partir de outras fontes, em especial a de origem solar fotovoltaica, conjugadas a aproveitamentos hidrelétricos.

Há alternativas para expansão da geração hidráulica que merecem ser consideradas nas análises de políticas energéticas de longo prazo para o Estado. Tais abordagens constam no estudo realizado pela EPE em 2019 (Empresa de Pesquisa Energética, 2019) e trata da Repotenciação, Modernização e Ampliação de Usinas Hidrelétricas no país. Quando se trata de Repotenciação e Modernização, o objetivo é aumentar a capacidade de geração e eficiência na conversão energética através da substituição ou modernização de unidades geradoras existentes.

No estudo conduzido pela EPE, foram selecionadas usinas que possuíam mais de 25 anos de operação e com potência igual ou superior a 100 MW. Por tais critérios, o Estado de São Paulo teria 16 Usinas com Potência outorgada total igual ou superior a 10 GW, conforme Tabela 4. O estudo também indica que uma estimativa razoável para o decaimento da eficiência da conversão da energia hidráulica em elétrica seria da ordem de 0,5% a 0,8% a cada década.

Quando se trata da possível Ampliação na potência instalada de usinas existentes, o Estado de São Paulo conta com 4 UHEs que possuem atualmente obras civis já preparadas para receber turbinas e geradores adicionais, permitindo a ampliação da oferta de potência, conforme a

#### Tabela 5.

O estudo da EPE indica, ao se considerar a totalidade das UHEs do SIN, que os custos de degradação do sistema podem elevar o Custo Marginal de Operação (CMO) em até 15%, que a repotenciação pode reduzir em até 11% o CMO, e que há a possibilidade de se expandir em 11 GW o SIN sem novos sítios, apenas com a repotenciação e modernização do parque existente. Este cenário pode ser utilizado como base para o Estado de São Paulo, ao se avaliar as diferentes opções disponíveis para o aumento da oferta de energia elétrica.

Apesar desta constatação, o próprio estudo aponta para uma necessidade de evolução regulatória, com a implementação de outros mecanismos de remuneração para as UHEs que venham aderir a programas neste sentido. Portanto, a efetiva viabilidade econômica nos moldes atuais pode não ser suficientemente atrativa para impulsionar a adoção da repotenciação, modernização e ampliação de UHEs, em detrimento de outras opções concorrentes, como a Híbridização destas mesmas UHEs por exemplo.

**Tabela 4 - Conjunto de UHEs do Estado de São Paulo**

Usina	Início de Operação	Idade	Potência Outorgada (kW)	Rio
Henry Borden	1926	96	889.000	Pedras
Salto Grande	1956	66	102.000	Santo Antônio/ Guanhães
Euclides da Cunha	1960	62	108.800	Pardo
Barra Bonita	1963	59	140.760	Tietê
Bariri (Álvaro de Souza Lima)	1969	53	143.100	Tietê
Estreito (Luiz Carlos Barreto de Carvalho)	1969	53	1.050.000	Grande
Ibitinga	1969	53	131.490	Tietê
Jaguara	1971	51	424.000	Grande
Ilha Solteira	1973	49	3.444.000	Paraná
Porto Colômbia	1973	49	320.000	Grande
Volta Grande	1974	48	380.000	Grande
Marimbondo	1975	47	1.440.000	Grande
Promissão (Mário Lopes Leão)	1975	47	264.000	Tietê
Rosana	1987	35	354.000	Paranapanema
Taquaruçu (Escola Politécnica)	1992	30	525.000	Paranapanema
Três Irmãos	1993	29	807.500	Tietê
<b>Total: 16 Usinas</b>			<b>10.523.650</b>	

Fonte: (EPE, 2022)

**Tabela 5 - UHEs com possibilidade de ampliação**

Usina	Unidades	Pot. Unitária (MW)	Pot. Total (MW)
Três Irmãos	3	161,5	484,5
Porto Primavera	4	110	440
Rosana	1	88,3	88,3
Jaguara	2	106	212
<b>Total: 4 Usinas</b>			<b>1224,8</b>

Fonte: EPE, 2019

Destaque-se ainda que um dos efeitos da mudança climática sobre o regime hidrológico é o surgimento de maiores picos e vales de volume de água afluente aos reservatórios das usinas hidrelétricas. Sob este prisma, é relevante que os estudos sobre a viabilidade da repotenciação das usinas sejam elaborados à luz dos regimes hidrológicos afetados pelas mudanças climáticas, uma vez que a adição de potência instalada nessas usinas pode apresentar ganhos nas situações de picos mais elevados de vazão, reduzindo os potenciais vertimentos turbináveis nessas circunstâncias.

### Termoeletricidade

De acordo com o Anuário Estatístico 2022 da ANP (ANP, 2022), São Paulo é o Estado da Federação que apresentou a maior expansão de produção e reservas totais de petróleo e gás natural ao longo do período de 2012 e 2021. Com isso, o Estado apresenta situação bastante favorável de disponibilidade de recursos naturais fósseis domésticos, pelo menos para o curto prazo (até 2030) e médio prazo (até 2040).

Tal evolução faz com que São Paulo, que, historicamente, sempre se entendeu como um Estado importador líquido de petróleo e gás natural, possa ser encarado ao longo das próximas décadas como um Estado autossuficiente e mesmo exportador desses recursos naturais fósseis, os quais podem igualmente ser entendidos como recursos estratégicos de transição energética para um Estado com pretensões de descarbonizar a sua matriz energética até 2050.

O parque de refino paulista é o maior do país e contempla 6 refinarias com capacidade instalada de 945,3 mil barris/dia (concentrada em 4 grandes refinarias da Petrobras e duas mini refinarias privadas, cujas participações de mercado têm sido muito

limitadas). O Estado produz mais de 1/3 dos derivados produzidos no país, sendo que parte expressiva dessa produção é destinada aos demais Estados da Federação.

Em outras palavras, as refinarias paulistas cumprem um papel de exportador de derivados para o país, beneficiando-se de infraestrutura de transporte, armazenamento e distribuição consolidada, e que conecta o Estado com o interior do território nacional. Destaca-se, nesse sentido, o poliduto OSBRA que conecta a região de Paulínia, no interior de São Paulo, a importantes cidades do triângulo mineiro e do centro-oeste, até Brasília. Por outro lado, pode-se apontar como aspecto negativo o limitado espaço para expansão e evolução tecnológica das refinarias paulistas.

O setor de gás natural conta com a infraestrutura de transporte com a maior capacidade do país, mais de 55 milhões de m<sup>3</sup>/dia, que permite o acesso à todas as principais fontes de oferta disponíveis (nacionais e/ou importadas). Essa vantagem logística explica-se por São Paulo ser o principal centro de carga do sistema de suprimento sul-sudeste-centro-oeste. Os mercados paulistas de GN ampliaram-se e consolidaram-se a partir da construção do maior gasoduto internacional da América do Sul, o Gasoduto Bolívia-Brasil, GASBOL, que cruza o Estado de SP. Ademais, São Paulo posiciona-se de forma vantajosa para se beneficiar tanto da produção e/ou importação de GN via RJ, como para aproveitar-se de um potencial significativo de GN “monetizável” a ser produzido offshore, em jurisdições paulistas, principalmente das áreas produtoras do pré-sal. Além disso, entre os pontos fortes, apontam-se as dimensões das redes de distribuição de GN, que alimentam mercados locais com a maior diversidade de usos finais de GN.

Devido a essa natureza, no plano de expansão da oferta interna de energia elétrica, considera-se a inclusão de geração termelétrica a gás natural, com as seguintes características básicas:

Entrada de 2 Novas UTE despachadas centralizadamente:

- 2031: 400 MW Ciclo combinado - 40% Inflexível – CVU 429 R\$/MWh
- 2025: 250 MW UTE – Cogeração – 65% Inflexível – CVU 178 R\$/MWh

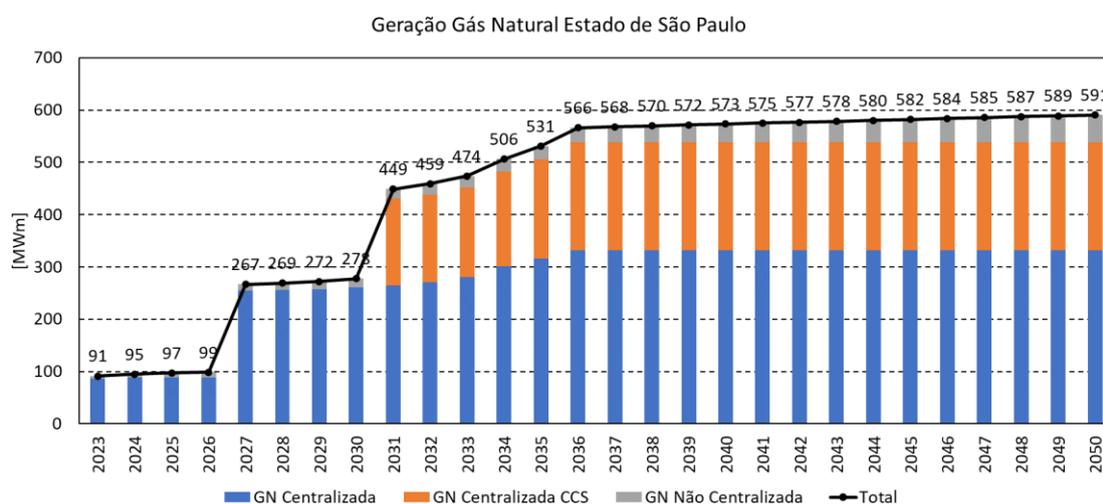
Crescimento gradual de PCTs (Pequenas Centrais Térmicas)

- 1,74 MW ao ano.
- Total em 2050: 47 MW de capacidade instalada.
- Fator de Capacidade Considerado de 30%.

Assim, a geração de eletricidade a Gás Natural no Estado de São Paulo tem como prioritárias as Termoelétricas centralizadas, contudo existe uma tendência de aumento da geração distribuída de Pequenas Centrais Térmicas (PCTs) a GN.

Em 2023 as PCTs representam cerca de 5,6% da geração termelétrica do estado, em 2050 projeta-se uma participação de 9,6%. A Figura 58 apresenta a evolução da geração de eletricidade a partir do gás natural considerada no plano de expansão de geração paulista, destacando-se que para o plano de expansão ainda não contratado, representado pela nova usina térmica implantada a partir de 2031, adota-se a premissa de que o empreendimento será acoplado, necessariamente, a um sistema de Captura e Armazenamento de CO<sub>2</sub>.

Figura 58 - Geração de termelétrica projetada

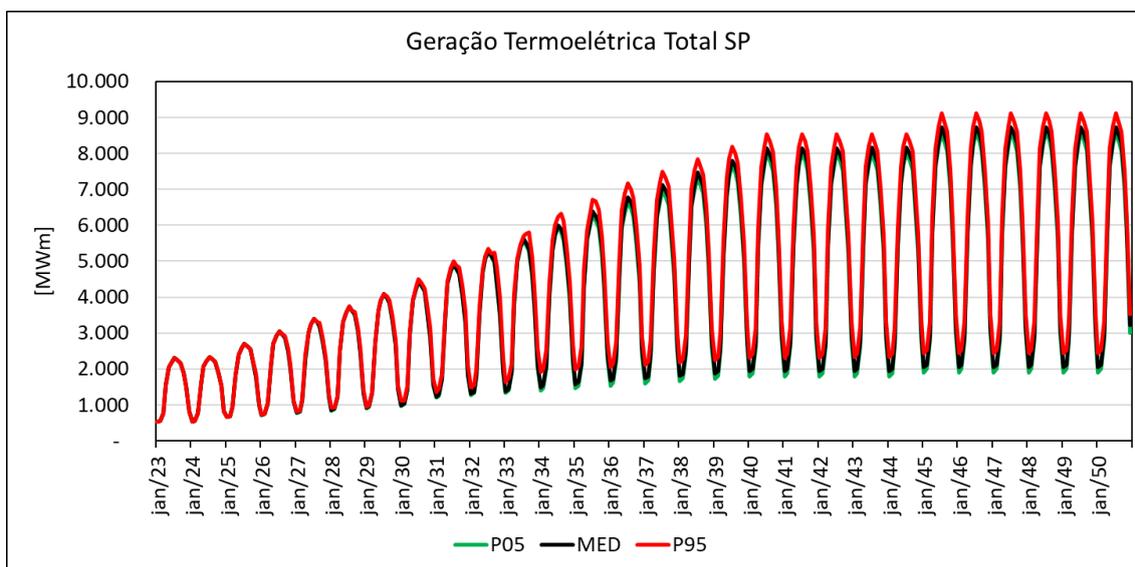


A projeção de geração termoelétrica é de 4,3 GW Médios durante todo o período. Na Figura 59 observa-se a geração termoelétrica média projetada e os percentis 95% e 5%, assim como a geração hidroelétrica, a geração térmica também depende das vazões, fazendo um papel complementar a geração hidroelétrica, uma vez que em períodos de chuvas, as térmicas são desligadas ou reduzem sua geração ao mínimo técnico possível, e no período de estiagem, as usinas térmicas são despachadas em suas capacidades máximas.

Contudo a principal característica do Estado de São Paulo é a participação considerável da biomassa a bagaço de cana que não tem despacho centralizado sendo sua geração projetada com base em um fator de capacidade médio. Este fato faz com que o estado de São Paulo tenha grande parte do seu parque termoelétrica não despachável e a

produção de energia termoelétrica tenha como principal vetor o período da safra, fato que fica evidenciada com a característica sazonal observada na geração térmica.

Figura 59 – Expectativa de Geração Termoelétrica Total



## Energia Solar Centralizada e Usinas Híbridas

A fonte de geração solar fotovoltaica tem papel de destaque no atendimento às metas globais de descarbonização de diversas matrizes elétricas, sobretudo naquelas caracterizadas pela forte inserção de fontes renováveis.

Aspectos técnicos, econômicos e energéticos desta fonte de energia limpa contribuem para o seu aproveitamento em distintos locais e regiões, nas modalidades de geração centralizada e de geração distribuída, e em patamar de atratividade econômico-financeira que tem contribuído para a expansão desta fonte em diversas matrizes e, por conseguinte, rebatendo na sua contribuição à transição energética.

Na esteira da transição energética, outra tendência de crescente interesse de mercado, em nível global é a constituição de usinas híbridas, que se caracterizam pela associação de duas ou mais tecnologias de geração de energia em um mesmo local, visando-se a otimização dos recursos energéticos e físicos disponíveis, como forma de agregar valor aos projetos a partir da maior efficientização no uso dos recursos disponíveis.

A exploração do potencial energético por distintas tecnologias com perfis de geração complementares e o compartilhamento de infraestruturas físicas comuns, promovem melhor aproveitamento dos recursos locais disponíveis, implicando em benefícios

econômicos, ambientais e operacionais aos empreendedores e aos sistemas elétricos aos quais estão inseridas.

Em adição à composição composta por duas ou mais fontes de geração, também são consideradas usinas híbridas aquelas compostas por fontes de geração e Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) acoplados.

A associação dos SAEs tem sido estratégia adotada pelos agentes de diversos mercados pelo mundo para o provimento de flexibilidade operativa da produção variável das renováveis.

Em termos da expansão da capacidade instalada por usinas híbridas, esta pode ocorrer tanto a partir da implantação de projetos '*greenfields*', em que as usinas híbridas são formadas por novos projetos, quanto pela implantação de projetos '*brownfields*', no qual um novo projeto (fonte) é associado(a) a uma usina existente (em operação).

As composições de usinas híbridas que predominam no cenário internacional são aquelas formadas por duas fontes renováveis combinadas entre si e, sobretudo, a associação de uma ou mais fonte renovável com um SAE. No contexto nacional, o predomínio tem sido a formação de usinas híbridas a partir da associação de uma nova usina a outra existente. Na região nordeste, a tendência é a associação das fontes eólica e solar, enquanto na região sudeste a associação de novos projetos solar com hidrelétricas existentes.

No Estado de São Paulo (ESP), em razão dos atributos naturais e de recursos físicos e energéticos disponíveis, visualiza-se como factível a formação de usinas híbridas compostas pela associação entre solar fotovoltaica e hidrelétricas; solar fotovoltaica com SAE; solar fotovoltaica e biomassa; e biomassa com Gás Natural.

Destas alternativas, entende-se que o arranjo formado por novas usinas solares com usinas hidrelétricas existentes é o de maior potencial de expansão no horizonte 2050.

A presença de um parque gerador hidrelétrico de 14,9 GW e o potencial energético para a exploração da fonte solar no ESP, implica que o estabelecimento de usinas híbridas compostas por hidrelétricas com solar fotovoltaica (no entorno dos reservatórios ou flutuantes) seria de relevante oportunidade para o aproveitamento de infraestruturas existentes e para a expansão da matriz paulista de energia.

Os benefícios da expansão deste tipo arranjo de usina híbrida no ESP, além da perspectiva dos investidores, se estendem sobre questões associadas ao planejamento da operação do Sistema Elétrico Nacional, com rebatimentos diretos no estado. Por exemplo, o aproveitamento de infraestruturas existentes, cobrindo eventuais

ociosidades (por exemplo, de redes de conexão), implicam em postergação de investimentos, maior eficiência operativa e mitigação de impactos socioambientais.

Adicionalmente, eventuais aprimoramentos nos regramentos de despacho para a exploração da geração solar, de forma coordenada com a geração hidrelétrica, contribuiriam para a manutenção da disponibilidade hídrica e, por exemplo, a manutenção de cotas de reservatórios das hidrelétricas e da hidrovia Tietê-Paraná.

O papel de destaque da solar fotovoltaica na composição de usinas híbridas também se soma a sua participação na modalidade centralizada (operando individualmente) e na de geração distribuída (mini e micro), ambas com projeção de expansão relevante no horizonte 2050. Estudos de planejamento da expansão elaborados pela EPE reforçam esta tendência, ao apontarem para uma crescente participação da solar na matriz elétrica brasileira e em diferentes estados federativos.

Em relação às alternativas de composição de usinas híbridas com participação da biomassa, as associações com solar fotovoltaica e com Gás Natural se apresentam como possibilidades factíveis no cenário de longo prazo, em razão da perspectiva de expansão dessas fontes de geração e dos sistemas de escoamento de gás natural no estado, não havendo barreiras tecnológicas significativas para a constituição de tais arranjos.

Ademais, frisa-se a possibilidade de escoamento de biometano nos períodos de safra, representando uma vantagem a ser obtida desta configuração. A atratividade financeira do modelo de negócio envolvendo estes energéticos, vis a vis os custos de oportunidade de investimentos nestas fontes de forma individualizada é um fator chave para a concretização destas alternativas no horizonte de longo prazo.

Outra tendência de arranjo híbrido no ESP é a utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) acoplados em usinas solar fotovoltaica centralizada, uma crescente modalidade no cenário internacional, mas ainda incipiente no nacional. A redução esperada no custo do SAE ao longo da próxima década, a melhor valoração dos atributos destes sistemas e as evoluções tecnológicas previstas tendem a alavancar a atratividade destes sistemas, que conferem capacidade de gerenciamento da geração para atendimento de demanda e rentabilização de operações comerciais das usinas.

No fluxo de energia das usinas híbridas, complementa-se a tendência de que, no longo prazo, as evoluções tecnológicas tendem a adicionar etapas de transformação e de uso da energia, sendo a produção direcionada ao atendimento de carga e para a produção

de combustíveis verdes (ex. hidrogênio de baixo carbono), além da possibilidade de gerenciamento via sistemas de armazenamento acoplados aos arranjos.

## **Cenários internacional e nacional – Panorama Atual, Tendências e Principais Drivers**

### *Visão Internacional*

No âmbito internacional, projeta-se a acelerada expansão da fonte Solar Fotovoltaica, impulsionada por ações da transição energética e os objetivos de composição de matrizes elétricas com baixa emissão de gases de efeito estufa.

De acordo com a International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023b), a previsão global da geração solar fotovoltaica disponível para 2050 é de 8,5 TW de potência instalada, concentrados principalmente nas regiões da Ásia e da América do Norte, além de Europa e África. A América Latina possui atualmente 46 GW de potência instalada com previsão de atingir a marca de 281 GW até 2050.

Os principais drivers da expansão da Solar Fotovoltaica no contexto internacional estão associados à adoção de políticas públicas e mecanismos de incentivos, que permitiram a consolidação da indústria global desta fonte nas últimas décadas, com rebatimentos em avanços tecnológicos, ganhos em eficiência, redução de custos de investimentos e desenvolvimento da cadeia logística e tecnológica em diversos mercados.

A evolução tecnológica contribui para diminuição da relação entre área por MW instalado, seja pelo aumento da potência nominal dos painéis, o aumento da eficiência das células fotovoltaicas, a consolidação de novas tecnologias (como os sistemas de rastreamento) ou aumento da eficiência dos inversores. Com efeito, alavancou-se a atratividade financeira da Solar Fotovoltaica aos patamares de viabilidade atuais.

Perspectivas de mercado apontam para a manutenção da tendência de evolução destes aspectos técnicos-econômicos, com contínuo aumento da atratividade desta fonte no horizonte 2050.

Em adição à expansão de Usinas Solares Fotovoltaicas (UFV), existe crescente interesse na formação de Usinas Híbridas em diferentes mercados internacionais, sustentados por ações de aprimoramentos regulatórios e incentivos à expansão da capacidade instalada destes tipos de arranjos, que em síntese, visam a otimização dos recursos físicos e energéticos em mesma localidade. A composição de Usinas Híbridas via associação de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) para provimento de flexibilidade operativa destes arranjos também se destaca.

Os EUA, China, Austrália e Índia são exemplos de formação de Usinas Híbridas com participação das fontes renováveis eólica e solar, com utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia associados. A China, por sua vez, apresenta crescente formação de Usinas Híbridas com participação de Usinas Hidrelétricas (UHEs) combinadas com Usinas Solar Fotovoltaica (fixa e flutuante), Eólica e SAE.

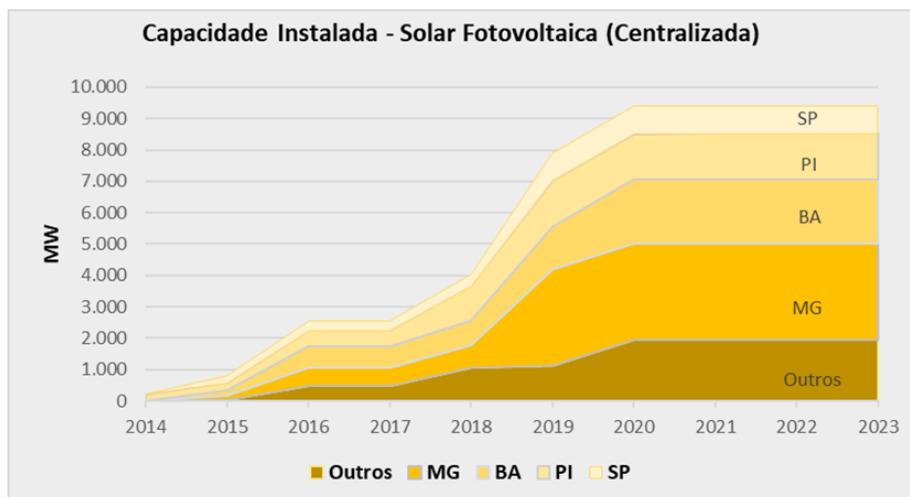
Os vetores de expansão das Usinas Híbridas no cenário internacional estão associados com:

- Adequações regulatórias com ênfase na valoração dos atributos das Usinas Híbridas e Sistemas de Armazenamento de Energia;
- Habilitação das Usinas Híbridas para participação em Mercados de Energia e de Serviços Ancilares;
- Expansão da Capacidade Instalada por meio da promoção de Leilões de Contratação de Energia, incluindo-se utilização de contratos customizados ('round-the-clock') e estabelecimento de participação mínima de uma das fontes – estratégia adotada na Índia;
- Utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia para maior flexibilidade operativa das Usinas ao atendimento à carga.

### *Visão Nacional*

No cenário nacional, atualmente há 9,4 GW de Geração Solar Centralizada no Brasil (ANEEL, 2023) e 21,8 GW de Geração Solar Distribuída (EPE, 2023). Os estados de Minas Gerais, Bahia, Piauí são os principais em termos de potência instalada para geração centralizada (GC), enquanto São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Paraná são os principais estados em termos de potência instalada para Geração Distribuída (GD). A Figura 60 apresenta a evolução da GC nos estados federativos com maior participação desta fonte.

Figura 60. Evolução da Capacidade Instalada Solar Fotovoltaica Centralizada. Fonte: (ANEEL, 2023)



O histórico da realização de Leilões de contratação de energia, promovidos no Ambiente de Contratação Regulado (ACR), se caracteriza como o principal fator da expansão de Usinas Solar Fotovoltaica Centralizada na matriz nacional, com resultados importantes na redução de preços de contratação e na consolidação da cadeia produtiva nacional, fatores preponderantes para redução de custos e ao desenvolvimento do setor fotovoltaico no país. A expansão concretizada via Leilões no ACR e conseqüente desenvolvimento da indústria solar no Brasil, teve importante rebatimento para a viabilização de projetos também em Ambiente de Contratação Livre (ACL), tendência esta que deve se manter nas próximas décadas.

Com base na experiência do setor elétrico de promoção da solar fotovoltaica (e eólica onshore), o fomento à expansão de Usinas Híbridas, via promoção de Leilões de Energia, se afigura como interessante mecanismo de incentivo para este tipo de arranjo. Como benchmark internacional, cita-se o exemplo da Índia, que superou a marca de 5 GW de Usinas Híbridas, viabilizados via leilões customizados de contratação de energia, com desenhos de contratos para atendimento à carga e estabelecimento de participação mínima de tecnologias de geração/armazenamento.

De forma geral, a Solar Fotovoltaica se apresenta como uma tecnologia adaptável para a operação sob diferentes configurações/modalidades e modelos de negócios. Como alternativas de participação desta fonte na matriz elétrica, se visualiza cinco principais modalidades:

- (i) **UFV Centralizada** – Configuração tradicional de Usina Solar Fotovoltaica (UFV) de grande porte, operando individualmente, instaladas em solo.
- (ii) **UFV Híbrida (em Solo)** – Associação de UFV, instalada em solo, com Fontes de Geração complementares (ex. UHE e Eólica).

- (iii) **UFVF Híbrida (Flutuante)** – Associação de UFV flutuante em reservatórios de UHEs.
- (iv) **UFV Flutuante** – Configuração de UFV via instalação de sistemas/módulos flutuantes instalados sobre superfícies de corpos d’água, operando individualmente.
- (v) **Geração Distribuída** – Sistemas de Microgeração e Minigeração Distribuída.

As alternativas apresentadas possuem diferentes características intrínsecas às particularidades de cada arranjo, conforme sumarizadas a seguir.

As UFV centralizadas possuem como característica a sua adaptabilidade para diferentes regiões de potencial energético, com baixa necessidade de aprimoramentos tecnológicos e inovativos, apresentando tecnologia madura e mercado estabelecido nos cenários internacionais e nacional.

Nas configurações para a composição de Usinas Híbridas, a Solar Fotovoltaica se apresenta com possibilidade de compor arranjos via associação com outras tecnologias de geração, por exemplo, com a eólica e a hidrelétrica (nas modalidades em solo e flutuante).

As Usinas Híbridas possuem como característica basilar a otimização dos recursos físicos e energéticos locais, com rebatimentos ao investidor em termos de maior rentabilidade financeira das usinas (redução de CAPEX e OPEX) e aos sistemas elétricos em decorrência do melhor aproveitamento das redes de transmissão e da estabilidade na geração, sobretudo, quando há participação maciça de fontes renováveis de geração variável.

A principal diferença entre as modalidades flutuante e em solo reside no fato de que, embora a modalidade flutuante apresente benefícios, tais como aproveitamento de superfície de reservatório e manutenção de temperatura de operação dos painéis, por outro lado, apresenta limitações de viabilidade técnico-econômico para utilização de sistemas de rastreamento (*tracker*), além de maior custo de estruturas de suporte, flutuação e ancoragem, implicando de aumento de CAPEX e redução no fator de capacidade de geração da UFV flutuante.

Outro arranjo híbrido que tende a ganhar destaque no horizonte de médio prazo é o composto pela associação de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) em usinas de energias renováveis, o que permitirá aumento de flexibilidade operativa e a possibilidade de gerenciamento da geração variável destas usinas.

Destaca-se que no Brasil, a Resolução Normativa ANEEL nº 954, de 30 de novembro de 2021, estabeleceu o tratamento regulatório para implantação de Usinas Híbridas,

pavimentando a possibilidade de exploração de arranjos compostos por diferentes tecnologias de geração com base nas vocações energéticas de cada local.

Em razão desta resolução ser recente e o prazo requerido para implantação dos novos projetos, no âmbito nacional atualmente os projetos de Usinas Híbridas de grande porte (ex. associações eólica-solar e hidrelétricas-solar) encontram-se em fase de planejamento ou em construção. Portanto, ainda se afiguram como uma tipologia incipiente no âmbito nacional. No Nordeste brasileiro, destacam-se os arranjos compostos pelas fontes eólica e solar, enquanto no Sudeste, o destaque está para a composição hidrelétrica existente e solar como entrante.

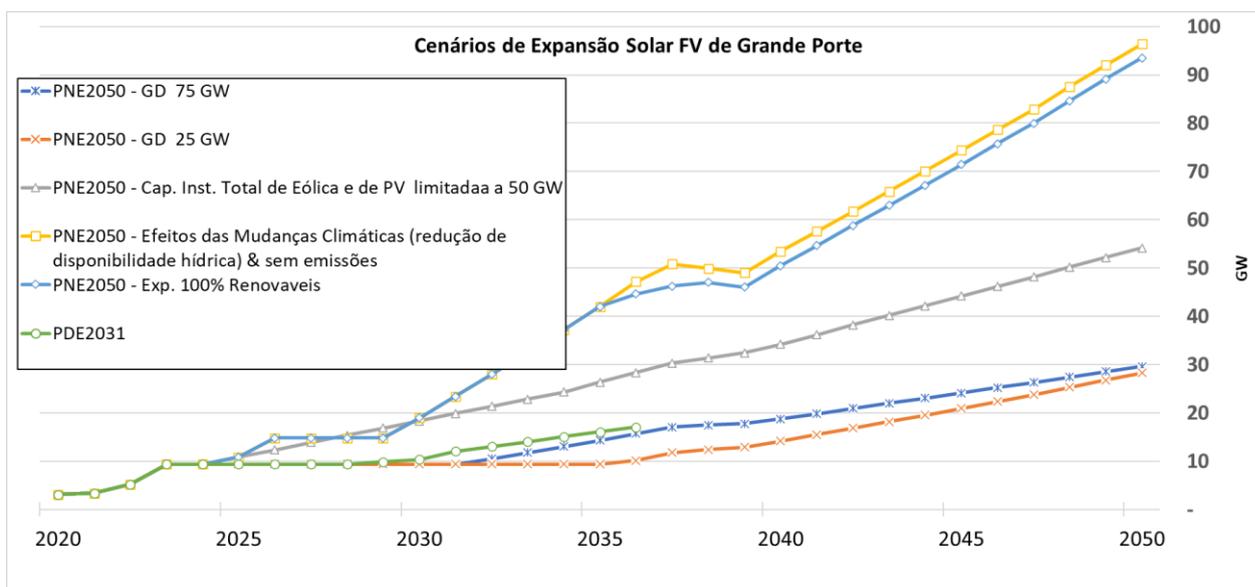
Em relação às expectativas de expansão da Solar Fotovoltaica Centralizada para as próximas décadas, a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) apresenta no Plano Nacional de Energia (PNE) distintas perspectivas do aumento relevante da participação desta fonte. A indicação da expansão dos cenários está condicionada, sobretudo, às premissas de redução de custos de investimento, ao grau de participação de fontes de baixa emissão, a expansão da GD e aos efeitos da mudança climática/reduções de disponibilidade hídrica.

O Relatório do PNE 2050, aprovado em 2020 pelo Ministério de Minas e Energia (MME), projeta, em cenário de forte expansão, o atingimento de 96 GW de solar fotovoltaica centralizada em 2050, considerando um cenário sem emissão de gases de efeito estufa e com efeitos das mudanças climáticas. Em cenário mais conservador, projeta-se a marca de 30 GW, sob a premissa de acelerada expansão de geração distribuída (sem ponderar os efeitos das mudanças climáticas).

No Plano Decenal de Energia (PDE) 2031, com corte de análise para dez anos à frente, estima-se a capacidade instalada de 12 GW de Solar Fotovoltaica Centralizada em 2031.

A Figura 61 ilustra alguns cenários do PNE 2050 e o do PDE 2031. Em comum, os cenários apontam para a expectativa de relevante expansão da Solar Fotovoltaica Centralizada no Brasil, com destaque para as regiões Nordeste e Sudeste.

Figura 61. Cenários de Expansão Solar Fotovoltaica Centralizada publicados pela EPE. Fontes: (MME/EPE, 2020) e (EPE, 2022).



### Panorama Estadual

O estado de São Paulo (ESP) apresenta níveis de irradiação em patamares de viabilização de Usinas Fotovoltaicas Centralizadas e Distribuídas, com perspectivas de expansão nas duas modalidades para o horizonte 2050.

No ano de 2023, o ESP registra a potência instalada de 891 MW de Geração Centralizada (GC) e 2.305 MW de Geração Distribuída (GD), marcas estas que evidenciam o protagonismo da GD em relação à Geração Centralizada no estado, diferentemente do padrão que se identifica nos estados no Nordeste, por exemplo, no qual a expansão da Centralizada supera o da Distribuída.

No ESP, os fatores associados aos índices de desenvolvimento econômico e custos de oportunidade do uso das terras em diferentes regiões contribuem para a expansão da modalidade GD em patamar superior ao da Centralizada. Em adição, devido a característica de operação e expansão do Sistema Interligado Nacional, a modalidade centralizada no estado compete com regiões fora do estado, de maior potencial energético e de maior atratividade financeira para a implantação em maior escala.

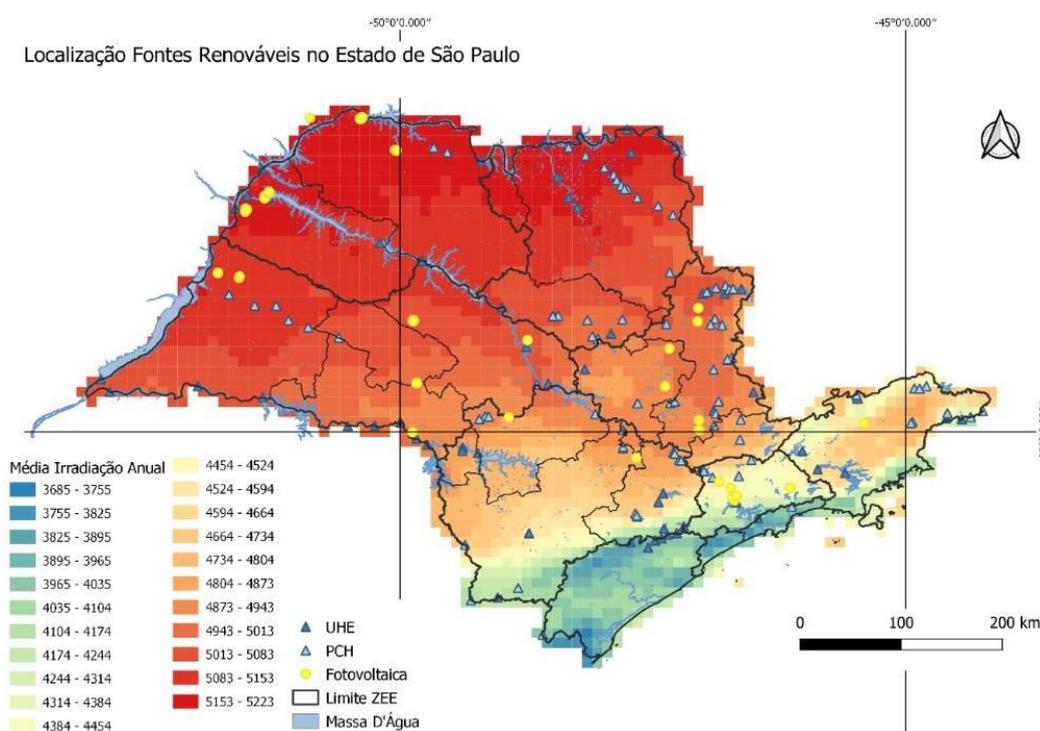
Em contrapartida, o estado de São Paulo possui grau de desenvolvimento relevante quanto às infraestruturas de geração, transmissão e distribuição de energia.

A existência de malha ramificada de transmissão e distribuição de energia, além de subestações para possíveis conexões, com geração próximo aos centros de carga, são pontos a serem destacados no cenário de expansão da Solar Fotovoltaica no ESP.

Soma-se a estes, o fato do estado se destacar economicamente como o de maior número de empresas do setor produtivo fotovoltaico, além do provimento de mão de obra qualificada devido a concentração de universidades e centros de pesquisas de ponta, além de possuir malha rodoviária bastante ramificada para o atendimento logístico à novos projetos.

Em relação ao potencial energético, observa-se elevada irradiação nas regiões centrais e interioranas do estado (destaque para regiões norte e oeste do ESP). As Usinas Fotovoltaicas Centralizadas em operação no estado concentram-se justamente nestas regiões. Outro fator a ser observado é que nestas regiões de maior irradiação também há relevante capacidade instalada de usinas hidrelétricas (UHE) e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) operando, evidenciando o potencial de hibridização entre as fontes hidrelétrica e solar fotovoltaica no estado. O mapa da Figura 62 ilustra a localização das UHE, PCH e UFV em operação, bem como a distribuição da irradiação no território paulista.

Figura 62. Localização de UHE, PCH, Usinas Fotovoltaicas e Níveis de Irradiação no ESP. Fonte: Elaboração Própria.



Segundo estudo da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2016), o potencial para a solar fotovoltaica do Estado supera a marca de 1 TWp.

Em relação ao potencial das Usinas Híbridas compostas pelas Fontes Solar Fotovoltaica e Hidrelétricas, devido à ausência de publicação oficial sobre o tema, foi realizada uma

análise investigativa com base na metodologia utilizada em (Lopes M. P., 2022), ajustando escopo para análise do potencial do Estado de São Paulo. Sob premissas conservadoras de aproveitamento de áreas disponíveis (ex. 1% do reservatório), estima-se um potencial superior a:

- 1 GW de Projetos Solar Fotovoltaico na Modalidade Flutuante nos principais corpos d'água do ESP (ex. represas, açudes e reservatórios de abastecimentos);
- 2 GW de Solar Fotovoltaica Flutuante para a composição de Usinas Híbridas com Hidrelétricas existentes (ex. PCH e UHE);
- 4 GW de Solar Fotovoltaica Instalada em solo para a composição de usinas Híbridas com Hidrelétricas.

A presença de um parque gerador hidrelétrico de 14,9 GW no estado implica que o estabelecimento de Usinas Híbridas compostas por Hidrelétricas com Solar Fotovoltaica seria de relevante oportunidade, principalmente, ao se considerar que a capacidade de expansão de hidrelétrica encontra-se praticamente exaurida e a hibridização destas usinas, via solar fotovoltaica, agregaria com a expansão e a otimização de recursos físicos e energéticos locais, que além de promoverem maior eficiência dos aproveitamentos disponíveis, rebatem em importantes aspectos de operação e planejamento do sistema.

Os benefícios, além de aproveitamento de recursos físicos e sistemas de transmissão e conexão, se estendem a importantes questões operativas associadas com a disponibilidade hídrica em reservatórios e a navegabilidade na hidrovia Tietê-Paraná<sup>9</sup>. Eventuais aprimoramentos nos regamentos de despacho para a exploração da geração solar, de forma coordenada com a geração hidrelétrica, contribuiriam para a manutenção da disponibilidade hídrica e, por exemplo, a manutenção de cotas de reservatórios das hidrelétricas e da hidrovia Tietê-Paraná.

---

<sup>9</sup> O sistema hidroviário Tietê-Paraná possui 2.400 quilômetros de vias navegáveis de Piracicaba e Conchas (São Paulo) até Goiás e Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, Paraná e Paraguai (ao sul). Em seu trecho paulista, a Hidrovia Tietê-Paraná possui 800 quilômetros de vias navegáveis e 30 terminais intermodais de cargas. Sua infraestrutura, administrada pelo Departamento Hidroviário, transformou o modal em uma alternativa econômica para o transporte de cargas, além de propiciar o reordenamento da matriz de transportes da região centro-oeste do Estado e impulsionar o desenvolvimento regional de cidades como Barra Bonita e Pederneiras.

## Projeção para o Estado de São Paulo – Horizonte 2050

A projeção da expansão da solar fotovoltaica de grande porte para o estado de São Paulo pautou-se por uma abordagem *top-down*, no qual considera-se, dentre outros fatores: a tendência nacional da expansão desta fonte e sua atratividade em outros estados; a característica de operação e planejamento do Sistema Interligado Nacional; as premissas do Plano de Energia Estadual; o Potencial de Irradiação do ESP, as características e particularidades técnico, econômico e ambiental do ESP; a tendência de expansão da GD em São Paulo em velocidade superior ao da geração centralizada por questões de sinalização econômica do Estado; e as diferenças entre os custos de investimento e fator de capacidade (relação entre a energia gerada e a potência instalada) de cada modalidade analisada para a Solar Fotovoltaica de Grande Porte.

Com base nas análises dos condicionantes, para o horizonte 2050 estima-se o atingimento de uma capacidade instalada total de 6 GW para a Solar Fotovoltaica de Grande Porte, sendo:

- 2,9 GW na modalidade UFV Centralizada;
- 2,6 GW na modalidade UFV (em solo e flutuante) para composição de Usinas Híbridas com UHE e PCH;
- 0,5 GW na modalidade UFV flutuante em corpos d'água (reservatórios, açudes, lagos).

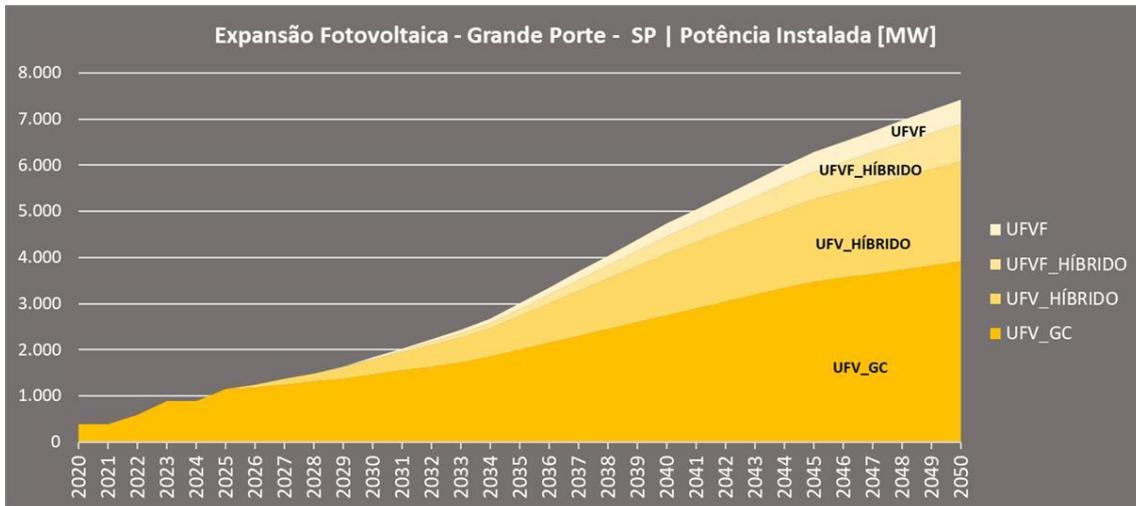
A Tabela 6 e a Figura 63 detalham estas projeções para cortes nos horizontes 2030, 2040 e 2050.

Tabela 6 - Projeção Expansão Solar Fotovoltaica no estado de São Paulo até 2050

Arranjo	2030	2040	2050	% (2050)
UFV Centralizada	1.430 MW	2.330 MW	2.930 MW	49%
UFV Híbrida (UHE)	315 MW	1.155 MW	1.860 MW	31%
UFVF Híbrida (UHE)	30 MW	375 MW	750 MW	12%
UFVF	30 MW	260 MW	460 MW	8%
<b>Total</b>	<b>1.800 MW</b>	<b>4.120 MW</b>	<b>6.000 MW</b>	<b>100%</b>

Fonte: Elaboração Própria

Figura 63. Projeção Expansão Solar Fotovoltaica no estado de São Paulo até 2050 (Fonte: Elaboração Própria).



A fonte Solar Fotovoltaica se apresenta como importante alternativa para a expansão da matriz paulista no âmbito dos objetivos do Plano Estadual de Energia – Horizonte 2050 (Race to Zero / Race to Resilience). Em linha, as Usinas Híbridas também possuem papel de destaque a serem promovidas, implicando em benefícios sociais, econômicos, ambientais e operacionais aos empreendedores e ao sistema, em razão da eficientização dos aproveitamentos de recursos físicos e energéticos em mesma localidade.

No ESP há espaço para a promoção de usinas híbridas compostas por diferentes fontes de geração renováveis devido ao potencial energético existente, das quais são exemplos de composições: Usinas Hidrelétricas com Usinas Solares Fotovoltaicas; Usinas a Biomassa com Usinas Solares Fotovoltaicas; Usinas a Biomassa e GN; e Usinas Solar Fotovoltaicas com SAE. Destas, maior destaque é dado à composição de novas UFV associadas com Usinas Hidrelétricas existentes.

### Posicionamento e Recomendações Gerais

Neste contexto, para a efetivação da expansão, recomenda-se o estabelecimento de uma Política Estratégica de suporte à expansão de Usinas Híbridas e da Solar Fotovoltaica no ESP, no sentido que se sejam definidas políticas públicas e programas de Estado, dentre outros, com incentivos e ações que estimulem o desenvolvimento da cadeia de valor, oferta de linhas de crédito competitivas e desonerações (fiscais e financeiras), apoio a novos negócios emergentes e incentivos à pesquisa, desenvolvimentos tecnológicos e inovação.

Importante pontuar que as estratégias a serem estabelecidas devem considerar a interação com outros setores, como do de gás e transporte, para que se explore adequadamente as sinergias entre estes setores, principalmente em relação a interseção com estrutura de GN existente e a possibilidade de escoamento de biometano ou hidrogênio de baixo carbono (que pode ser gerado a partir do arranjo híbrido).

Os estudos e planejamentos da expansão realizados pela EPE, mostram que a expansão das fontes renováveis no SIN resultará em uma maior necessidade de recursos flexíveis, que pode ser contornado a partir da presença de SAE em projetos híbridos ou pelo uso de GN (por exemplo, em conjunto com usinas a biomassa). A configuração GN com biomassa também permite o escoamento de biometano em momentos que não for interessante a geração de eletricidade pelo biogás, sendo esse combustível um importante recurso na busca do *Race-to-zero* pela possibilidade de substituição do diesel no transporte.

No estágio inicial de implementação das usinas híbridas no estado, o incentivo à elaboração de projetos pilotos se apresenta como uma estratégia interessante para geração de conhecimento e desenvolvimentos tecnológicos, sobretudo dos arranjos mais incipientes. Neste espectro, recomenda-se o fomento ao desenvolvimento de projetos pilotos que envolvam as tecnologias consideradas como de maior potencial no Estado. O desenvolvimento dos projetos pilotos podem ser resultantes de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) regulamentados, por exemplo, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e tendo como proponentes empresas do setor de energia elétrica com atuação no ESP.

Em razão da tendência da hibridização ocorrer, principalmente, em hidroelétricas existentes, há a vantagem de utilização da infraestrutura da usina existente, com aproveitamento do uso do solo e demais recursos como rede interligada, infraestruturas de operação e manutenção, além de estradas para transporte dos componentes a serem instalados no processo de hibridização. Atenção especial deve ser dada para a idade das UHEs existentes, sendo importante a publicação de normativos e ações para encorajar a modernização dessas usinas, das quais grande parte já ultrapassou mais da metade de sua vida útil.

A nível de Estado e regional, também é importante que se leve em consideração as características naturais e sociais de cada região, sendo que em algumas localidades pode ser mais interessante a implantação de projetos híbridos para desenvolvimento econômico e geração de empregos, apesar de um menor nível de recursos (como irradiação) do que em outras regiões metropolitanas.

Na cadeia produtiva, o cenário nacional se mostra dependente de importação em relação dos principais componentes dos sistemas fotovoltaicos, como módulos, inversores e coletores solares. Isto posto, deve-se buscar alternativas para fomento da indústria nacional fotovoltaica a partir de incentivos financeiros (ex. linhas de crédito competitivas e desonerações fiscais e financeiras), apoio aos novos negócios emergentes, incentivo à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação e a capacitação da mão de obra a partir de cursos técnicos e profissionalizantes.

Em específico para as novas tecnologias, como a solar flutuante, hidrogênio e biometano, pode-se pensar em mecanismos de atração de financiamento internacional com objetivo de suporte ao setor em seus estágios iniciais. Há também a alternativa de conceder linhas de crédito subsidiados para construção de novos projetos.

Em síntese, o fomento às usinas híbridas no Estado de São Paulo, assim como às solares fotovoltaicas, se configura como uma importante estratégia para o atendimento das metas de desenvolvimento sustentável e transição energética. Para tanto, recomenda-se o estabelecimento de uma Política Estratégica Estadual que contemple ações para a efetiva implantação destes tipos de arranjos no estado de São Paulo, conforme sumarizado abaixo:

- Estabelecer Política Estratégica Estadual para a Promoção das Usinas Híbridas, buscando-se:
  - Definir diretrizes ao desenvolvimento regional da cadeia produtiva das fontes candidatas para a composição de projetos híbridos e considerando os desenvolvimentos existentes no estado em suas configurações individualizadas.
  - Definir diretrizes para aproveitamento estratégico das sinergias das cadeias produtivas e das atividades correlatas (ex. suprimentos, logística, operação, manutenção e indústria de atividades secundárias) dos energéticos envolvidos nos processos de hibridização.
  - Definir Programa de Fomento ao Desenvolvimento Tecnológico e Acadêmico (ex. solar flutuante, hidrogênio de baixo carbono e sistemas de armazenamento de energia).
- Promover Mecanismos de Incentivo Financeiro à Atratividade das Usinas Híbridas:
  - Promover o desenvolvimento de Usinas híbridas e atração de investimento na cadeia de valor. Aumentar a atratividade dos projetos e desenvolvimento do setor.
  - Promover a atratividade dos projetos, considerando modelos de negócios compatíveis.

- Estabelecer mecanismos de incentivos e de contratação de energia (Leilões regionais).
- Atuar na Promoção de Aprimoramentos Regulatorios de Usinas Híbridas para reconhecer os seus atributos e contribuições ao empreendedor e ao Sistema Elétrico:
  - Definir: (i) critérios de garantia física; (ii) regramentos de despacho (otimização local); (iii) oferta de serviços ancilares e de capacidade; (iv) regramento de comercialização para projetos híbridos com armazenamento (atuação como carga e geração).
- Estabelecer Política Estratégia Estadual para a Promoção da Solar Fotovoltaica e fortalecer as ações em curso para as modalidades centralizada e distribuída.

## Hibridização de Hidrelétricas existentes

Particularmente para o Estado de São Paulo, que abriga vários reservatórios de usinas hidrelétricas e considerando a particularidade dessas usinas de contarem com um contrato de concessão, e importante destacar a hibridização de usinas hidráulicas que representa uma importante medida para aumentar a oferta de energia elétrica no ponto de conexão já existente, e utilizar a área disponível em tais usinas.

Foi identificado, com estudos preliminares, um potencial energético no Estado de São Paulo de aproximadamente 2 GW para hibridização de usinas hidrelétricas existentes via associação solar fotovoltaica na modalidade *onshore* (em terrenos próximas à casa de força), na área do reservatório das usinas e de aproximadamente 4 GW na modalidade *offshore* (em área molhada), sobre a lâmina d'água das hidrelétricas paulistas.

Adicionalmente, a hibridização de usinas hidrelétricas existentes fornece outros benefícios, conforme apresentado em (Nogueira), artigo a ser publicado, em que foi apresentado um estudo de caso envolvendo a UHE Três Irmãos, no Estado de São Paulo, durante um período que envolveu a interrupção da navegação na hidrovia Tietê-Paraná, em 2021.

No estudo, foi calculada uma vazão incremental adicional necessária para manter a navegabilidade da hidrovia em níveis operacionais (325,40m) durante o período de interrupção. A partir dessa vazão adicional, aplicou-se o conceito de vazão artificial incremental para o dimensionamento da fonte solar fotovoltaica, estimando-se a área das instalações fotovoltaicas flutuantes em 1,32 km<sup>2</sup>, o equivalente a apenas 0,22% da área total do reservatório da UHE Três Irmãos. Em termos de produção, a energia

média anual resultaria em 311 GWh/ano, a partir de uma potência instalada de 171 MWp.

Dessa forma, ilustra-se efetivamente um dos possíveis benefícios proporcionados pela hibridização de usinas hidrelétricas existentes como alternativa potencial para manutenção de níveis operacionais nos reservatórios e vazões mínimas (e.g. sanitária, operativa, ecológica), bem como uma solução potencial para reposição das perdas energéticas ocasionadas por alteração do regime hidrológico decorrente de alterações climáticas e de usos consuntivos. Vale lembrar que há um limite para a instalação adicional de capacidade fotovoltaica, devido a capacidade de escoamento desta energia a partir do sistema de transmissão existente.

Em dezembro de 2021, a ANEEL aprovou a regulamentação de Centrais Geradoras Híbridas e Centrais Geradoras associadas. Em resumo, a medida permite implementar instalações que explorem, de forma concomitante, diversas fontes de energia. As maiores vantagens indicadas pela ANEEL são a complementaridade das fontes de geração, o uso mais eficiente e estável da rede de transmissão, a mitigação de riscos comerciais e a economia na compra de terreno e custos associados.

Houve questionamentos quanto à inclusão de tecnologias de armazenamento de energia por baterias na categoria de instalações híbridas. Contudo, a ANEEL indicou que este tema está sendo tratado especificamente no item 59 da Agenda Regulatória 2021-2022 da ANEEL. Dessa forma, há um caminho natural para os Aproveitamentos Hídricos, que englobam as pequenas e as grandes centrais hidrelétricas (AHEs), através da hibridização de empreendimentos existentes e futuros, garantindo uma maior resiliência aos desafios colocados pelo aumento da demanda energética e a imprevisibilidade que as mudanças climáticas devem trazer para as vazões dos AHEs estaduais.

Como recomendação geral, destaca-se a necessidade de que o Estado de São Paulo estabeleça, em sua alçada de competência, políticas que favoreçam a hibridização das usinas hidrelétricas que operam no Estado, além de promover uma avaliação sobre as condições em que se encontram as usinas desativadas que se localizam no território paulista, de maneira a avaliar a capacidade de reabilitação desses empreendimentos.

De acordo com estudos realizados a nível nacional, a hibridização das usinas é uma das ferramentas mais eficazes para se garantir a resiliência do parque gerador de eletricidade diante das consequências das mudanças climáticas, uma vez que a hibridização promove a diversificação das fontes de geração. Adicionalmente, é importante realizar um estudo de viabilidade econômica para a repotenciação, modernização e ampliação das usinas hidrelétricas indicadas pela EPE para o Estado de São Paulo, particularmente se considerados os impactos das mudanças climáticas

sobre os regimes hidrológicos nas diversas regiões do Estado. Além destas, usinas em operação, é relevante expandir este estudo para empreendimentos que já se encontram desativados no Estado e promover uma reavaliação do seu potencial hidrelétrico remanescente. Dessa forma, será possível ter-se uma visão clara do potencial hidrelétrico e de hibridização adicional remanescente no Estado, no intuito de se avaliar as melhores opções que irão compor o planejamento estratégico e as políticas estaduais.

## Expectativa de Geração hidrelétrica no Estado de São Paulo

É natural para o Estado que com a grande participação da geração hidroelétrica em sua matriz, exista uma variabilidade significativa oriunda da sazonalidade de períodos secos e úmidos mais ou menos intensos. Esse fato que dificulta uma previsibilidade deste tipo de geração.

Para melhorar a projeção da geração hidroelétrica do estado de São Paulo foi utilizado o modelo NEWAVE, o qual faz simulações com 2000 séries sintéticas<sup>10</sup> de vazões. Destas séries pode-se calcular uma média, e outros valores estatísticos significativos para estimar a projeção de geração hidráulica do estado.

Na [Figura 64](#) apresenta-se os resultados esperados para a geração das usinas hidrelétricas paulistas, onde em média, espera-se uma geração hidráulica<sup>11</sup> anual de 7,7 GW médios. Considerando as curvas de percentis pode-se esperar gerações anuais entre 5,4 e 9,7 GW médios.

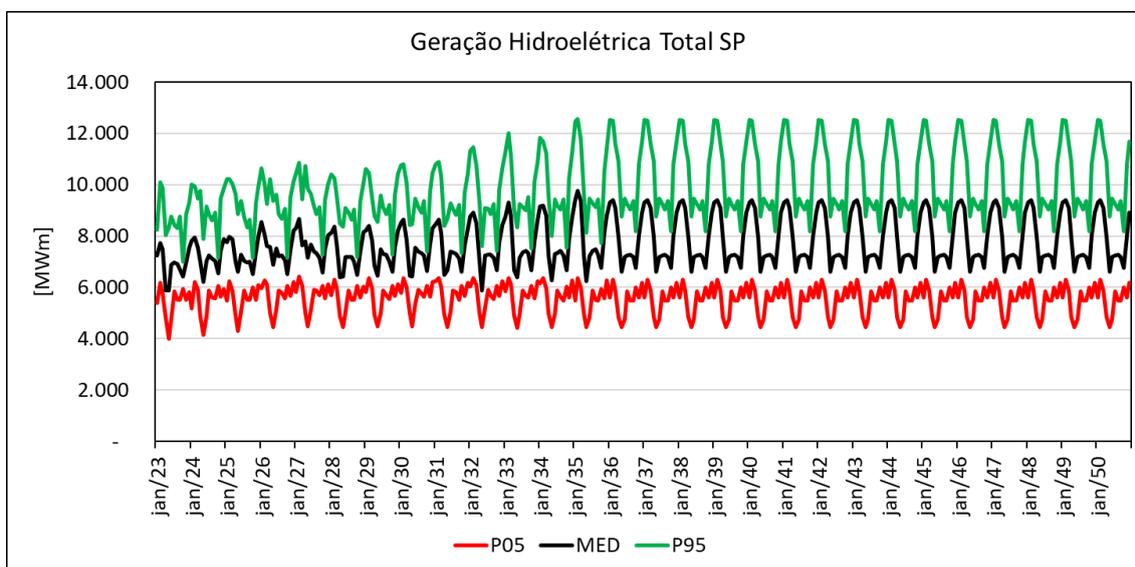
Além da característica de variabilidade anual, é importante também notar uma forte sazonalidade entre período úmido e período seco que na série média tem um máximo de 9,5 GW médios e mínimo de 7,5 GW médios.

---

<sup>10</sup> Séries sintéticas são series de vazão geradas estatisticamente à partir de uma série histórica conhecida. Elas permitem observar a variabilidade esperada nas vazões futuras permitindo avaliar estatisticamente a geração, nível do reservatório e vazões afluentes e defluentes dos aproveitamentos hidrelétricos

<sup>11</sup> Valores totais para geração hidroelétrica centralizada, PCHs e CGHs.

Figura 64 – Expectativa de Geração Hidráulica



## Eólica Offshore

A energia eólica *offshore* se apresenta como uma importante modalidade de geração limpa capaz de contribuir de forma significativa na expansão renovável nas próximas décadas, ajudando a impulsionar as transições energéticas, descarbonizando a eletricidade e produzindo combustíveis de baixo carbono (ex. hidrogênio de baixo carbono), a partir de projetos de grande porte.

O Brasil apresenta um potencial superior a 700 GW, distribuídos em 356 GW na região Nordeste, 197 GW na região Norte, 97 GW na região Sul e 47 GW na região Sudeste. Em razão deste potencial, observa-se forte movimentação nacional, evidenciado, dentre outros, pelo grande número de projetos eólicos (offshore) em processos de licenciamento ambiental abertos no IBAMA (189 GW). Os empreendimentos em planejamento concentram-se em estados com maior potencial energético, sendo: Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (Nordeste); Rio de Janeiro e Espírito Santo (Sudeste); Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Sul); não havendo solicitação para projetos no Estado de São Paulo (ESP).

A expectativa do mercado é de que os primeiros parques eólicos *offshore* no Brasil entrem em operação a partir de 2030. Em particular no ESP, há uma defasagem em relação aos estados com projetos em planejamento e com ações em curso para atração de investimentos e desenvolvimentos regionais, de modo que não se visualizam parques em operação antes de 2035. A partir do horizonte 2030, prevê-se

um crescimento exponencial da capacidade instalada nacional em decorrência do atual grande número de projetos em planejamento e da expectativa indicada pela EPE de que no horizonte 2050 exista, ao menos, 16 GW de eólica offshore instalados no Brasil, sob a premissa de redução dos patamares de custo de investimento na ordem de 20%.

Embora a região Sudeste apresente um potencial menor que as demais regiões do Brasil, cumpre-se ressaltar a existência de fatores estratégicos, econômicos e energéticos que agregam importante peso para se incentivar a promoção deste tipo de modalidade de geração no estado de São Paulo, motivo pelo qual esta fonte é considerada no contexto do PEE/SP 2050.

De forma geral, no cenário nacional, visualiza-se que a expansão da eólica *offshore* ocorra direcionada, sobretudo, para a produção de hidrogênio de baixo carbono com foco no atendimento do mercado externo, com destaque para os projetos da região Nordeste. No caso de São Paulo, a produção eólica *offshore* deve ser direcionada para o atendimento regionalizado da carga (região da Baixada Santista, São Paulo e região metropolitana) e produção de hidrogênio de baixo carbono (sobretudo, para consumo dos polos industriais nestas regiões).

A exportação de hidrogênio também representa uma opção ao estado, entretanto, como objetivo secundário ante a concorrência com demais estados do Nordeste.

O grande desafio para o ESP é promover a atratividade desta fonte ante à concorrência dos demais estados de maior potencial energético. Para tanto, a expansão da eólica offshore no estado deve ser promovida via Política Estratégica Estadual, que considere como alavanca de atração as características e atributos presentes no estado, tais como as potencialidades dos setores industriais, a infraestrutura portuária, logística e energética (conexão, transmissão e distribuição) e a possibilidade de atendimento da carga concentrada na Baixada Santista e em São Paulo e sua região metropolitana, além dos benefícios tecnológicos, econômicos, sociais e ambientais advindos da expansão desta fonte.

## Cenários internacional e nacional – Panorama Atual, Tendências e Principais Drivers

### *Visão Internacional*

No cenário internacional, a geração de energia elétrica eólica offshore apresenta perspectiva de relevante contribuição com a descarbonização da eletricidade e produção de combustíveis de baixo carbono (hidrogênio). Segundo dados da IRENA (IRENA, 2023), a capacidade instalada global deve evoluir de 63 GW em 2022 à marca

de 999 GW em 2050, com destaque para a forte expansão prevista para a Ásia, Europa e América do Norte. A Capacidade existente está concentrada na Europa (Reino Unido, Alemanha e Holanda) e Ásia (China). Em relação à América latina, as projeções da IRENA são bastante reduzidas, com indicação da instalação das primeiras turbinas eólicas offshore em 2030, chegando a uma capacidade instalada de 5 GW em 2050. Conforme apresentação na visão nacional, esta projeção se contrapõe com as expectativas para o Brasil.

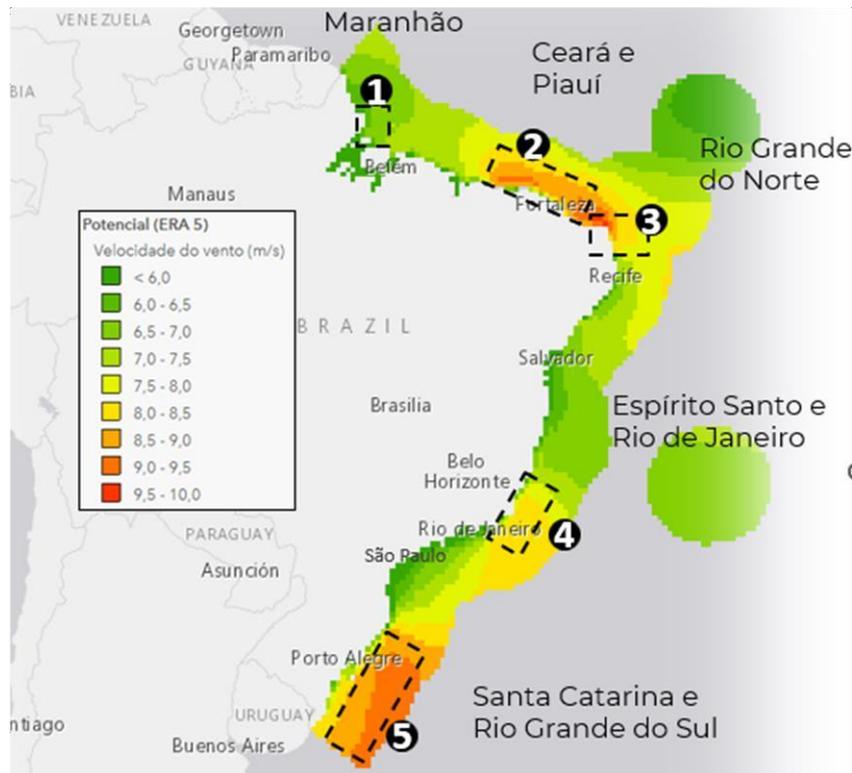
Os principais drivers da expansão desta fonte nos mercados internacionais estão associados com: (i) estabelecimento de Políticas Públicas direcionadas à promoção desta fonte; (ii) aprimoramentos regulatórios; (iii) estabelecimento de Mecanismos de Incentivo; (iv) programas de atração de investimentos, de longo-prazo, no desenvolvimento da cadeia de suprimentos e tecnologias; e (v) planejamento para integração com o grid. Os avanços resultantes do desenvolvimento da cadeia de suprimentos e tecnológicos obtidos nos últimos anos levaram a uma importante redução de custo de investimento (CAPEX) desta fonte, no aumento de Capacidade dos Aerogeradores e na implantação de projetos mais eficientes (aumento do porte dos Aerogeradores) e em áreas mais distantes do continente (fundações). Esta tendência de redução de custos e avanço tecnológico tende a se manter no horizonte 2050.

Na América Latina, atualmente não há usinas em construção/ em operação. Os principais fatores de entrave estão associados com os valores elevados de CAPEX, a atratividade financeira de outras fontes renováveis (ex. solar e eólica onshore) com potencial relevante; a ausência de marcos regulatórios e de infraestruturas de logística adequada, além de cadeia de suprimentos estabelecida.

#### *Visão Nacional*

No Brasil existem 78 projetos (total de 189 GW) com pedidos de licenciamento ambiental aberto no IBAMA, observa-se a concentração dos projetos em 5 grandes polos de desenvolvimento (Figura 65) e com predomínio da participação de players internacionais, com atividades originais na indústria de Óleo e Gás. Manifestações de mercado apontam para o interesse na possibilidade de geração de energia elétrica, sobretudo, direcionada à produção de hidrogênio para exportação ao mercado externo.

Figura 65. Potencial Eólico Offshore no Brasil concentrados em 5 polos de desenvolvimento. Fonte: (EPE, 2020) e (IBAMA, 2023)



Em relação à expansão da fonte no cenário nacional, segundo o PNE 2050 da EPE (MME/EPE, 2020), a estimativa é o atingimento da marca de 5,5 GW em 2040 e de 16 GW em 2050. Segundo o PNE, esta expansão estaria condicionada ao cenário de redução de 20% no CAPEX estimado pela IEA, se o CAPEX se reduzir de 2.500 para 2.000 US\$/kW até 2040. Observa-se que na previsão do PNE é considerada, dentre outros aspectos, a atratividade das demais fontes conectadas no SIN, de modo que na expansão é considerada a atratividade de outras fontes de potenciais e custos distintos.

Em relação à implantação efetiva de projetos no Brasil, destacam-se os seguintes aspectos:

A infraestrutura portuária pode ser suprida, em partes, pelos portos existentes, aproveitando instalações da indústria de óleo e gás, ou por instalações desenvolvidas/adaptadas para atender indústria da eólica offshore.

O sistema de transmissão e a sua interligação com a rede de distribuição é essencial para o escoamento da energia gerada dos parques eólicos offshore - requer planejamento da integração com o grid.

Existe necessidade de estabelecimento da cadeia de suprimentos. O nível de maturidade e os preços competitivos observados no mercado offshore europeu são resultados da presença de uma forte cadeia de fornecimento, desenvolvida por anos de maciços investimentos.

A sinergia com a indústria de Petróleo e Gás é um aspecto diferencial para a expansão da offshore em alguns locais do Brasil. Os dois setores compartilham de tecnologias e elementos de suas respectivas cadeias de suprimentos.

Marco Regulatório ainda não estabelecido é um entrave relevante à expansão desta fonte. As ações em curso são o projeto de Lei 576/2021, que regulamenta a autorização para aproveitamento do potencial energético *offshore* e o Decreto Nº 10.946/2022 defini diretrizes sobre o uso e aproveitamento de área marítimas para a geração de energia.

### Projeção para o Estado de São Paulo

Segundo estudo da EPE (EPE, 2020), o ESP possui 20 GW de potencial eólico offshore, com fator de capacidade na ordem de 38%. No litoral paulista encontram-se Unidades de Conservação e observa-se uma faixa com ventos relativamente moderados/fracos em áreas de baixa profundidade do oceano, se comparada com outros estados da federação. Esses são características limitantes da expansão da fonte no Estado.

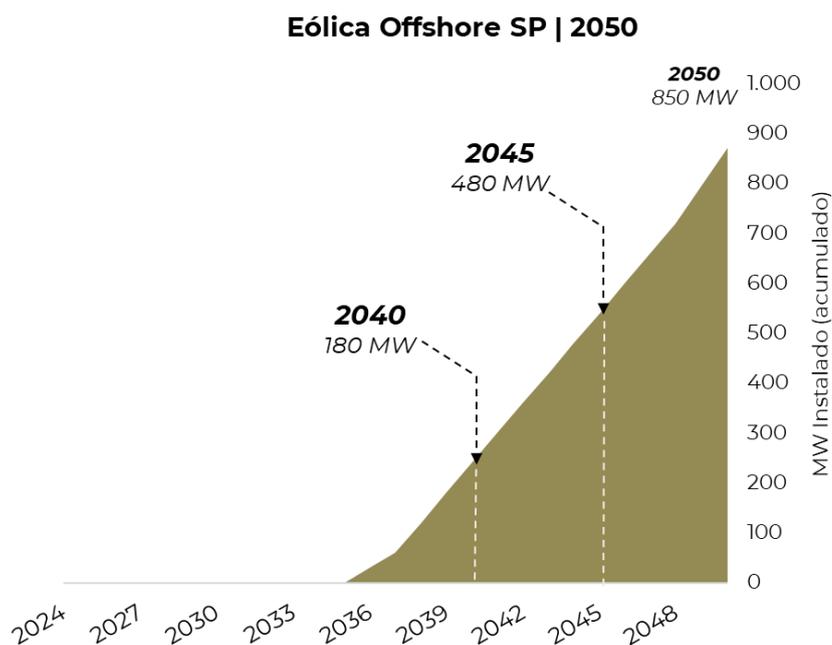
As regiões no mar territorial identificadas como de maior potencial energético offshore no estado de São Paulo estão próximas das atividades de exploração da área do Pré-Sal na bacia de Santos e das regiões dos Portos de Santos e São Sebastião.

Atualmente não há solicitação de Licenças Ambientais para projetos localizados no litoral paulista, denotando que a atividade no estado é menor do que nos demais estados que, juntos, somam os mencionados 189 GW de projetos em planejamento conforme dados do IBAMA (setembro, 2023).

Alguns aspectos motivadores para a implantação da Eólica Offshore no ESP estão associados com as possibilidades de: (i) atendimento da carga na região litorânea (Baixada Santista, São Paulo e região metropolitana); (ii) exploração da sinergia com a Indústria de Óleo & Gás presente no Estado (ex. região do Pré-Sal); (iii) produção de Hidrogênio de Baixo Carbono, sobretudo para consumo dos polos industriais paulista; (iv) utilização dos portos de Santos e São Sebastião para apoio logístico; (v) desenvolvimento de Mercado e Tecnologia no Estado; (vi) desenvolvimento de mão de obra qualificada e promover pesquisas aplicadas & inovações tecnológicas.

No âmbito do Plano Estadual de Energia, em cenário otimista e ponderando-se por ações de governo para promoção do desenvolvimento da fonte, estima-se que a Eólica Offshore no ESP teria um potencial de desenvolvimento de até 850 MW de capacidade instalada em 2050, com entrada gradativa a partir de 2035. A Figura 66 apresenta este cenário de expansão.

Figura 66. Projeção de Expansão Eólica Offshore no estado de São Paulo até 2050 (Fonte: Elaboração Própria).



A projeção foi estabelecida por meio de uma abordagem *top-down* que considerou aspectos internacionais e nacionais desta fonte (e indústria), bem como o potencial de exploração no litoral paulista, que apresenta condições energéticas e disponibilidade de áreas reduzidas em relação aos demais estados.

No que tange ao cenário nacional, na metodologia foram considerados o grau de desenvolvimento de projetos nos demais estados; os potenciais energéticos da eólica *offshore* em cada estado (utilizando-se como base os resultados apresentados no Roadmap das Eólicas *Offshore* -EPE e WebMap associado); as características do Sistema Interligado Nacional (conexão entre os submercados eletroenergéticos, que implica no desenvolvimento de projetos em maior porte nos locais de maior potencial, mesmo que distante dos centros de carga); as projeções do Plano Nacional de Energia (PNE 2050)/EPE; custos de desenvolvimento dos projetos; e as particularidades do ESP, em termos energéticos e econômicos.

Em suma, os principais *fatores* para potencializar a expansão da oferta eólica offshore no ESP estão associados com as possibilidades de: (a) exploração de sinergismos com

atividades de Óleo e Gás; (b) atendimento da demanda local: Baixada Santista e Grande São Paulo; (c) produção de hidrogênio de baixo carbono para atendimento da demanda interna do estado; (d) indução do desenvolvimento da indústria offshore para atendimento nacional.

Os principais pontos que contrapõem a atratividade deste fonte estão associadas ao fatos dos: (a) Estados do Nordeste e Sul, além do Rio de Janeiro e Espírito Santo no Sudeste, possuem maior potencial energético do que o de São Paulo e (b) que estes Estados de maior potencial estão em fases mais avançadas para o recebimento/desenvolvimento da indústria offshore (adequação de portos, cadeia de suprimentos e logística) e no desenvolvimento de projetos; e (c) concorrência com outras fontes renováveis (ex. eólica onshore, fotovoltaica) conectadas no SIN.

A implantação da eólica offshore requer a existência de uma estrutura portuária apta a suportar os serviços de construção, montagem e transporte (EPE, 2020). O Estado de São Paulo, apesar de possuir uma infraestrutura portuária avançada quando comparada com os demais portos do país, nas ampliações previstas nos planos de privatização dos portos de Santos e São Sebastião, não estão contempladas de maneira explícita, ações para e desenvolvimento de infraestrutura para o atendimento dessa modalidade de geração de eletricidade. Dessa forma, necessita-se da elaboração de políticas públicas com vistas ao aperfeiçoamento da estrutura portuária para atendimento de requisitos de suporte às atividades da Eólica Offshore e Produção de Hidrogênio, tendo-se o envolvimento não somente do governo, mas também dos stakeholders privados.

Em síntese, o cenário de expectativa de expansão de 850 MW de capacidade instalada para a eólica *offshore* no ESP está associada à necessidade de estabelecimento de Políticas Públicas Estadual visando fomentar o Desenvolvimento da Indústria Offshore, Incentivos e Atração de Investimentos para implementação de Projeto Piloto de Médio Porte para aplicações de inovações tecnológicas e desenvolvimentos.

Pelo exposto, compreende-se que a decisão ao fomento da eólica offshore por parte do Governo de São Paulo deve ser respaldado por uma avaliação estratégica dos benefícios oriundos da inserção desta fonte, por meio do estabelecimento de uma política estadual de incentivo e de modo que sejam valorados os benefícios de sua expansão ao estado, ponderando-se as sinergias com atividades industriais presentes no estado (exemplo, sinergia com óleo e gás), impactos nas vertentes socioeconômico-ambiental, além da possibilidade de atendimento da demanda energética em escala regional e seu emprego para produção de hidrogênio em larga escala. Em complemento, tais benefícios devem ser cotejados com os providos pelas demais fontes de geração de energia avaliados no contexto do Plano Estadual de Energia.

## Posicionamento e Recomendações Gerais

A expansão da eólica offshore no estado de São Paulo requer a definição, por parte do Estado, de diretrizes, prioridades e, principalmente, ações que promovam a inserção desta fonte. Em linha com a experiência internacional e as peculiaridades do ESP, as recomendações gerais são sumarizadas conforme segue:

- Estabelecer Plano Estratégico para o Desenvolvimento da Eólica Offshore no Estado, explorando-se as potencialidades da indústria paulista, da infraestrutura e logística presente no estado e a possibilidade de atendimento da carga (por energia elétrica e por hidrogênio de baixo carbono). Explorar sinergias entre setores atuantes no Estado.
- Promover Mecanismos de Incentivo para a Inserção da Energia Eólica Offshore no Estado de São Paulo.
- Estabelecer Programas de (i) Desenvolvimento da Cadeia Produtiva (de Valor) do Setor, (ii) de Atração da Indústria Eólica Offshore Internacional e (iii) de Colaboração entre Indústria e Governo.
- Promover Plano de Aperfeiçoamento da Infraestrutura Portuária contemplando atividades da Eólica Offshore e Produção de Hidrogênio de Baixo Carbono. Incentivar o desenvolvimento de clusters industriais nos arredores dos portos.
- Fomentar exploração de sinergias entre a Eólica Offshore e a cadeia de suprimento da Eólica Onshore e de outras atividades correlatas (ex. suprimentos, logística, operação, manutenção e indústria de atividades secundárias).
- Promover incentivo a implantação de Parque Eólico Offshore Piloto de médio porte, para impulsionar esta tecnologia e promover seu desenvolvimento no estado.
- Promover Programa de Monitoramento de Dados, Pesquisas Técnicas e o Mapeamento do Potencial Estadual da Eólica Offshore (com maior acurácia).
- Atuar para o estabelecimento do Marco Regulatório junto ao Governo Federal.

A tabela a seguir sintetiza os objetivos das ações propostas.

Ação	Objetivo
Estabelecer Plano Estratégico para o Desenvolvimento da Eólica <i>Offshore</i> no Estado, explorando-se as potencialidades da indústria paulista, da infraestrutura presente no estado e a possibilidade de atendimento da carga (por energia elétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover o desenvolvimento da eólica offshore no estado, aumentando a atratividade financeira destes tipos de empreendimentos, buscando-se explorar sinergias entre setores atuantes no estado.</li> <li>• Otimizar o uso da infraestrutura de gasodutos da</li> </ul>

e por hidrogênio de baixo carbono).	indústria de óleo e gás com o compartilhamento com a eólica <i>offshore</i> .
Promover Mecanismos de Incentivo para a Inserção da Energia Eólica <i>Offshore</i> no Estado de São Paulo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover o desenvolvimento de usinas eólicas <i>offshore</i> e atração de investimento na cadeia de valor.</li> <li>• Promover a atratividade dos projetos em status de tecnologia incipiente no estado.</li> </ul>
Estabelecer Programas de (i) Desenvolvimento da Cadeia Produtiva do Setor, (ii) de Atração da Indústria Eólica <i>Offshore</i> Internacional e (iii) de Colaboração entre Indústria e Governo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prover atratividade para a instalação da Indústria Internacional no estado.</li> <li>• Estabelecer troca de conhecimento entre Indústria e Estado.</li> <li>• Fomentar desenvolvimento tecnológico;</li> <li>• Desenvolver regionalmente a cadeia de valor da eólica <i>offshore</i>.</li> </ul>
Promover Plano de Aperfeiçoamento da Infraestrutura Portuária contemplando atividades da Eólica <i>Offshore</i> e Produção de Hidrogênio de Baixo Carbono.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprimoramento da infraestrutura portuária visando a atender a indústria eólica <i>offshore</i> no curto, médio e longo prazos.</li> <li>• Incentivar o desenvolvimento de clusters industriais nos arredores dos portos.</li> </ul>
Fomentar exploração de sinergias entre a Eólica <i>Offshore</i> e a cadeia de suprimento da Eólica <i>Onshore</i> e de outras atividades correlatas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explorar a existência da cadeia de suprimento da eólica <i>onshore</i> e diversidade da indústria paulista de forma a buscar sinergias de atividades correlatas (ex. suprimentos, logística, operação, manutenção e indústria de atividades secundárias).</li> </ul>
Promover incentivo ao desenvolvimento de Parque Eólico Offshore Piloto de médio porte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acumular conhecimento e gerar desenvolvimentos tecnológicos visando ampliação da capacidade instalada no estado.</li> </ul>
Promover Programa de Monitoramento de Dados e Pesquisas Técnicas para Mapeamento do Potencial Eólico Offshore no estado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabelecer base de dados (Climatológicos e Oceanográficos) público, com riqueza de informação e acurácia, para suporte à estimativa coerente do potencial eólico offshore no estado e prover suporte ao desenvolvimento de projetos.</li> </ul>
Atuar para o estabelecimento do Marco Regulatório.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir regramentos para o Desenvolvimento de Usinas Eólicas Offshore, em relação aos aspectos de planejamento, desenvolvimento e operação.</li> </ul>

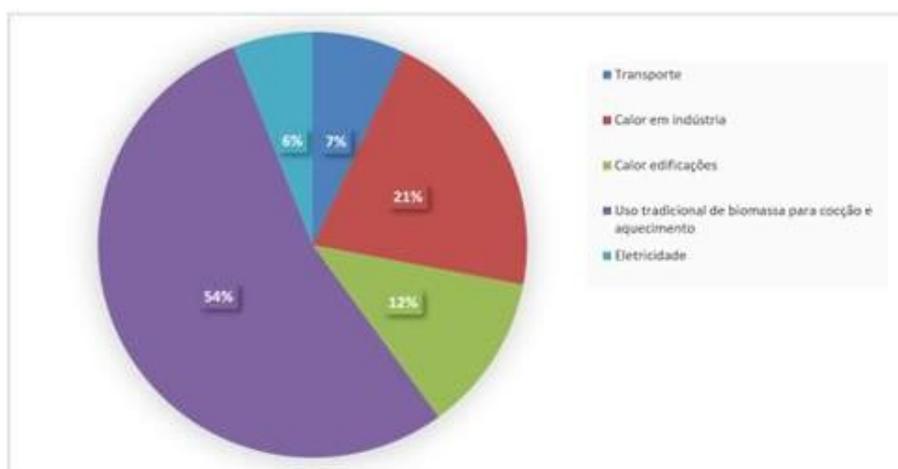
## Bioeletricidade

Segundo a *International Energy Agency* (IEA) a bioenergia<sup>12</sup> moderna terá um papel fundamental na transição energética rumo à descarbonização dos sistemas econômicos (IEA, 2022) (IRENA, 2022a). Em seus Cenário de Emissões Líquidas Zero-2050, a agência aponta que será necessário um rápido aumento do uso da bioenergia para deslocar combustíveis fósseis, principalmente no setor de transportes e para produção de bioeletricidade.

*Globalmente, o uso tradicional e ineficiente de biomassa sólida, como lenha, ainda representa mais da metade do consumo total global de bioenergia. Em 2020, 54% da bioenergia foi utilizada para cocção ou aquecimento residencial em sistemas de baixa eficiência de conversão (5% a 15%). O uso térmico correspondeu a 21% para indústria e 12% para uso residencial. O uso da bioenergia em transporte e eletricidade representaram 7% e 6% respectivamente (*

Figura 67).

Figura 67 - Participação no consumo global de bioenergia por uso final – 2020



Fonte: baseado em IEA (2021), IRENA (2021b).

Os cenários da IEA também reforçam a necessidade do uso da bioenergia como matéria-prima na indústria química para produzir produtos químicos e plásticos. A combinação da bioeletricidade com tecnologias de Captura de Carbono e Armazenamento (*BCCS – Bioenergy with Carbon Capture Storage*), também aparece

<sup>12</sup> Bioenergia moderna: refere-se ao uso da biomassa para produção de biogás/biometano, uso em edificações e na indústria para geração de calor e energia, produção de biocombustíveis líquidos, entre outros combustíveis produzidos a partir da biomassa.

como alternativa para redução de CO<sub>2</sub> em setores industriais de difícil descarbonização (IEA, 2021).

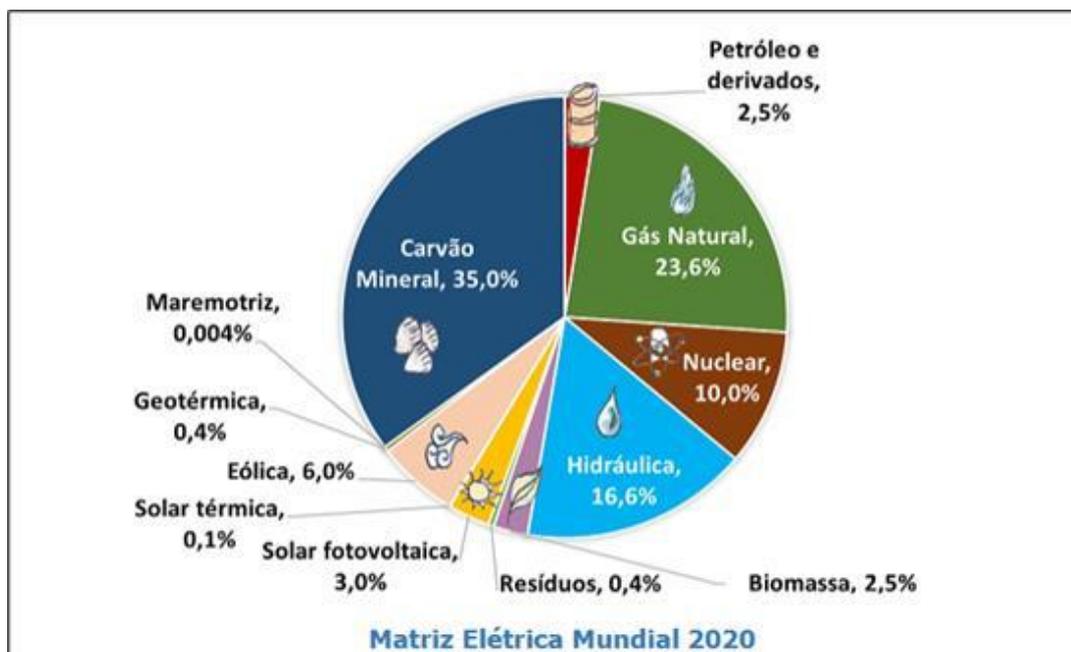
Diferentes estimativas apontam um alto potencial de energia primária disponível para produção de bioenergia em escala mundial. Entretanto, a concretização desse potencial requer uma gestão sustentável dos recursos e etapas que passam por otimização logística e de viabilidade econômica para melhor aproveitamento da biomassa, sobretudo dos resíduos (IPCC, 2021). Vale destacar que as ações e estratégias devem ser diferentes e adaptáveis aos contextos específicos de cada região para que esse potencial efetivamente se concretize.

Os cenários indicam que as metas de descarbonização só serão atingidas a partir do uso mais eficiente da biomassa e através de diferentes estratégias moldadas por várias ações. Como exemplo, cita-se a eliminação gradual dos usos tradicionais e ineficientes da biomassa para cocção e aquecimento substituídas por opções mais limpas e sustentáveis, como o de biogás e eletrificação baseada em fontes renováveis.

### Vetores para expansão da oferta da bioeletricidade sustentável

Em escala mundial, a bioeletricidade contribui com 2,0% da capacidade instalada e 2,5% da geração total de eletricidade (27 milhões de TWh) (Figura 68).

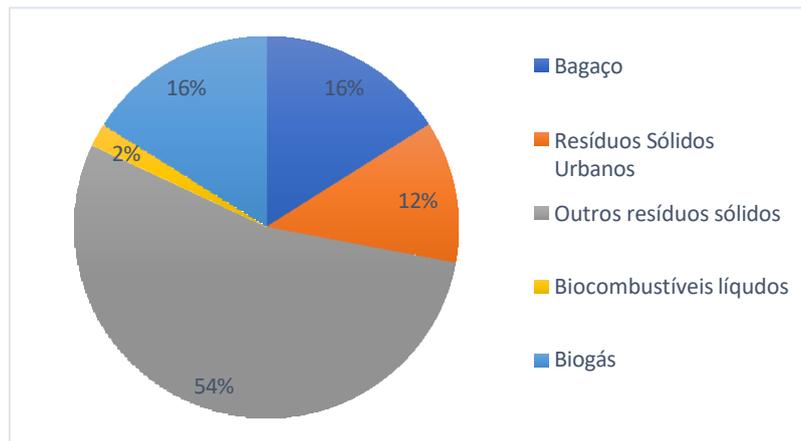
Figura 68 – Bioeletricidade em escala mundial



Fonte: (EPE E. d., 2022b)

Biomassa sólida, cavacos de madeira e pellets representam mais de 80% dessa capacidade instalada. O biogás contribui com (16%) da oferta da bioeletricidade na matriz elétrica mundial sendo que a Alemanha é o país que mais colabora com esse percentual (IEA, 2021), conforme apresentado na conforme apresentado na Figura 69.

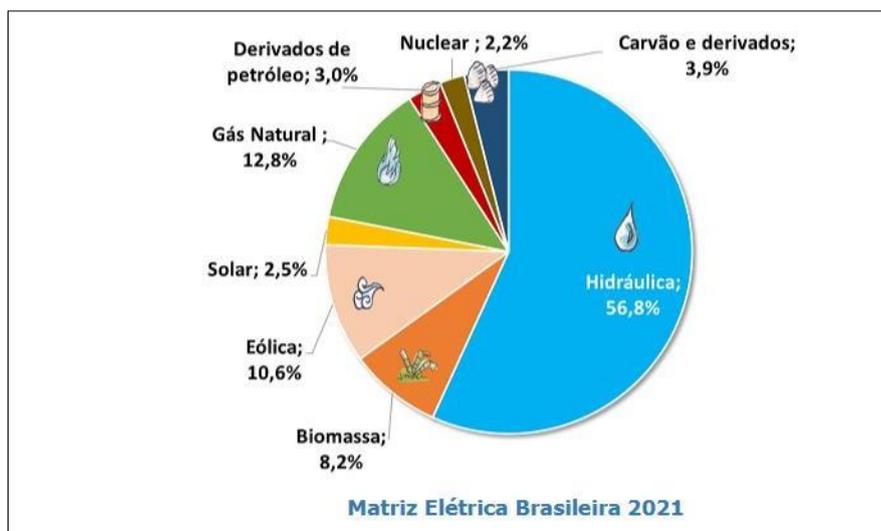
Figura 69 - Matriz elétrica mundial - participação da bioenergia na geração de eletricidade por matéria prima



Fonte: a partir de (IEA, 2021); (IRENA, 2022a)

No Brasil, a participação da biomassa para geração de energia é mais expressiva comparativamente a matriz elétrica mundial. No ano de 2021, a biomassa representou cerca de 9% da capacidade instalada da matriz elétrica nacional e 8% da geração total de eletricidade (~656 TWh). Figura 70 mostra a participação da biomassa na matriz elétrica nacional.

Figura 70 - Matriz elétrica nacional

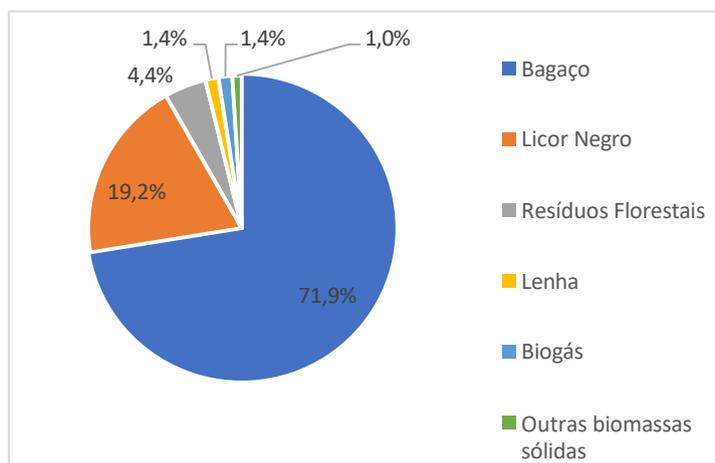


Fonte: (EPE E. d., 2022b)

Bagaço de cana e licor negro (lixívia) são as fontes de biomassa mais utilizadas para geração elétrica no Brasil. O bagaço contribui com 72% da biomassa geral e o licor negro 19%.

Em termos nacionais o biogás representa apenas cerca de 1,5% da biomassa utilizada para geração de eletricidade. Outros tipos de biomassa também compõem o mix de oferta de bioeletricidade, tais como, casca de arroz, lenha e resíduos sólidos urbanos, somando aproximadamente 1% da capacidade instalada da fonte de biomassa. A Figura 71 apresenta a participação da bioenergia na geração de eletricidade por matéria-prima.

Figura 71- Matriz elétrica nacional- participação da bioenergia na geração de eletricidade por matéria-prima.



Fonte: a partir de (ANEEL, 2023)

Assim como em outros setores, o uso de bioenergia para geração de eletricidade precisará contribuir para as metas de descarbonização deslocando fósseis, com eliminação gradual desses recursos.

Vale destacar que em 2020, a geração de eletricidade contribuiu com quase 40% do total global de emissões relacionadas à energia (IEA, Net zero by 2050: A roadmap for the global energy system, International Energy Agency, Paris., 2021a). No Brasil, em 2021, a geração de eletricidade foi responsável por 14% das emissões do setor de energia e processos industriais e uso de produtos (SEEG S. d., 2023b).

Como contribuição para a redução de emissões no setor elétrico, no âmbito do Acordo de Paris, o país assumiu o compromisso de expandir a participação de energias

renováveis na matriz (além da energia hídrica) em pelo menos 23% até 2030, incluindo as fontes de biomassa, de eólica, e do solar<sup>13</sup>.

Tendências e diretrizes internacionais mostram que a expansão da bioeletricidade deve ocorrer a partir de projetos competitivos frente às demais fontes e com a utilização de biomassa sustentável, como resíduos (IRENA, 2022a; IEA, 2021a).

O uso de resíduos gerados localmente aparece como estratégia importante para descarbonização dos sistemas energéticos e garantia de estabilidade aos sistemas elétricos. Destaca-se que com uma maior penetração das renováveis variáveis (solar fotovoltaica e eólica) a bioeletricidade apresenta-se como uma opção de fonte flexível e despachável podendo contribuir com uma maior estabilidade para o sistema elétrico.

Alguns estudos indicam que a geração flexível de bioenergia baseada em biogás poderia reduzir entre 10% e 18% da pegada de carbono da geração de eletricidade na Alemanha (Doutzauer, 2022). Para o Brasil (Neto & Gallo, 2021) estimaram as emissões evitadas pela substituição de óleo diesel por biogás para geração de energia em 6,7 milhões tCO<sub>2</sub>eq/ano. O aproveitamento de infraestruturas existentes e o uso de processos de cogeração<sup>14</sup> a partir da expansão de plantas e utilização de ativos ociosos também aparecem como estratégias para aumentar a oferta de bioeletricidade e opção para redução de emissões de CO<sub>2</sub> por queima de combustíveis fósseis.

A eficiência das turbinas a vapor em usinas exclusivamente de geração de energia de biomassa pode variar entre 10% e 30%. Ou seja, uma eficiência menor do que algumas opções de combustível fóssil, que podem ter eficiências superiores a 50%. A eficiência global dos ciclos combinados pode atingir cerca de 70% a 90%. (Schneider, Muller, & Karl, 2020); IEA,2011). A cogeração de biomassa pode ser baseada em todos os tipos de matéria-prima de biomassa, incluindo a queima de biogás e biometano. Segundo a IRENA, cerca de 60% da produção global de biogás é utilizada para geração de energia elétrica, sendo que a metade desse total é utilizada em ciclos combinados (CHP) (IRENA, 2020).

---

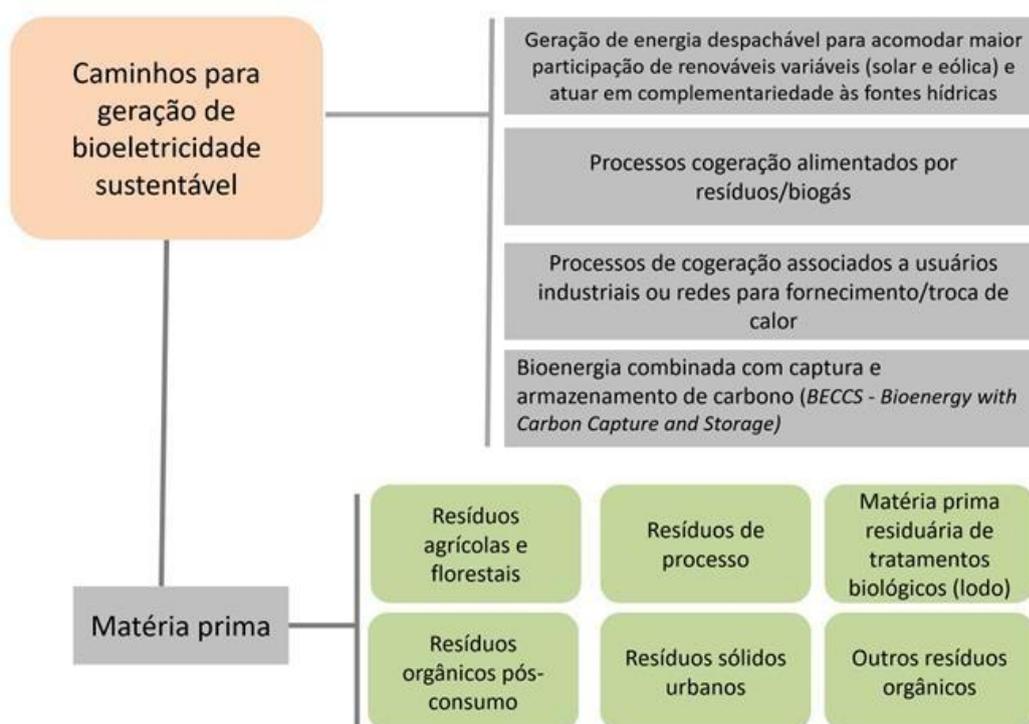
<sup>13</sup> Metas previstas nas Contribuições Pretendidas Determinadas Nacionalmente (CPDNs), que constituem o conjunto de metas aderentes aos objetivos do Acordo. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>

<sup>14</sup> Cogeração (*Combined Heat and Power - CHP*) é produção combinada de energia térmica e de energia mecânica/elétrica por meio de uma única fonte de combustível (por exemplo biomassa, gás natural, entre as fontes primárias de energia).

As tecnologias BECCS (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono) também tem sido considerada como essenciais para o alcance das metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, a partir de diferentes caminhos tecnológicos. Nessas tecnologias as emissões de carbono derivadas dos processos de conversão de biomassa em bioenergia são capturadas e armazenadas em formações geológicas ou incorporadas em produtos duráveis. Como a biomassa extrai carbono da atmosfera através da fotossíntese à medida que a planta cresce na lavoura, a BECCS pode ser uma tecnologia de emissões negativas quando bem implementada, cumprindo ressaltar que de acordo com o “Cenários IRENA”, tecnologias BECCS precisariam contribuir com 14% (cerca de 4,5 GtCO<sub>2</sub>) do total da redução das emissões de carbono necessárias até 2050 (IRENA, 2022a).

A Figura 72 traz, de forma resumida, os caminhos para a geração de bioeletricidade sustentável. Esses caminhos indicam projetos competitivos, que usem fontes sustentáveis de biomassa como os resíduos, infraestruturas de queima conjunta (processos de cogeração) e considerem os atributos de flexibilidade da fonte e incluam a combinação tecnologias de BECCS.

Figura 72 Condições para expansão da oferta de bioeletricidade



Fonte: Adaptado de IRENA, 2022; IEA, 2017. (IRENA, 2022; IEA, 2022; EPE, 2023).

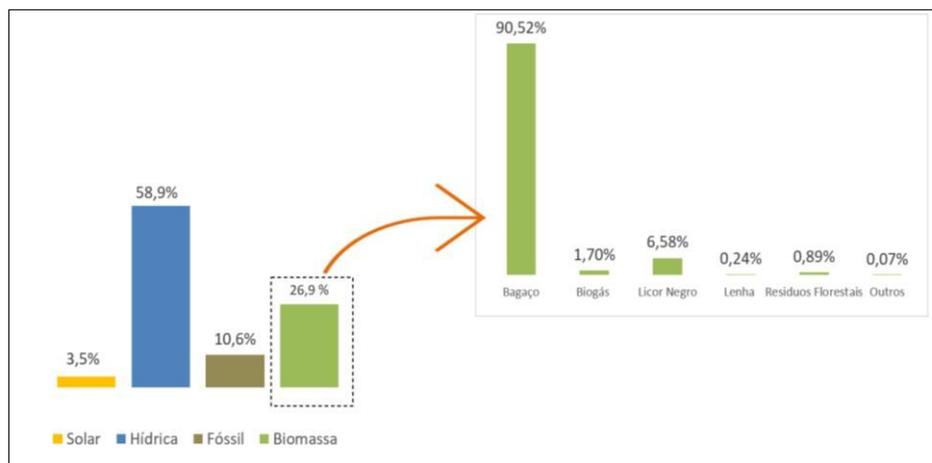
## Panorama Estadual da bioeletricidades: as oportunidades

No estado de São Paulo a participação da biomassa é ainda mais expressiva comparativamente ao mix da oferta de eletricidade em nível nacional e mundial (Figura 69 e Figura 70).

No estado, a biomassa representa cerca de 27% da capacidade instalada (do total da energia 25,3 GW) (

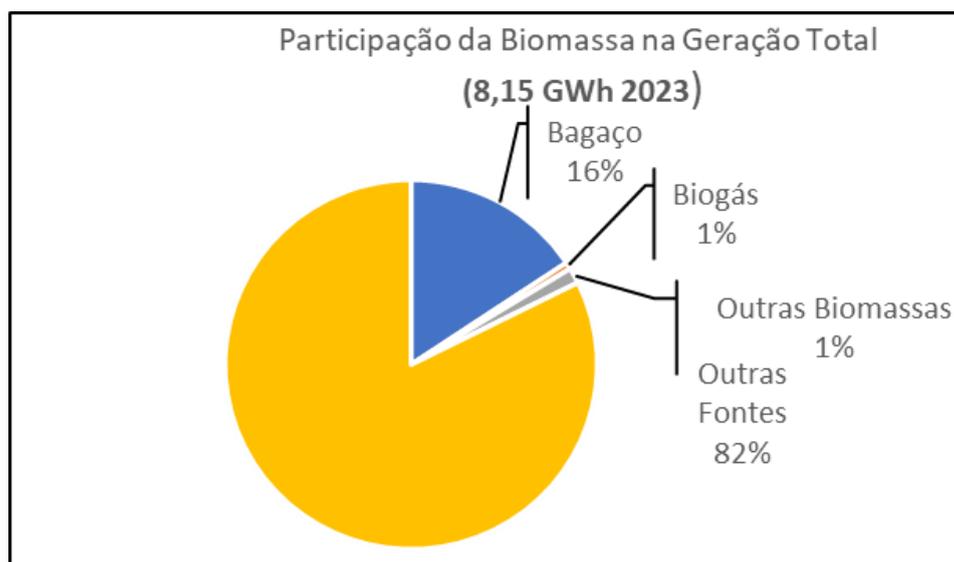
Figura 73) e 18% da energia gerada (Figura 74). Vale destacar que a bioeletricidade corresponde a 30% da energia renovável ofertada pelo estado.

Figura 73- Participação das diferentes fontes de biomassa na matriz elétrica estadual.



Fonte: a partir de (ANEEL, 2023)

Figura 74 - Participação da biomassa na geração total de energia em SP



Fonte: a partir de CCEE, 2022.

Como o maior produtor de etanol e açúcar do país, o ESP tem tradição na produção de bioeletricidade gerada pelo processo de cogeração pelo setor sucroenergético, utilizando bagaço de cana de açúcar como combustível. O setor sucroenergético contribui com mais de 90% da capacidade instalada de geração da fonte biomassa em geral.

O Estado de São Paulo é o estado que mais exporta bioeletricidade para o SIN. Com mais de 49% da capacidade instalada da fonte biomassa (do setor energético), contribui com cerca de 51% da bioeletricidade exportada para o sistema no período (CCEE, 2022); (UNICA, 2020).

A bioeletricidade de bagaço de cana é uma fonte sazonal não intermitente, é controlável e tem previsibilidade e confiabilidade, com a vantagem de ser complementar à geração hidroelétrica, uma vez que sua produção se dá durante os meses de safra, que são os mais secos do ano para a região Sudeste do Brasil, tradicionalmente quando os reservatórios das hidroelétricas estão mais baixos.

Outra vantagem da fonte é a proximidade das usinas aos grandes centros consumidores de energia, que diminui os custos de transmissão e perdas. Estas características são importantes no que diz respeito a uma maior confiabilidade do sistema elétrico. Isso porque, apesar da diminuição da participação relativa da fonte hídrica na matriz elétrica nos últimos anos, ainda há uma forte dependência do setor elétrico por esta fonte, que por sua vez, depende das condições hidrológicas dos níveis dos reservatórios.

A geração termelétrica no setor sucroenergético é tradicionalmente realizado por sistemas com ciclo de cogeração *topping* a vapor em contrapressão. Tem por princípio

o ciclo *Rankine*. Neste modelo, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor.

A possibilidade de exportar e comercializar a energia elétrica fez com que as usinas buscassem uma maior eficiência energética em seus processos de cogeração. Neste sentido, as tecnologias de caldeiras evoluíram ao longo dos anos. Caldeiras com até 100 bar de pressão são capazes de gerar excedentes de energia de até 110 KWh por tonelada de cana moída. Além disso, essa evolução na capacidade de geração de vapor das caldeiras foi acompanhada pelo desenvolvimento de novos tipos de caldeiras, como as de grelha rotativa e de leito fluidizado. Vale ressaltar que o setor ainda conta com sistemas convencionais de produção de energia elétrica a partir da biomassa, baseado em ciclos a vapor e combustão direta da biomassa. Esses sistemas, têm como características o reduzido desempenho energético e a baixa capacidade. Estes ciclos operam com pressões de vapor saturado da ordem de 2,1 Mpa (21 bar), muito abaixo dos desejados 6,5 Mpa (65 bar) utilizados em usinas com instalações termelétricas novas (Lopes, 2013).

Outros tipos de biomassa também são utilizados como fonte de energia para produção de bioeletricidade, tais como a lenha, a lixo (resíduo do setor de papel e celulose) e cascas de arroz. A vinhaça, para produção de biogás e os resíduos sólidos urbanos (através do gás de aterros - biogás) também contribuem para oferta de bioeletricidade conforme a apresentado na

Figura 73 acima, que traz a participação das diferentes fontes de biomassa na matriz elétrica estadual.

## Resíduos orgânicos

Como já mencionado, os resíduos orgânicos são apontados como impulsionadores para transição energética, com potencial de expandir a oferta limitada de biomassa e desenvolver a economia circular local.

No estado de São Paulo, os bioenergéticos produzidos regionalmente podem ser utilizados para geração de energia, o que leva a um aumento na oferta de bioeletricidade. A utilização de biogás em caldeiras ou em térmicas a biometano representam alternativas para aumento da oferta de bioeletricidade no curto prazo, à medida que pode aumentar o fator de capacidade da geração de bioeletricidades das usinas.

No contexto do PPE/20250 foi avaliado o potencial de biogás a partir de bioenergéticos disponíveis regionalmente, considerando-se os grandes fluxos de resíduos orgânicos

agregados por região administrativa. O potencial estimado considerando três setores: saneamento, agropecuário e sucroenergético foi da ordem de 5,7 bilhões de Nm<sup>3</sup> por ano, considerando-se os resíduos: lodo de estações de tratamento de efluente; vinhaça e gás de aterro (e Tabela 7 e

Figura 75). As regiões de Araçatuba, Ribeirão Preto, São José do Rio Preto e Campinas aparecem como maiores produtoras de biomassa, onde estão concentrados grande número de usina de açúcar e álcool no Estado.

Esse potencial de biogás pode contribuir com 1,6 GWm de bioeletricidade até 2050, aumentando a participação no mix de biomassa de 1% para 10% (Figura 76). Nesse cenário o bagaço ainda terá uma participação importante na matriz elétrica (23%), valendo destacar que outros resíduos também podem ser utilizados para geração de biogás, tais como a torta de filtro, outro subproduto do setor sucroenergético.

É importante ressaltar, entretanto, que ainda existem vários desafios para que este potencial se concretize, tais como logística e ganho de escala, mudança culturais, ajuste regulatórios e de incentivos, e viabilização de diferentes modelos de negócios.

Destaca-se ainda que Políticas públicas como o RenovaBio<sup>15</sup> que entrou em vigor em 2020, devem acelerar a produção e uso de biocombustíveis.

O PEE/SP 2050 projeta um crescimento de 4,1% na produção de etanol para 2031. As projeções da produção de etanol e açúcar, indicam que haverá elevada quantidade de resíduos deste setor, a qual pode ser destinada à produção de biogás e biometano.

---

<sup>15</sup>

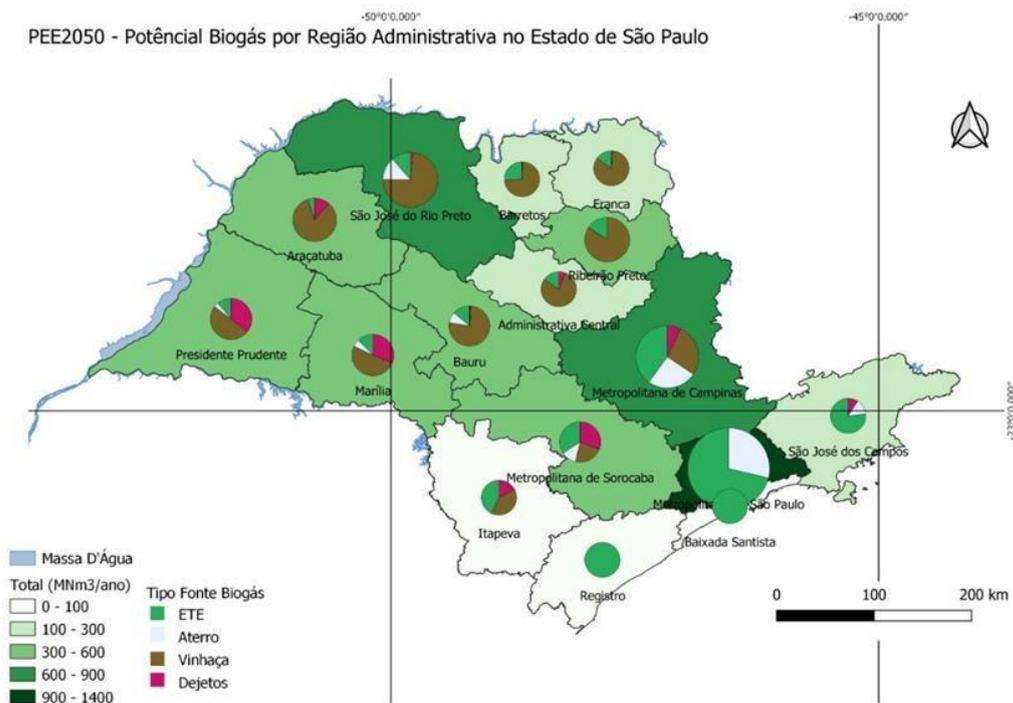
O RenovaBio política que reconhece o papel estratégico dos biocombustíveis (etanol, biodiesel, biometano, bioquerosene, segunda geração, entre outros) na matriz energética brasileira no que se refere à sua contribuição para a segurança energética. É composto por três eixos estratégicos: 1) Metas de Descarbonização; 2) Certificação da Produção de Biocombustíveis; e 3) Crédito de Descarbonização (CBIO). Os biocombustíveis considerados no RenovaBio são: etanol anidro e hidratado (de primeira e de segunda geração); biodiesel; biometano, bioquerosene de aviação (bioQAV), além de biocombustíveis alternativos. (<https://www.gov.br>).

Tabela 7 - Potencial para produção de biometano a partir de bioenergéticos regionais

Região Administrativa	Potencial (MNm3/ano)* - BIOGÁS			
	ETE (MNm3/ano)	Vinhaça (MNm3/ano)	Dejetos (MNm3/ano)	***Gás Aterro (MNm3/ano)
Administrativa Central	17,65	91,08	7,00	
<b>Araçatuba</b>	19,58	<b>319,13</b>	43,95	
Barretos	50,93	144,52	1,33	
Bauru	46,39	256,61	3,53	28,29
Franca	34,32	187,25	1,92	
Itapeva	24,09	22,73	9,57	
Marília	44,27	180,74	111,15	19,56
Presidente Prudente	38,88	173,06	124,32	11,91
Registro	12,39			
<b>Ribeirão Preto</b>	63,63	<b>343,23</b>		0,91
<b>São José do Rio Preto</b>	69,38	<b>448,08</b>	8,38	80,92
São José dos Campos	113,54	0,00	13,48	21,26
Metropolitana de <b>Campinas</b>	317,10	<b>217,79</b>	54,64	201,37
Metropolitana de Sorocaba	115,81	77,47	104,56	40,67
Baixada Santista	83,78			
Metropolitana de São Paulo	960,41			387,13
	2.012,16	2461,68	483,84	792,02
	<b>2 bilhões</b>	<b>2,4 bilhões</b>	<b>0,48 bilhões</b>	<b>0,79 bilhões</b>

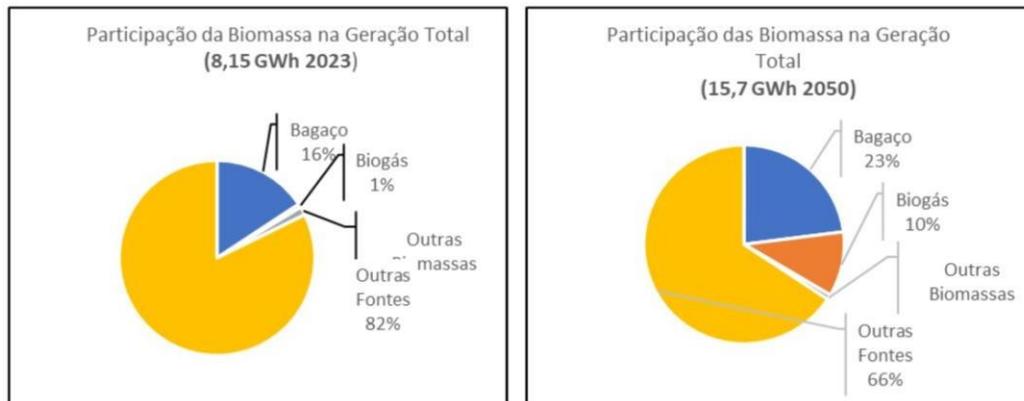
\* Fonte: Potencial calculado/elaboração própria para o PEE2050.  
 \*\*\* aterros já implantados > 500 t/dia .  
 Valor acumulado (2023-2030)

Figura 75 - Potencial de biogás por Regiões Administrativas do estado de SP



Fonte: Elaboração própria para o projeto.

Figura 76 - Evolução da participação da Biomassa



Fonte: Elaboração própria para o projeto.

Outros resíduos produzidos regionalmente também poderão compor essa oferta: resíduos sólidos urbanos (fração orgânica) ou gás de aterros sanitário. A seguir, seguem as considerações sobre essas fontes de biomassa.

### Resíduos sólidos urbanos

Alinhada com a Política Nacional de Resíduos Sólidos que em seus princípios discorre sobre “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”, a hierarquização no uso dos resíduos prevê, em primeiro lugar, a prevenção da geração de resíduos, depois o reuso, depois a reciclagem. Na sequência, a recuperação energética dos resíduos e como última alternativa, a disposição final em aterros.

A adoção de sistemas de valorização dos resíduos sólidos urbanos possibilita o uso do resíduo para obtenção de energia, dispondo-se o rejeito nos aterros sanitários, somente após esgotadas todas as demais possibilidades de sua valorização.

A captação e uso do biogás gerado nos aterros sanitários deve ser fortalecida, pois reduz significativamente as emissões de GEE, podendo adicionalmente gerar energia. O Estado de São Paulo, em seu Plano Estadual de Resíduos, coloca a Economia Circular como visão de futuro para a gestão de resíduos dentro do estado (SIMA S. d., 2020)

## Combustíveis de Derivados de Resíduos (CDR)

O CDR é produzido a partir dos Resíduos Sólidos para utilização como combustível, principalmente em fornos de cimento (coprocessamento). Também pode ser utilizado para geração de energia elétrica em usinas termelétricas.

No caso de resíduos sólidos urbanos, após a remoção dos materiais recicláveis e remoção dos materiais não combustíveis, na coleta e/ou centro de triagem, ele passa por um processo de trituração e, posteriormente, por um processo de secagem, para aumentar o poder calorífico do produto e evitar processos de fermentação.

Segundo a regulamentação da CETESB (nº 73, de 06-08-2020), apenas poderão ser utilizados para fins de CDR, os resíduos sólidos urbanos que não apresentem viabilidade técnica ou econômica para serem reciclados, bem como aqueles que, após a triagem realizada por uma cooperativa de catadores, sejam considerados rejeitos.

No contexto apresentado, grandes geradores de biomassa podem desempenhar papéis de âncoras para o desenvolvimento da cadeia de bioenergia, incluindo bioeletricidade, fomentando condições para que o ecossistema de negócios se consolide no estado com atração de pequenas empresas, inovação e desenvolvimento tecnológico. Nessa perspectiva, outros biocombustíveis como etanol de segunda geração também devem ganhar escala no médio e no longo prazo.

Para 2030 o elevado potencial de bioenergéticos disponíveis regionalmente no Estado de São Paulo será aproveitado para a produção de biocombustíveis de forma otimizada. Tecnologias amadurecidas devem evoluir, ainda mais, em ganhos de eficiência e otimização de processos de produção e logística.

Com relação à bioeletricidade, os atributos das fontes serão considerados para a competitividade e expansão da respectiva fonte. Mecanismos de incentivos devem ser considerados para expansão da estrutura de distribuição de biometano, bem como para concentração e escalabilidade de biomassa a partir de diferentes fontes.

Em 2040 e 2050 o uso otimizado e regionalizado de diferentes tipos de bioenergéticos será intensificado. Deverão surgir novos arranjos e modelos de negócios que favoreçam o desenvolvimento da geração distribuída a partir de diferentes tipos de matérias primas. Esses novos modelos de negócios serão baseados em inovação e orientados para digitalização e Economia Circular, conforme descrito a seguir.

O Estado de São Paulo tem potencial para impulsionar a produção de bioenergia e em especial a produção de bioeletricidade seja pelo processo de cogeração de bagaço de

cana-de-açúcar ou pela produção de biogás/biometano, a partir da vinhaça entre outros resíduos produzidos regionalmente.

A prática traz benefícios sociais a partir da geração de empregos diretos e indiretos, o que pode resultar no aumento da qualidade de vida. Além disso, fomenta a inclusão social, a geração de novas atividades econômicas, o fortalecimento da indústria local e a promoção do desenvolvimento regional pelo estímulo à inovação e pelo fortalecimento do desenvolvimento da cadeia de valor.

A bioenergia produzida a partir de materiais orgânicos é um componente essencial de uma Economia Circular e pode contribuir para a descarbonização da matriz energética do Estado de São Paulo.

Recomendações para aumentar a oferta de bioenergia no estado de São Paulo estão relacionadas com o melhor aproveitamento do bagaço de cana de açúcar para produção de eletricidade e de outros bioenergéticos do setor, tais como palhas e pontas, vinhaça e torta de filtro.

Adicionalmente, sugere-se o uso de outros tipos de resíduos, tais como a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, do lodo proveniente das estações de tratamento de efluente e de dejetos de animais a partir de diferentes rotas tecnológicas.

Vale mencionar que há uma nítida diferença na viabilidade dos projetos entre pequenos, médios e grandes produtores, para produção dos diferentes biocombustíveis (etanol, biogás/biometano, bioeletricidade etc.) o que implica em desafios de magnitudes diferentes para cada perfil de produtor.

Existe ainda a carência de equipamentos nacionais para implementação e manutenção de projetos, limitações de infraestrutura e questões regulatórias que demandam aprimoramento. Vale destacar que o desenvolvimento da cadeia de bioenergia no Estado de São Paulo tem a capacidade de impulsionar o PIB através da geração de empregos.

Diante das considerações anteriores sobre a visão de futuro e da análise das questões conjunturais apresentadas e trianguladas com as percepções de diferentes atores da cadeia de produção de bioenergia, sugere-se concentrar ações em quatro macro áreas:

- a) Infraestrutura; b) Fomento; c) capacitação e conhecimento; d) regulação.

#### *Infraestrutura*

A solução logística para o escoamento e aproveitamento de pequenos volumes de produção de biogás representa um grande desafio em função das limitações geográficas da rede distribuição hoje existente. A conexão com as fontes de geração de biometano são muito distintas (predominantemente descentralizadas) da conexão com as fontes de gás natural (predominantemente centralizadas).

Com relação à infraestrutura para expansão de biogás/biometano, recomenda-se o fomento da rede de distribuição de gás através de mecanismos de incentivos diretos ou indiretos, tais como incentivo ao uso de biogás e biometano que podem favorecer a expansão da fonte à medida que se desenvolve o mercado consumidor, implicando em atração do setor privado para investimentos em infraestrutura. Cabe observar outra oportunidade para o uso de biometano no estado, que seria a substituição do diesel usado no setor agroindustrial, em caminhões, tratores, colheitadeiras e outros maquinários agrícolas, ou atendendo a veículos urbanos ou rodoviários que circulem nas regiões não abastecidas pela rede de gasodutos.

#### *Fomento*

- Promoção de mecanismos de incentivo para a inserção da bioenergia, tais como linhas de financiamento subsidiadas.
- Elaboração de planos/diretrizes para atração da indústria com vistas a desenvolver a cadeia produtiva em nível estadual (exemplo, fabricação de biodigestores, membranas de purificação, equipamentos de análise e monitoramento de gases, gaseificadores, etc.).
- Estabelecimento de programas de colaboração entre indústria, governo e universidade com o intuito de promover trocar conhecimentos, manter isonomia de informações e inovação.
- Promoção de integração setorial (e entre indústrias distintas) com benefícios de competitividade, inovação e avanços tecnológicos através de compartilhamento de infraestrutura e buscando sinergias entre recursos (resíduos).
- Estímulo à compra e manutenção de ativos, ao longo da vida útil das plantas, não apenas no período de sua implantação.
- Metas de inserção de frotas de veículos movidos a biocombustíveis nos planos de mobilidade

- Redução da carga tributária sobre máquinas e equipamentos utilizados na cadeia de produção para geração de bioenergia.
- Fomento à aquisição de energia elétrica gerada a partir de biogás/bioeletricidade em prédios públicos.
- Estabelecimento e fortalecimento do estado como orquestrador institucional para o desenvolvimento de *hubs* de bioenergias, com vocações regionalizadas a partir de grandes geradores de biomassa.

### *Capacitação e Conhecimento*

- Divulgação de conhecimentos técnicos sobre biogás/ biometano e outras rotas tecnológicas buscando evidenciar a curva de aprendizagem das diferentes tecnologias.  
Difusão de conhecimento sobre viabilidade e retorno de investimento dos projetos, através de cartilhas voltadas para pequenos e médios produtores.
- Fortalecimento da Pesquisa e Desenvolvimento, através de parcerias com universidades, empresas fabricantes de equipamentos e incentivo às startups.
- Designação pelo estado de instituição de coordenação das iniciativas de geração, divulgação e disseminação de conhecimento.
- Incentivo a elaboração pelos municípios da caracterização dos fluxos de resíduos produzidos regionalmente, com a finalidade de direcionar as políticas públicas e estimular investimentos privados para geração de energia a partir de resíduos pelas diferentes rotas.
- Estímulo à implantação de projetos de biogás em pequena e média escala, em propriedades rurais, criando soluções integradas de gestão de resíduos e aproveitamento energético.

### *Regulação*

A importância de evidenciar o atributo biometano, da molécula é fundamental. É importante também valoração dos atributos sistêmicos da bioeletricidade (proximidade dos centros de carga, despachabilidade, mitigação de gases de efeito estufa). Como aprimoramento regulatório recomenda-se:

- Reconhecimento dos atributos ambientais na aquisição de biometano por parte das concessionárias de distribuição de gás.
- Criação de produtos específicos para o biogás nos leilões de energia elétrica do mercado regulado, que considerem os atributos sistêmicos e ambientais da fonte.
- Promoção de mecanismos que favoreçam a recuperação energética dos aterros sanitários.
- Desenvolvimento de mecanismos de certificação, a exemplo do RenovaBio.

## Pequenas centrais nucleares (PCNs)

A energia nuclear não deve ser descartada em ambientes de planejamento energético que almejam atingir o net-zero. Seus principais atributos envolvem a confiabilidade de geração, elevado fator de capacidade e a ausência de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, sabe-se que o Brasil possui consideráveis reservas de urânio e domina boa parte do ciclo de produção do combustível.

O PEE/SP 2050 reconhece a importância para o Estado de São Paulo acompanhar e participar dos estudos e das decisões referentes ao desenvolvimento da energia nuclear no Brasil. Contudo, sugere-se como proposta específica deste PEE/SP 2050, iniciar os debates e liderar as iniciativas, inclusive em nível nacional, para o desenvolvimento e adoção de tecnologias para produção de energia nuclear em pequenas potências (até 300 MWe) – as chamadas pequenas centrais nucleares (PCNs).

Na construção de PCNs são utilizados os *small modular reactors* (SMR), que são concebidos para serem implementados de forma “modular”, ou seja, uma construção em série, frequentemente em um mesmo sítio e operando, coletivamente, como se fosse uma grande central nuclear (IAEA, 2021) (WNA, 2015).

Em São Paulo, a central nuclear que está sendo construída no Laboratório de Geração Nucleoelétrica (Labgene) de Aramar pode ser classificada como uma PCN, ainda que não tenha prioritariamente a vocação de geração de potência para injeção na rede elétrica. Entende-se que essas iniciativas de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia, lideradas pela Marinha do Brasil, em território paulista, criam as vantagens competitivas sugeridas neste PEE/SP 2050 e que direcionam como proposta de longo prazo, para São Paulo, explorar o conceito de PCN.

Nesta primeira versão do PEE/SP 2050, nenhuma capacidade de produção nuclear de pequeno porte é indicada. No entanto, sugere-se que São Paulo inicie uma agenda de desenvolvimento e de pré-licenciamento de PCNs, que busquem explorar todas ou algumas das vantagens oferecidas por esses reatores de pequeno porte frente aos de grande porte convencionais (INGERSOLL, 2009) (LOCATELLI, G. & MIGNACCA), tais como:

- Tamanho reduzido que permite modularidade, alto grau de padronização, possibilidade de pré-fabricação dos módulos e maior versatilidade no transporte, podendo ser transportado inclusive por caminhões.
- Reduzidos tempos de *start-up* (tempo necessário para o início de operação e a efetiva geração).
- Reatores integrados, em que os componentes do circuito primário estão contidos no vaso de pressão, reduzindo custos com segurança e eliminando fontes de acidentes como tubulações de resfriamento e sistemas complexos de injeção de água.
- Minimização das possibilidades de ocorrência de *Loss of Cooling Accident* (LOCA).
- Eliminação de impactos “off-site” em caso de acidente.
- Maior versatilidade na escolha do local de instalação da planta.
- Menor área ocupada e área de segurança (*Emergency Planning Zone*, EPZ).
- Viabilização da solução nuclear para locais remotos, cujas redes elétricas são normalmente operadas por pequenas companhias elétricas, que não têm as condições técnicas e econômicas para lidar com grandes unidades.

Ao longo do horizonte de planejamento até 2050, o Estado de São Paulo pode vislumbrar uma agenda estratégica e de desenvolvimento, com foco em PCNs, buscando explorar sinergias fortes entre um eventual programa de geração elétrica com PCNs e as demais estruturas nucleares já concebidas e em operação no Estado como:

- O Reator Multipropósito Brasileiro (RBM) desenvolvido em Iperó, região metropolitana de Sorocaba;
- O Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares, sediado na capital paulista;
- O Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), localizado em Piracicaba;
- O Instituto de Medicina Nuclear, também de Piracicaba.

Caso São Paulo desenvolva um programa local de PCNs, é possível revisar cenários para 2050 e incluir a construção de uma capacidade nuclear paulista até 2050, sempre

na forma de PCNs. Com isso, pode-se vislumbrar um programa estratégico de concepção de reatores nacionais, com potências variando entre 25MW e 300MW, os quais seriam pré-licenciados e colocados à disposição para os planejadores e agentes econômicos, principalmente para o período final do horizonte de planejamento do PEE/SP 2050.

## Balanco de Energia Elétrica

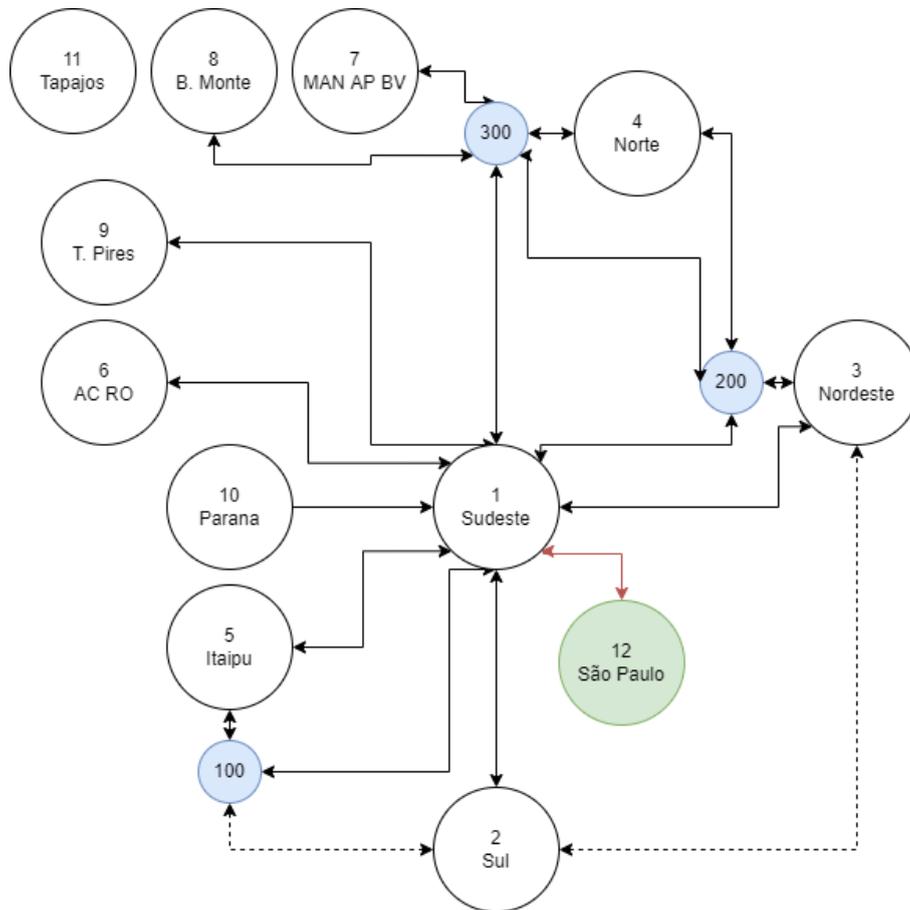
### Análise dos resultados dos modelos energéticos (setor elétrico)

Para depurar os resultados do balanço de energia elétrica, em adição ao balanço estático, empregou-se o modelo NEWAVE (CEPEL, 2022) para simular a capacidade de geração de eletricidade internamente ao Estado de São Paulo. A utilização do modelo, amplamente conhecido no setor elétrico, tem como principais objetivos:

- (i) proporcionar uma expectativa de geração hidroelétrica e térmica mais refinada e coerente com a operação centralizada exercida pelo ONS;
- (ii) avaliar cenários de baixa afluência através de análise estatística; e
- (iii) considerar além do Estado de São Paulo o Sistema Interligado Nacional.

Para avaliar São Paulo dentro do contexto do SIN criou-se um submercado específico para o Estado conforme Figura 77. A Simulação Através do Modelo NEWAVE teve como base os dados do SIN como carga, oferta e interligação do PDE 2032/2031 (EPE, 2022). Após o horizonte de 2036 foi considerado o balanço energético de SP, com Custo Marginal de Operação (CMO) constante ao longo do tempo.

Figura 77 – Submercado Simulação



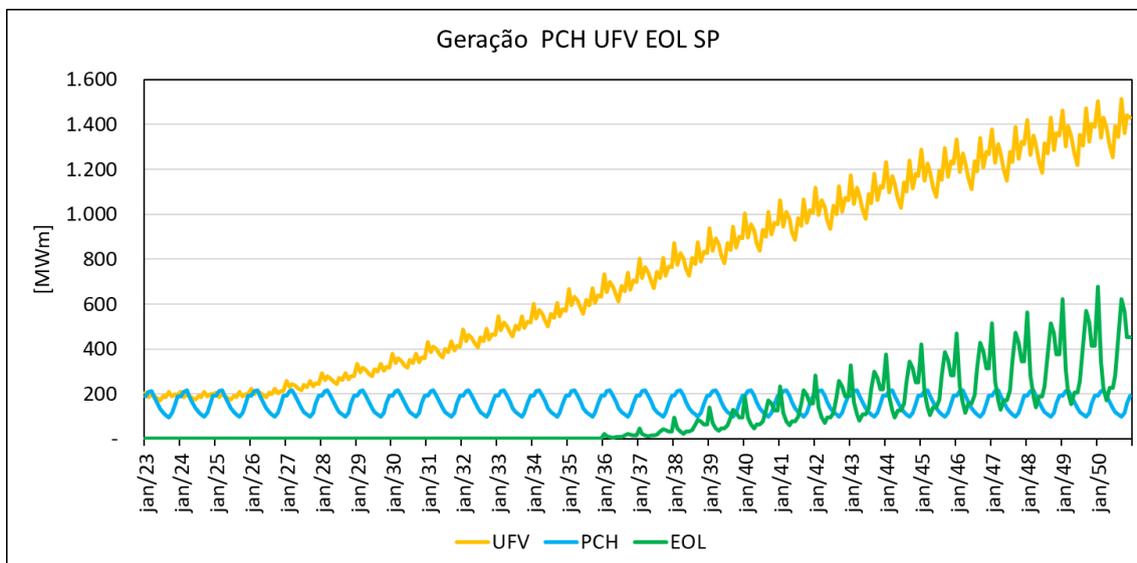
As gerações hidroelétricas e termoeelétricas centralizadas resultantes da simulação foram apresentadas em seus respectivos capítulos, e na Figura 78 apresentam-se os valores mensais considerados para as Usinas não centralizadas (Ou Não Simuladas), que pelo fato de não serem simuladas no modelo, são abatidas diretamente da carga. Na Figura 78. Observa-se um crescimento da geração das Usinas Foto Voltaicas (UFV) e das Usinas Eólicas (EOL) em contraste à estagnação da geração das Pequenas e Mini Centrais de Geração Hidrelétricas (PCHs e CGHs, respectivamente).

Este fato reflete a premissa adotada na elaboração do plano de expansão de geração, de não se considerar expansão da capacidade instalada em hidreletricidade no Estado, tendo em vista a baixa atratividade econômica e financeira para o aproveitamento do potencial remanescente do Estado.

Além disso, coerente com a constatação do baixo potencial eólico offshore e o desprezível potencial eólico onshore, observa-se que a geração eólica cresce apenas a

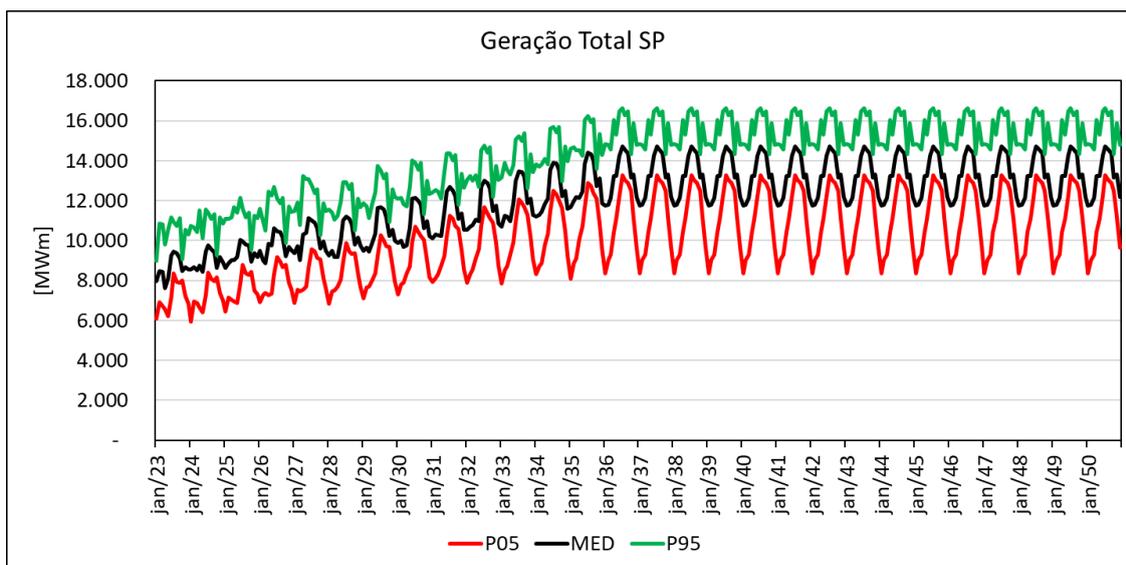
partir de 2031, quando se estima que o aproveitamento do potencial offshore de SP se tornará viável economicamente.

Figura 78 – Geração Usinas Não Simuladas



Avaliando a geração de energia total do estado de São Paulo, pode-se projetar um crescimento de 10,7 MW médios em 2023 para 13,0 GW médios em 2050, representando um crescimento de 21% na geração de energia elétrica (Figura 79).

Figura 79 – Geração Total SP



É importante notar a característica sazonal e variável da Geração de Energia do Estado de São Paulo, que tem impacto considerável na importação de energia elétrica do SIN.

Observe-se ainda, que devido a forte complementariedade entre a geração hidrelétrica e a geração à partir da biomassa de cana no Estado, onde a geração de biomassa é significativa e ocorre essencialmente no período da estiagem, a sazonalidade da geração total apresenta uma sazonalidade distinta das demais regiões brasileiras e mesmo do Sudeste: Em São Paulo, a capacidade de geração de eletricidade é maior nos períodos de estiagem do que nos períodos úmidos da região Sudeste do Brasil.

Assim, a bioeletricidade gerada a partir do bagaço de cana é um diferencial para o Estado do São Paulo, que depende menos das hidrologias favoráveis do que outras regiões brasileiras.

### **Impacto das Mudanças Climáticas na geração hidrelétrica**

Neste item, avalia-se os impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica para geração de eletricidade, quantificando-se a variação na geração das usinas hidrelétricas que operam no Sudeste brasileiro, particularmente no Estado de São Paulo. Observe-se na [Figura 80](#), que a geração hidrelétrica centralizada em São Paulo, sofre impacto climático relevante quando se compara a geração esperada no cenário de referência (REF), com o cenário em que se considera os efeitos dos impactos climáticos na disponibilidade hídrica (IC).

Note-se que os eventos extremos de geração são amplificados sob os efeitos dos impactos climáticos, com secas mais severas e períodos chuvosos mais intensos em relação ao cenário de referência, onde não se considera esses impactos. Destaque-se que em termos médios, não são observadas diferenças acentuadas, mas tomando-se como exemplo a bacia do Rio Paranapanema ([Figura 81](#)) a energia armazenada no final dos períodos secos fica consideravelmente menor devido ao efeito das mudanças no clima, que impactam na disponibilidade hídrica.

Observando-se a bacia do Rio Paraná ([Figura 82](#)), as diferenças aparecem, porém com menor intensidade. Essa observação é coerente com a expectativa de evolução da disponibilidade hídrica, onde se prevê que mais ao Sul do Brasil, onde se localiza a Bacia do Rio Paranapanema, os impactos sejam maiores do que nas regiões mais centrais do Brasil, onde se localiza a bacia do Rio Paraná.

Figura 80 – Geração Hidroelétrica Centralizada SP.

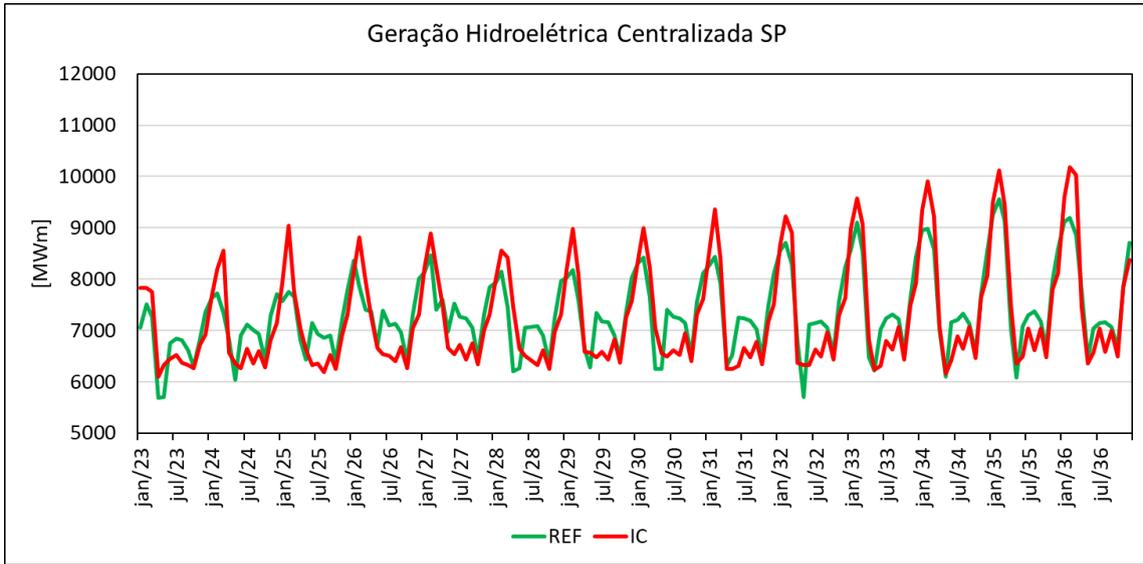


Figura 81 – Energia Armazenada REE Paranapanema

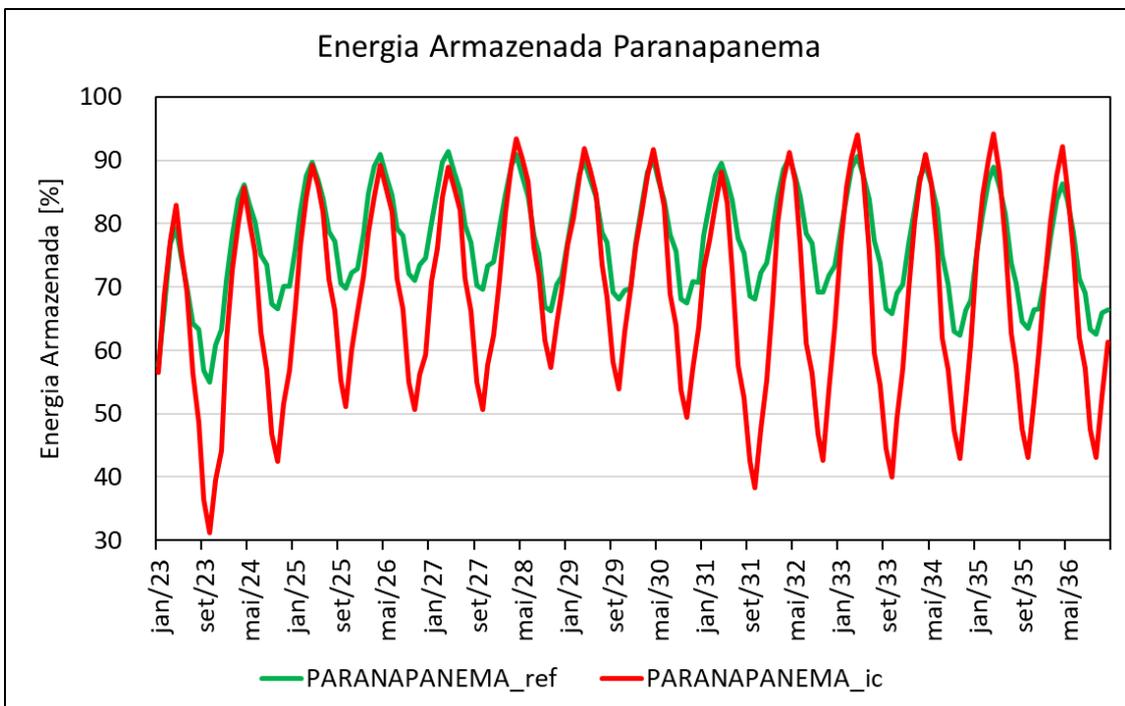
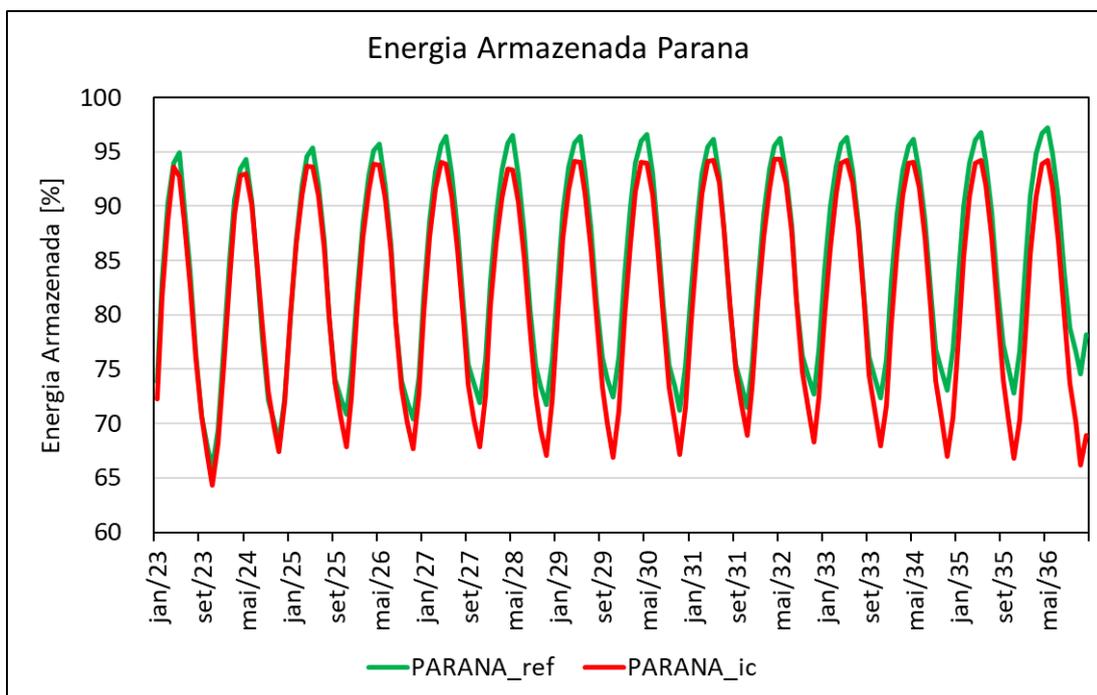


Figura 82 – Energia Armazenada REE Paraná



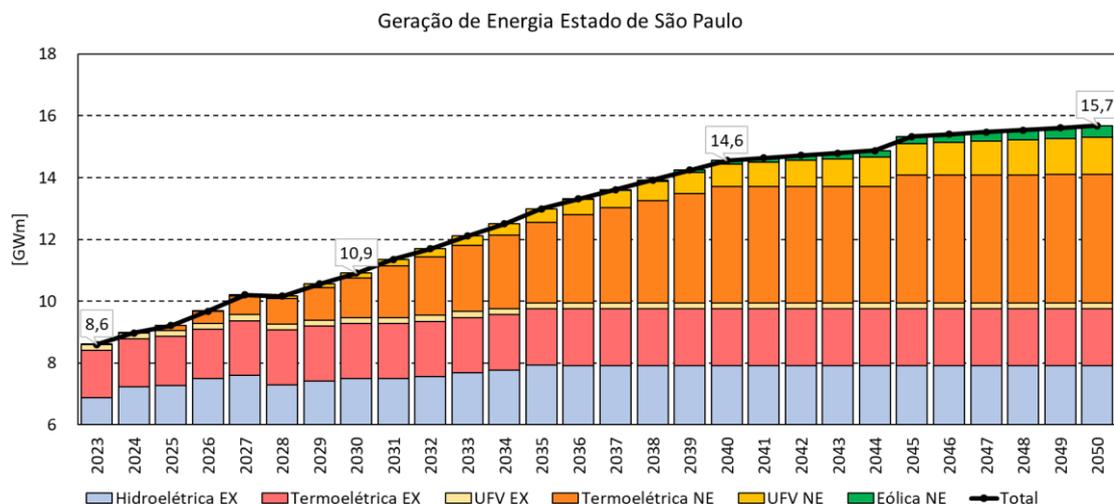
### Consolidação do Balanço de Energia Elétrica

De acordo com os resultados dos estudos elaborados no âmbito do PEE/SP 2050, a oferta de energia elétrica no Estado de São Paulo, definida como a capacidade interna de geração de eletricidade no estado deve apresentar um crescimento de 94% no horizonte 2023/2050. Tendo-se empregado nas estimativas de geração nesse horizonte, as expectativas apresentadas na mesma modelagem computacional que são utilizadas pelas instituições do setor elétrico brasileiro na definição do plano de expansão da oferta elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e na programação da operação, elaborada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 83. Note-se que há uma expectativa de elevação considerável na geração a partir de energia solar fotovoltaica (UFV) após 2030, mas que a geração eólica (EOL) passa a ter alguma representatividade a partir de 2040, com a expansão de parques eólicos *off-shore* no litoral paulista. Essa perspectiva conservadora para a geração eólica deve-se ao fato de que observando-se os mapas de potencial eólico, o Estado de São Paulo não apresenta potencial expressivo quando comparado ao potencial de outros estados da federação, particularmente do Nordeste brasileiro.

Observe-se ainda que a geração termelétrica a gás natural tem espaço na evolução da matriz de geração.

Figura 83- Projeção da Energia Elétrica Gerada no Estado de São Paulo para o horizonte 2023/2050



Fonte: Elaboração própria

OBS: Na legenda, da Figura 83, a denominação “EX” representa a geração originada pelas plantas já existentes, portanto, em operação. Por outro lado, a denominação “NE” apresenta a geração esperada para as plantas em expansão e, portanto, que ainda devem ser implantadas no sistema

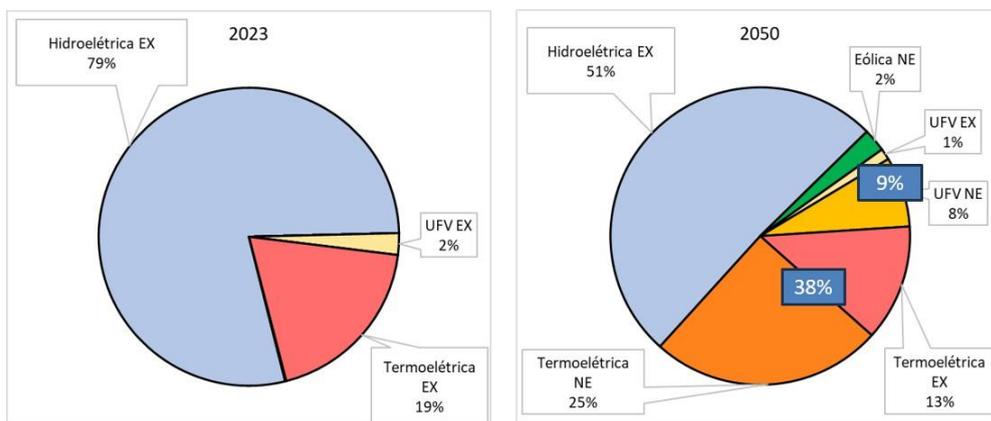
Essa expansão térmica é representada por uma usina com capacidade de 400 MW de potência instalada, a gás natural, operando com fator de capacidade mínimo de 40% e que sua entrada em operação, a partir de 2030, em adição à usina térmica de Cubatão, usina que já está contratada e entra em operação a partir de 2026, será acompanhada por um sistema de captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> produzido.

Assim, para a térmica adicional, proposta neste plano, não se considera emissão de GEE, em função do sistema de captura e armazenamento proposto.

No mais, devido à vasta exploração da hidreletricidade já realizada para os cursos d’água paulistas, não se projeta expansão significativa da geração hidrelétrica, ficando a evolução dessa fonte, restrita à potencial reabilitação de pequenas centrais hidrelétricas e à expansão de capacidade em algumas centrais de maior porte, que podem ocorrer até 2035. Note-se que há variações na geração de hidreletricidade em São Paulo, de um ano para outro, essa variação se deve aos resultados dos modelos que tratam a afluência hidráulica como variável no tempo e na estação do ano, destacando-se que as análises acerca da hidreletricidade realizadas estão em consonância com os conceitos, dados e premissas adotadas pelo ONS quando se trata do Estado de São Paulo.

Na Figura 84 apresenta-se a evolução esperada na participação da geração de eletricidade para o Estado de São Paulo entre 2023 e 2050, onde observa-se que a participação da hidreletricidade cai de 79% para 51% e que a geração solar fotovoltaica apresenta crescimento de 2% para 9% no horizonte, enquanto a geração eólica passa a ter 2% de participação, partindo de uma participação nula em 2023.

Figura 84 - Evolução na matriz de geração de Energia Elétrica de São Paulo

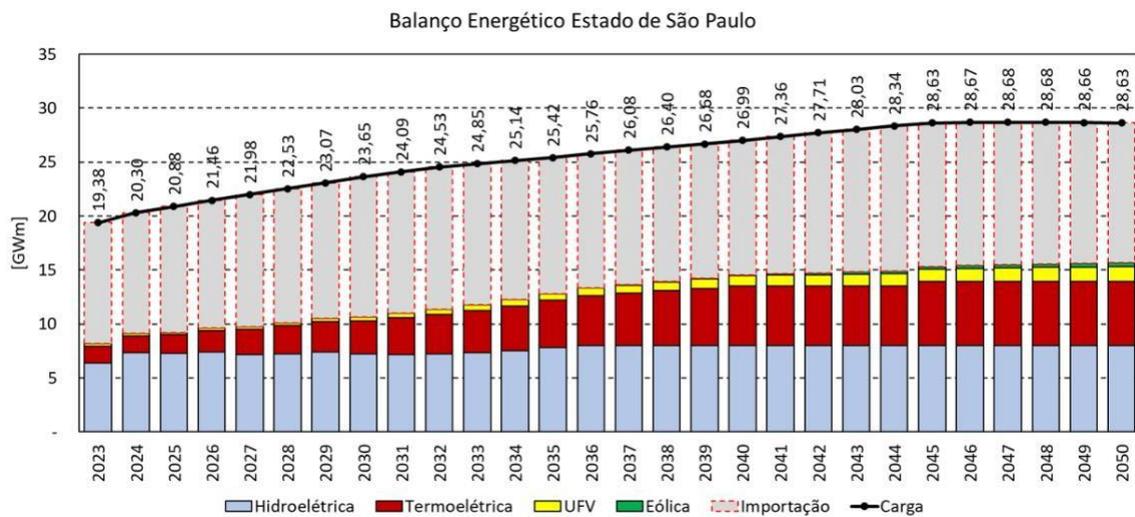


Fonte: Elaboração própria

Por outro lado, a geração termelétrica dobra sua participação dos atuais 19% para 38% em 2050, lembrando que a expansão dessa oferta de energia deve se dar com participação relevante de bioeletricidade e ser ancorada em sistemas de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>.

Com base na expectativa de demanda e de oferta de energia elétrica resultantes dos estudos respectivos, determina-se o balanço energético do Estado no horizonte 2023/2050, conforme apresentado na Figura 85.

Figura 85 - Balanço de energia elétrica de São Paulo no horizonte 2023/2050



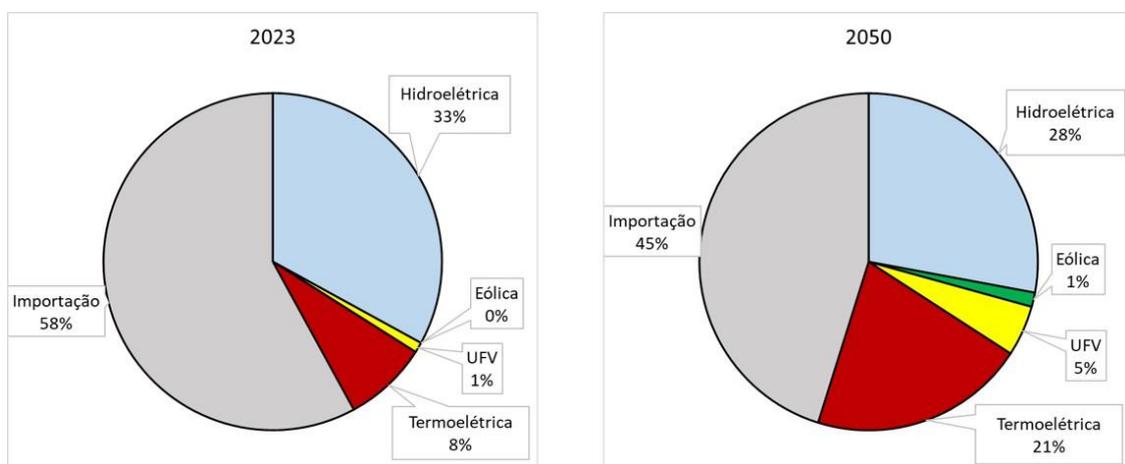
Fonte: Elaboração própria

OBS: Na legenda, da Figura 85, a denominação "EX" representa a geração originada pelas plantas já existentes, portanto, em operação. Por outro lado, a denominação "NE" apresenta a geração esperada para as plantas em expansão e, portanto, que ainda devem ser implantadas no sistema

Note-se que o Estado de São Paulo depende de importação de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional para fechar seu balanço e que essa dependência deverá ser mantida dentro de todo o horizonte de análise.

A Figura 86 mostra a evolução da matriz energética do balanço do Estado, onde se observa que a importação de eletricidade deve permanecer significativa, embora apresente redução dos atuais 58% para 45% em 2050.

Figura 86 - Evolução da matriz energética do balanço de eletricidade do Estado de São Paulo

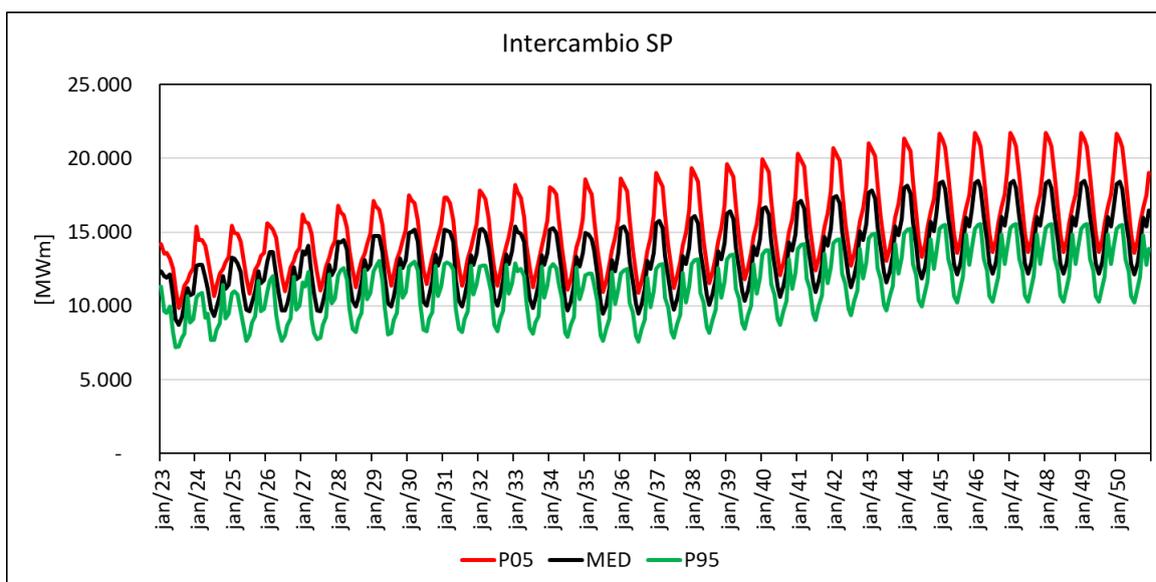


Fonte: Elaboração própria

A análise estocástica<sup>16</sup> da geração de hidreletricidade pelas usinas paulistas, demonstram que há possibilidade de que a necessidade de importação de eletricidade pelo Estado varie sensivelmente, em cerca de 50%, em função do regime de vazões nos períodos mais úmidos do ano. Essa oscilação cai para cerca de 20% nos períodos de estiagem, corroborando a experiência do setor elétrico brasileiro, com melhores índices de assertividade nas previsões de vazões durante os períodos mais secos do ano, do que nos períodos úmidos.

Com isso, observa-se na Figura 87, que o recebimento de eletricidade pelo estado de São Paulo, pode oscilar consideravelmente em relação ao valor médio esperado).

Figura 87 - Intercâmbio de energia elétrica do Estado de São Paulo



## Requalificação das Redes Atuais de Transmissão e Distribuição

Embora atendam adequadamente as atuais necessidades de conexão do sistema de geração com o mercado consumidor, as redes atuais de energia não estão preparadas para:

<sup>16</sup> Nas análises estocásticas de geração de hidreletricidade são considerados 2000 cenários possíveis de aflúncias às usinas hidrelétricas, possibilitando a análise estatística de valores médios e extremos (P5 – 5% das piores séries e p95 – 5% das melhores séries)

- i. Hospedar e otimizar GD - Geração Distribuída de Energia e outros RED – Recursos Energéticos Distribuídos, como armazenamento de energia, resposta da demanda, micro redes, etc...
- ii. Aplicar tarifas inteligentes, através de medidores inteligentes operando de forma conectada em nuvem e em tempo real que ofereçam opções aos diferentes perfis de consumo e favoreçam a operação otimizada dos ativos existentes, com fator de carga e gerenciamento de demanda;
- iii. Operar serviços de flexibilidade para acomodar grandes rampas de potência devido a variações abruptas de geração de energia intermitente;
- iv. Favorecer a transição energética, principalmente considerando novos requisitos de flexibilidade operativa e resiliência a eventos climáticos cada vez mais intensos.

Assim, mundialmente, os governos estão atuando com as empresas de Transmissão e Distribuição de energia para implementar Políticas Públicas que permitam a requalificação das redes atuais em um novo patamar tecnológico que permita habilitar estas e outras funcionalidades cada vez mais necessárias para atender à crescente expansão de RED e GD, uma vez que estas redes de T&D são caminho crítico para viabilizar a transição energética.

Aqui no Brasil a formulação de Políticas Públicas pode ser favorecida durante o processo de discussão da Renovação das Concessões de Distribuição vindas, mas não foi inicialmente contemplada de forma prioritária na nota Técnica do MME que colocou em consulta pública este processo de renovação.

Esta requalificação das redes de T&D de forma resumida deve prever:

- i. Investimentos em digitalização, automação e introdução de sistemas de controle avançados para o seu gerenciamento automático;
- ii. Reforços de capacidade e resiliência para hospedar crescentes volumes de geração descentralizada renovável não controlável, como solar e eólica, atender a novas cargas de eletrificação e resistir a eventos climáticos extremos, cada vez mais intensos e frequentes;
- iii. Implementar tarifas e medidores inteligentes que permitam oferecer serviços de flexibilidade e resposta da demanda.

No Brasil cerca de 51% do volume de energia é distribuído em média e alta tensão, com cobrança de tarifa de demanda e de consumo, mas estes clientes têm maior dificuldade para responder a sinais de redução de demanda. A literatura mundial e a própria experiência vivida no Brasil durante o racionamento de 2001/2002, demonstram que o potencial de redução desses clientes mais significativos é apenas da ordem de 8 a 10% da demanda e volume, mas por períodos muito curtos de tempo, para que não haja impacto significativo no desempenho econômico do país.

Os restantes 49% do volume total de energia do país é distribuído em baixa tensão, onde os consumidores não pagam tarifa de capacidade, mas apenas de volume. Quase 400 implantações e experimentos realizados e documentados na literatura Internacional neste segmento de consumidores apontam que estes são consumidores que conseguem efetivamente modular os seus consumos, permitindo reduções de até 33% da demanda de ponta, quando tarifas inteligentes são oferecidas e associadas ao uso de tecnologias adequadas, como termostatos inteligentes e automação predial.

O efeito potencial da MMD e da implementação das redes inteligentes e resposta da demanda foram considerados nos estudos de projeção de carga do estado de São Paulo para fins da elaboração do PEE/SP 2050. Essas novas modalidades de geração e consumo têm impacto sobre os sistemas elétricos de distribuição, com potencial influência na rede de transmissão.

A implantação do plano plurianual nacional de medição inteligente em baixa tensão sustentado por políticas públicas. Este plano teria uma implementação simulada em 8 anos, com início em 2025, abrangendo mais de 88% do volume de energia distribuído no país, cobrindo apenas pouco menos de 56% dos consumidores com medidores inteligentes. Como premissa o estudo parte dos consumidores maiores para os consumidores menores em baixa tensão e desconsiderou inicialmente os consumidores de baixa renda, baixo consumo e também 60% do mercado rural, onde as conexões dos medidores têm um desafio maior.

O estudo previu também que cada distribuidora pudesse elaborar o seu plano de acordo com a sua área, mercado e realidade operativa, pois existe uma grande diversidade de situações no Brasil. O plano previu também. Implementação progressiva de tarifas inteligentes com um efeito significativo na demanda elétrica, mas com muito pouco efeito no consumo total.

O Plano proporcionaria uma melhor alocação de custos ao longo dos da cadeia dos diversos consumidores e, além disso, promoveria uma importante educação para o uso racional de energia para os consumidores, através da oferta de tarifas aderentes a

diferentes perfis de uso, oferecendo opções reais aos clientes, o que permitiria atingir tarifas módicas mais apropriadas para cada caso.

A crescente penetração de MMGD e dos demais RED`s é uma realidade e vai ser cada vez mais comum nas unidades consumidoras, tomando papel relevante no suprimento de energia no horizonte do plano e deve-se considerar que:

- (i) Esta implementação não está sob controle das empresas e nem dos reguladores.
- (ii) As Redes Inteligentes (T&D) são caminho crítico para viabilizar a transição energética.
- (iii) Para viabilizar a implantação de flexibilidade através de resposta da demanda no SIN será necessária a progressiva cobertura de medição inteligente nos clientes de baixa tensão.
- (iv) Os sistemas atuais precisam ser requalificados, demandando investimentos prioritários.
- (v) A renovação das concessões deve incorporar políticas públicas claras para esta finalidade e o ESP deve ter protagonismo priorizando esta formulação de políticas públicas.

# Setor de Transportes

---

## Contexto e situação

O Balanço Energético do Estado de São Paulo 2022 mostra um relevante consumo de energéticos no setor de transportes, composto majoritariamente por derivados de petróleo, com predominância do óleo diesel (42,3%), seguido da gasolina (22,6%), querosene de aviação (8,2%), gás natural (1,0%) e óleo combustível (0,1%). O etanol apresenta uma participação na estrutura de consumo de 25,5% e a eletricidade de 0,4%, respectivamente (GOV-SP, 2022).

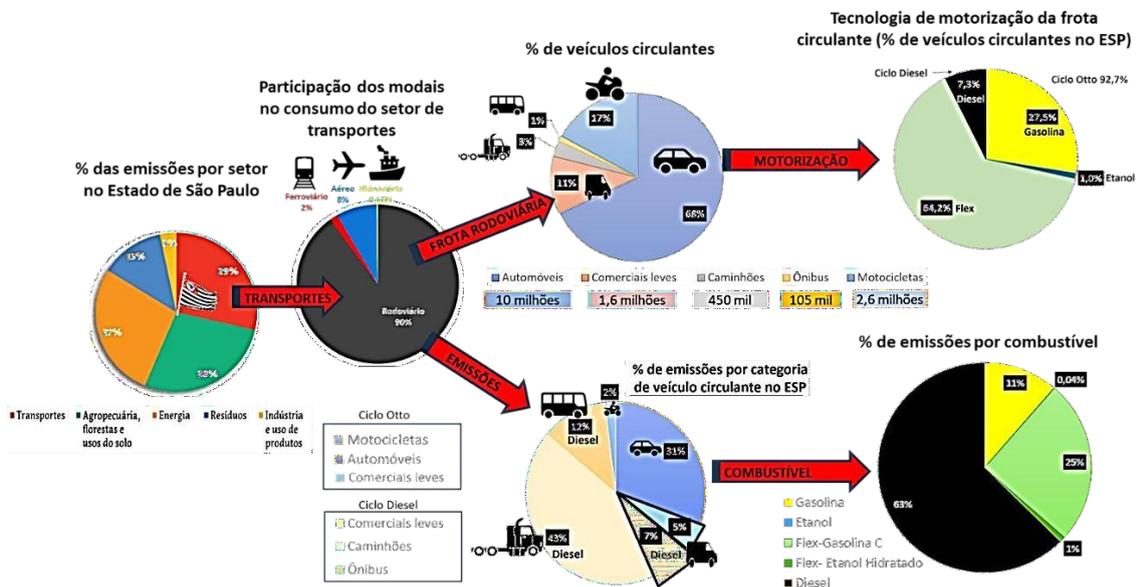
A estrutura do setor de transporte do Estado é composta por quatro modais: rodoviário, ferroviário, hidroviário e aéreo. Em termos de consumo energético, o modal rodoviário responde por 90,1% da demanda total setorial, enquanto os modais ferroviário, aéreo e hidroviário respondem, respectivamente, pelas parcelas de 1,5%, 8,2% e 0,15% (GOV-SP, 2022).

O modal rodoviário em São Paulo responde por 40,9 MtCO<sub>2</sub>e de emissões de GEE, o que perfaz 87% das emissões estaduais do setor de transporte (CETESB, 2022). As emissões dos modais ferroviário (carga e passageiro), hidroviário e aéreo assumem os demais 13%, totalizando cerca de 6 MtCO<sub>2</sub>e (GOV-SP, 2022).

Dos cerca de 15 milhões de veículos da frota rodoviária do Estado, aproximadamente um milhão (7,3% da frota) operam com motorização ciclo diesel e respondem por 63% das emissões (caminhões, ônibus e parte dos comerciais leves). Já os veículos leves - automóveis e comerciais - e as motocicletas, derivam os demais 92,7% da frota rodoviária e respondem por 37% das emissões, utilizando gasolina C, etanol hidratado e uma parcela minoritária de automóveis convertidos para o consumo de gás natural veicular (GNV) (CETESB, 2022).

O diagrama da Figura 88, apresenta um resumo da situação atual do setor de transportes do Estado, no que diz respeito ao consumo energético, à estrutura da frota, tecnologia de motorização e respectivas emissões de GEE.

Figura 88 - Frota, motorização, combustíveis e emissões de GEE do setor de transportes no Estado de São Paulo - 2021



Fonte: Elaboração própria com dados da (CETESB, 2022), (GOV-SP, 2022) e (PAC2050/SEEG, 2022)

Para o desenvolvimento do plano de transição energética no setor de transportes do Estado de São Paulo, foram realizadas consultas a documentos, planos governamentais, estudos técnico-científicos no âmbito nacional e internacional, bem como entrevistas a entidades setoriais e da indústria, para construção dos referenciais e benchmarks, conforme indicados na Figura 89.

Figura 89 - Arcabouço de referências consultadas para o estudo

## Planos

- Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050)
- Plano Decenal de Energia 2031 (PDE 2030)
- Plano de Ação Climática 2050 (PAC 2050)
- Plano Paulista de Energia 2020 (PPE 2020)
- Plano Integrado de Transportes Urbanos (PITU 2040)
- Plano Diretor de Desenvolvimento de Transportes (PDDT)
- Plano de Ação Climática do Município de São Paulo 2020-2050 (PLANCLIMA)

## Programas

- Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE)
- Programa Rota 2030 de Mobilidade e Logística
- Programa Mobilidade Elétrica e Propulsão Eficiente (PROMOB-e)
- Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV)
- Comitê Gestor do Programa de Acompanhamento da Substituição de Frotas por Alternativas Mais Limpas (COMFROTA/SP)

## Estudos nacionais e internacionais

- IEA, DNV, BNEF, IRENA, McKinsey, BCG, CEPAL, A.T KEARNEY, DELLOITTE
- MME, EPE, ANP
- PNME, LEVE, GESEL, PSR, PWC, Alvarez & Marsal, FGV, CEBRI, IEMA, SEEG, WRI Brasil
- SEMIL - Balanço Energético do Estado de São Paulo (BEESP 2022), ano base 2021
- CETESB, MMA, SPTRANS, EMTU, ARSESP

## Políticas

- Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) - Lei Estadual nº 13.798/2009
- Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC) - Lei 12.187, 29/12/2009
- Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) - Lei 12.587/2012:
- Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC2010): Seção - Plano de Transportes

## Associações, Indústria e Mídia especializada

- ABVE, ABIFER, ANFAVEA, ABIOGAS, NTU, ICCT, ITDP, FIESP, C40, CNI
- Fabricantes/Montadoras de veículos leves e pesados
- Indústria de O&G
- Infraestrutura de recarga (MSP e CPO)

## Considerações sobre o potencial e disponibilidade de energéticos para suportar o cenário de transição no setor de transportes

Para a transição energética e descarbonização do setor de transportes foram desenvolvidas interações envolvendo as diversas equipes do projeto de modo a garantir a coerência e a viabilidade na elaboração do cenário de demanda e oferta setorial. Neste sentido, são apresentadas as considerações sobre as potencialidades da oferta de energéticos para atendimento as demandas dos modais de transporte do Estado.

### Etanol

São Paulo é o estado brasileiro que mais se destaca dentro do setor sucroalcooleiro, sendo responsável por cerca de 46% da produção total de etanol do país. Em 2021 as usinas paulistas produziram 12 bilhões de litros de etanol (hidratado e anidro). A expressividade do setor dentro do estado, aliada a políticas de estímulo à substituição de combustíveis fósseis (a exemplo do Renovabio), traz singularidades e oportunidades de descarbonização para o setor de transporte. Com uma frota circulante que perpassa os 9,6 milhões de veículos operando com tecnologia de motorização Flex, o etanol desponta como uma das alternativas para os veículos leves (híbridos flex, híbridos plug-in flex). Outra oportunidade é o uso de hidrogênio (produzido a partir da reforma do etanol) em veículos pesados, tais como: ônibus urbanos, rodoviários e caminhões estradeiros.

### Biometano

O biometano é produzido a partir da purificação do biogás (retirada de CO<sub>2</sub> e outro gases traços). O potencial estadual para produção de biogás e biometano é relevante, da ordem de 5 bilhões de m<sup>3</sup>. Esse volume potencial se justifica pela significativa disponibilidade de biomassa presente em diferentes regiões do Estado – a vinhaça e a torta de filtro, subprodutos da produção de açúcar e álcool – bem como resíduos agroindustriais, resíduos de sistemas de tratamento de esgoto (lodo de ETE) e resíduos sólidos urbanos (gás de aterro ou digestão anaeróbica da fração orgânica), entre outros resíduos de origem orgânica. Desta forma, o biometano surge como uma alternativa promissora para Estado, para aplicação no transporte, deslocando o uso de gás natural (GN) e do diesel para os veículos pesados de carga (ex. caminhões trucados com compactadores para coleta de resíduos urbanos, maquinário agrícola, caminhões

estradeiros e trens de carga). Também representa uma oportunidade de descarbonização da frota de veículos de passageiro que percorrem longas distâncias (ônibus rodoviários). De origem renovável, entre as vantagens do uso do biometano em transporte estão a intercambialidade com gás natural, que torna possível o compartilhamento da infraestrutura de distribuição de GN já existente e a possibilidade de liquefação, o que o torna um combustível flexível, em termos de uso e distribuição.

### **Eletromobilidade**

O movimento global da mobilidade elétrica na última década tem avançado no Brasil e impulsionado, mundialmente, por políticas ambientais de redução das emissões de CO<sub>2</sub> cada vez mais rigorosas, quedas dos custos das baterias, incentivos governamentais, renovação das fábricas globais, definição de metas para o banimento da fabricação dos veículos a combustão, expansão da infraestrutura de recarga, aumento da autonomia dos veículos, redução do tempo de recarga e a diversidade de modelos de veículos elétricos. De outro lado há barreiras e limitadores, como necessidade de mineração e processamento de materiais para baterias, concentração da indústria e do desenvolvimento tecnológico de ponta nessa área, e a necessidade de desenvolver localmente as cadeias produtivas e de destinação final pós a vida útil e integrar a eletrificação na mobilidade no contexto nacional. A partir desse conjunto de fatores, a eletrificação também surge como uma alternativa tecnológica fundamental para o deslocamento dos combustíveis fósseis nos centros urbanos, despontando na transição das motocicletas, veículos leves (automóveis de passeio, aplicativo, comerciais e de logística urbana) e pesados (caminhões VUC - Veículo de Carga Urbano, ônibus urbanos e micro-ônibus), bem como na renovação da indústria automobilística paulista e todo ecossistema da mobilidade sustentável.

### **Diesel**

O óleo diesel é o principal combustível utilizado por veículos pesados rodoviários tanto para transporte de cargas (caminhões) quanto passageiros (ônibus urbanos e intermunicipais). O transporte fluvial e marítimo também consome quantidades expressivas de óleo diesel. A CETESB estima que, em 2022, havia cerca de 1 milhão de veículos a diesel em circulação pelo Estado de São Paulo (comerciais, caminhões e ônibus). Devido ao modelo de distribuição de produtos ao consumidor nacional utilizar majoritariamente as vias rodoviárias tem-se que o preço do óleo diesel possui uma grande relevância na variação da inflação, medida pelo IPCA. Logo a redução da dependência de diesel, além de contribuir para a segurança energética do Estado de São Paulo, também poderá trazer impactos positivos e maior controle da inflação.

### **Gasolina**

A utilização de gasolina no setor de transportes foi da ordem de 4,9 milhões de toe (aproximadamente 5,8 milhões de m<sup>3</sup>) no Estado de São Paulo em 2022 – cerca de 16% do consumo nacional. Sendo essencialmente utilizada por veículos leves, comerciais e motocicletas. A gasolina já possui substitutos conhecidos e bem difundidos no mercado brasileiro, como o etanol e o gás natural veicular (GNV). A eletricidade/hibridização também poderá contribuir para a substituição da gasolina nestas categorias de veículos

### **Biodiesel**

O biodiesel é formado a partir de processos de transesterificação ou Ester Metílico de Ácido Graxo (FAME) podendo ser usado em até 15% como uma mistura com o óleo diesel fóssil. Concentrações maiores podem causar desgastes e eventuais danos aos motores e outros componentes dos veículos, causando até mesmo a perda de garantia pelos fabricantes. No entanto, assim como o etanol, a mistura do Biodiesel no óleo diesel convencional tem sido uma importante estratégia para redução da dependência deste combustível no setor de transporte e deve se manter, ou até mesmo se intensificar ao longo dos próximos anos.

### **Diesel verde (HVO)**

O HVO, siglas em inglês para o óleo vegetal hidrotratado, é obtido através do hidrocrackeamento de lipídios residuais. O HVO pode ser combinado em concentrações elevadas ou empregado como uma alternativa sem a necessidade de modificações mecânicas, uma vez que sua composição química é bastante similar à do diesel. O Estado de São Paulo possui um alto potencial de produção de HVO, uma vez que dispõe de matérias-primas e pode converter suas refinarias para produzirem esse biocombustível.

### **Gás natural**

O Estado de São Paulo conta com uma vasta e complexa infraestrutura de escoamento e transporte de GN, beneficia-se do acesso às principais rotas de escoamento das bacias sedimentares de Campos e Santos, que representam 75% das reservas provadas nacionais. Ademais, o Estado também possui acesso à oferta importada seja pelo Gasbol ou pelos terminais de importação de GNL.

A infraestrutura de movimentação de GN apresenta capacidade de 55,36 M m<sup>3</sup>/dia. Ao se considerar projetos futuros, em desenvolvimento, portanto, contemplado em planos regulatórios ou em construção, como por exemplo, o terminal de regaseificação de São Paulo e o gasoduto "subida de serra", a capacidade de movimentação aumentará para 70,36 M m<sup>3</sup>/dia. Em paralelo a esta expansão, cabe o destaque que as

três concessionárias de distribuição de GN no Estado possuem a maior extensão de dutos de distribuição e base de consumidores do Brasil, permitindo a materialização da ampliação dos usos finais automotivos e instalação de corredores azuis.

### **Hidrogênio de baixo Carbono**

O hidrogênio vem sendo utilizado há séculos como insumo químico e energético. As tecnologias de sua produção são bastante conhecidas, sendo a maioria delas já empregadas industrialmente. O que se apresenta atualmente como inovação tecnológica é o uso de fontes de energia até então muito pouco utilizadas, como a solar fotovoltaica ou a eólica *offshore*. Outra inovação importante é a associação de processos de captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> (CCS) produzido pelas tecnologias convencionais que utilizam fontes fósseis, como nos casos do gás natural e dos derivados de petróleo.

Ao contrário dessas fontes fósseis, cujo mercado global já se encontra estabelecido e seus custos deverão continuar seguindo os cenários tendenciais, há fortes expectativas que as fontes renováveis deverão ampliar significativamente suas participações nas matrizes energéticas da maioria dos países, além de manter seus custos decrescentes ainda por muitos anos. Esses fatos permitem supor que os custos de produção do hidrogênio poderão ser bastante reduzidos, se adotadas essas fontes renováveis como supridoras de energia elétrica para os processos de eletrólise.

Como essas fontes estão associadas as baixas emissões de GEEs, o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis deverá, igualmente, possibilitar a descarbonização dos setores industriais e econômicos que utilizam e/ou que venham a empregar esse combustível.

Tomando todos esses quadros em perspectiva, inúmeros estudos têm sido conduzidos em todo mundo, buscando avaliar os mercados futuros do hidrogênio, que deverá se tornar uma commodity importante a partir de 2030. Um exemplo desses estudos é o mostrado na Figura 90, elaborado pelo (WEC, 2021). Entretanto, há grandes divergências quanto às estimativas acerca da demanda global de hidrogênio em 2050, o que é de se esperar, dadas as incertezas sobre a evolução dos mercados e das capacidades de produção, transporte e utilização deste energético.

Apesar da Agência Internacional de Energia prever a necessidade, em 2050, de uma produção de 530 MtH<sub>2</sub> no *Roadmap* para o programa (IEA, 2021b), a agência reconhece que a totalização dos valores anunciados pelos governos de muitos países é da ordem de 250 MtH<sub>2</sub> em 2050, o que está um pouco acima do pior cenário de aquecimento global previsto pelo World Energy Council (superior a 2,3 °C). Assim

sendo, uma média entre as estimativas mais importantes de demanda de hidrogênio em 2050 indica algo da ordem de 300 Mth<sub>2</sub>, o que corresponde a um aumento de 3 vezes na demanda atual<sup>17</sup>.

Na Figura 90 já referenciada, apresenta-se a demanda global de hidrogênio estimada pelo World Energy Council, em 3 cenários de aumento da temperatura média do aquecimento global até 2050.

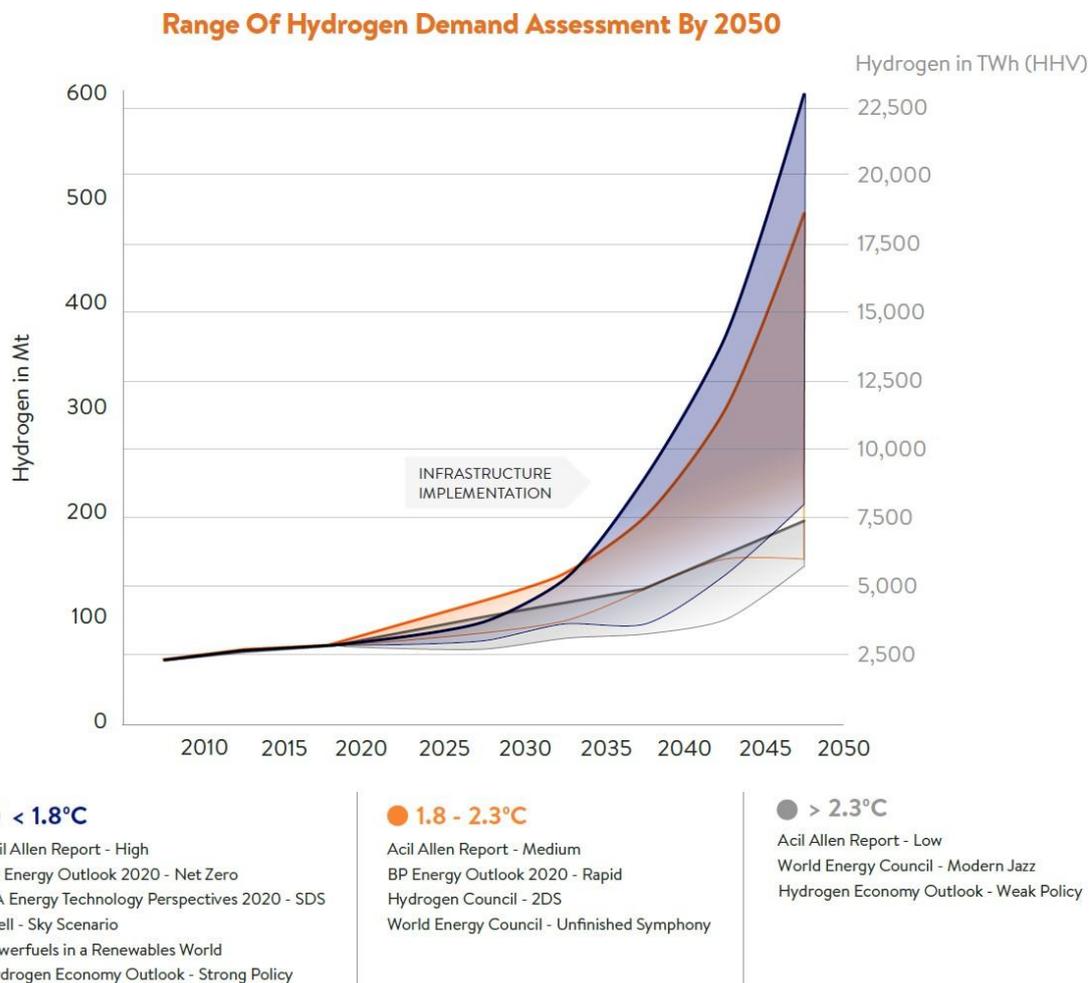
O hidrogênio não é uma fonte de energia, mas um vetor energético e, portanto, depende da disponibilidade das diferentes fontes para ser produzido. Nesse sentido, pode integrar todas as fontes renováveis e não renováveis de energia; funcionar como um armazenador de eletricidade, para aplicações estacionárias e móveis; e ser utilizado na fabricação de novos combustíveis sintéticos renováveis, essenciais para se mitigar as emissões do setor de transporte.

Nesse setor, o hidrogênio pode ser empregado diretamente em qualquer categoria (terrestre, aérea e aquática) e em qualquer tipo de veículo (carros, ônibus, caminhões, trens, aviões, barcos e navios). Dadas as características de cada caso, o uso do hidrogênio será tecnicamente melhor que as alternativas existentes, como em veículos pesados e trens; ou pior, como em motocicletas, mas em geral será, na atualidade, economicamente desvantajoso. Assim sendo, sua participação de forma significativa nas futuras frotas de veículos dependerá de políticas públicas adequadas, incentivos e criação de infraestruturas de abastecimento.

---

<sup>17</sup> Assumindo um crescimento de 5 % ao ano para 2022 e 2023, mesmo crescimento verificado de 2020 para 2021, período em que a demanda foi de 94 Mth<sub>2</sub>.

Figura 90 - Demanda global de hidrogênio



Source: World Energy Council\*

### Sintéticos (amônia, e-metanol, e-querosene)

O hidrogênio é um elemento fundamental em vários processos de síntese de combustíveis e outros compostos químicos. Nesses processos, o gás é empregado em associação a outras substâncias, caracterizando, no caso do uso veicular desses combustíveis, uma aplicação indireta do hidrogênio, em contraste com seu uso direto, como em veículos com células a combustível. Entre os muitos processos conhecidos de fabricação de combustíveis sintéticos, aqueles onde o hidrogênio foi obtido com o uso de eletricidade são denominados processos *Power-to-fuel*, e os produtos designados como e-fuels. Destacam-se nesses casos a fabricação de metano sintético, principalmente através da reação de Sabatier, conjuntamente com CO<sub>2</sub>; de amônia, através do uso do nitrogênio extraído do ar, pelo processo Haber-Bosch; do metanol, através do gás de síntese (H<sub>2</sub> + CO), pelo processo ICI; e de outros combustíveis líquidos, como gasolina e querosene, por meio do processo Fischer-Tropsch. No

entanto, a adoção do hidrogênio de baixo carbono para a produção de combustíveis sintéticos, a serem usados em motores de combustão interna, se mostra energeticamente menos eficiente quando comparado ao seu uso direto em células a combustível, ainda que economicamente mais viável.

### **BioQAV**

O setor aéreo é considerado um dos setores de “difícil abatimento” de carbono, conforme estudos das entidades internacionais<sup>18</sup>. Para a substituição do QAV por alternativas de baixo carbono, o potencial de disponibilidade de resíduos, álcool e hidrogênio para a produção de combustíveis aplicáveis no setor aéreo foi considerado. Ainda em debate global e nacional, o Brasil prevê aderir à partir de 2027 à nova fase dos critérios, para a aviação internacional, discutidos pela organização global do setor (ICAO - Organização da Aviação Civil Internacional) no Esquema de Compensação e Redução de Carbono para Aviação Internacional (CORSIA - *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*<sup>19</sup>). Para o estado, foram avaliadas as potencialidades das rotas para produzir o combustível sustentável de aviação, com a rota de disponibilizar matérias primas de origem sustentável ou de resíduos, para produção do combustível atendendo a caracterização SAF, bem como disponibilidade de fontes energéticas sustentáveis e de baixo carbono para atender critérios de sustentabilidade na produção de combustível caracterizado como LCAF. Para a aviação comercial doméstica as discussões estão em fase mais inicial quanto a regulamentações e certificações. A indústria nacional e paulista apresenta capacidade técnica para atender às novas demandas<sup>20</sup>, com oportunidades, mas também necessidade de articulação regulatória e questões de viabilização. Esses fatores foram considerados na cenarização de transição e penetração, mais relevante dos novos combustíveis para aviação na segunda metade do período de estudo.

---

<sup>18</sup> IEA - Net Zero by 2050 (2023) e IRENA - Reaching Zero with renewables (2023)

<sup>19</sup> CORSIA é o programa da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) para a redução e compensação de emissões de CO<sub>2</sub> provenientes dos voos internacionais. Seu objetivo é atingir o crescimento neutro de carbono, ou seja, que as emissões sejam estabilizadas nos níveis observados em 2020, sem que o setor aéreo precise parar de crescer.

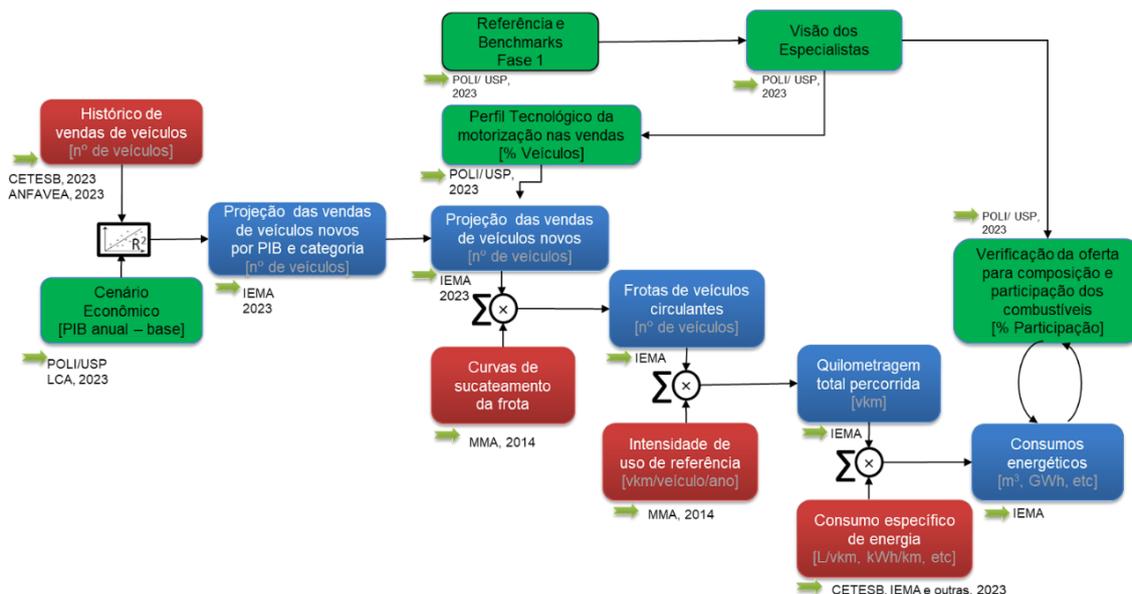
A partir do ano de 2027, as emissões internacionais de operadores brasileiros, acima dos níveis observados na média do biênio de 2019-2020, deverão ser compensadas com a aquisição de créditos de carbono ou por meio do uso de combustíveis elegíveis ao CORSIA, em especial os combustíveis sustentáveis de aviação cf. ANAC <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>

<sup>20</sup> Caderno Transportes: ANEXO: Apresentação Petrobras realizada em 27 de julho de 2023

## Modelagem da demanda de energéticos - Modal rodoviário

Para o modal rodoviário, a elaboração das projeções prospectivas da demanda de energéticos no período do estudo considera a projeção do PIB para o Estado de São Paulo, desenvolvida pela consultoria LCA, e utiliza o modelo expandido do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) (Figura 91), no qual se considera as premissas e metodologias desenvolvidas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), bem com o modelo de perfil tecnológico de motorização e verificação da oferta de combustíveis desenvolvido pela Politécnica da USP (POLI/USP).

Figura 91 - Fluxograma da metodologia para o cálculo dos consumos energéticos das categorias de veículos para o modal rodoviário



A construção do cenário de penetração de novas tecnologias veiculares para cada categoria foi desenvolvida com a participação de diversos profissionais da equipe do projeto, balizados pelas diretrizes do PAC 2050 e demais referências e benchmarks citados anteriormente.

Com o histórico das vendas, a projeção de PIB para o Estado de São Paulo e o perfil tecnológico de vendas, o modelo projetou, para cada categoria, as vendas de veículos novos ano a ano por alternativa de tecnologia, resultando na quantidade anual de novos veículos entrantes na frota.

Aplicando as curvas de sucateamento da frota adotadas pelo MMA, para os veículos ciclos Otto e Diesel<sup>21</sup> resulta na quantidade de veículos retirados de circulação ano a ano. Assim, contabilizando a partir da frota anterior, são adicionados veículos entrantes e subtraídas as quantidades por sucateamento e obtém-se a frota de veículos circulantes, ano a ano para todo o horizonte de estudo, desagregado por categoria de veículo.

No próximo passo a projeção da frota e a intensidade de uso de referência<sup>22</sup> resulta na quilometragem total percorrida por categoria de veículo. Aplicando em seguida os índices de consumo específico<sup>23</sup> por categoria veicular, se obtém os respectivos consumos energéticos e a agregação por tipo de energético.

A seguir, realiza-se uma etapa de verificação de consistência entre a demanda projetada e a oferta para os diversos energéticos - eletricidade, combustíveis fósseis e, especialmente, hidrogênio e seus derivados e os bioenergéticos: Etanol, biodiesel, diesel verde e biometano.

Como último passo, o modelo agrega a projeção da demanda para o modal rodoviário por tipo de energético: Gasolina C (composta por gasolina A e etanol anidro), Etanol hidratado, Diesel nas parcelas fóssil, biodiesel e diesel verde, Gás natural e biometano, Hidrogênio e Eletricidade.

## **Modelagem da demanda de energéticos - Modal ferroviário, hidroviário e aéreo**

Já para os modais ferroviário, hidroviário e aéreo, o modelo (Figura 92) de projeção da demanda de energéticos foi desenvolvido pela POLI/USP e IEMA, e realiza uma abordagem *top-down*, considerando os dados do histórico de consumo energético reportado no Balanço de Energia do Estado de São Paulo (GOV-SP, 2022) e também da projeção da LCA para do PIB do Estado.

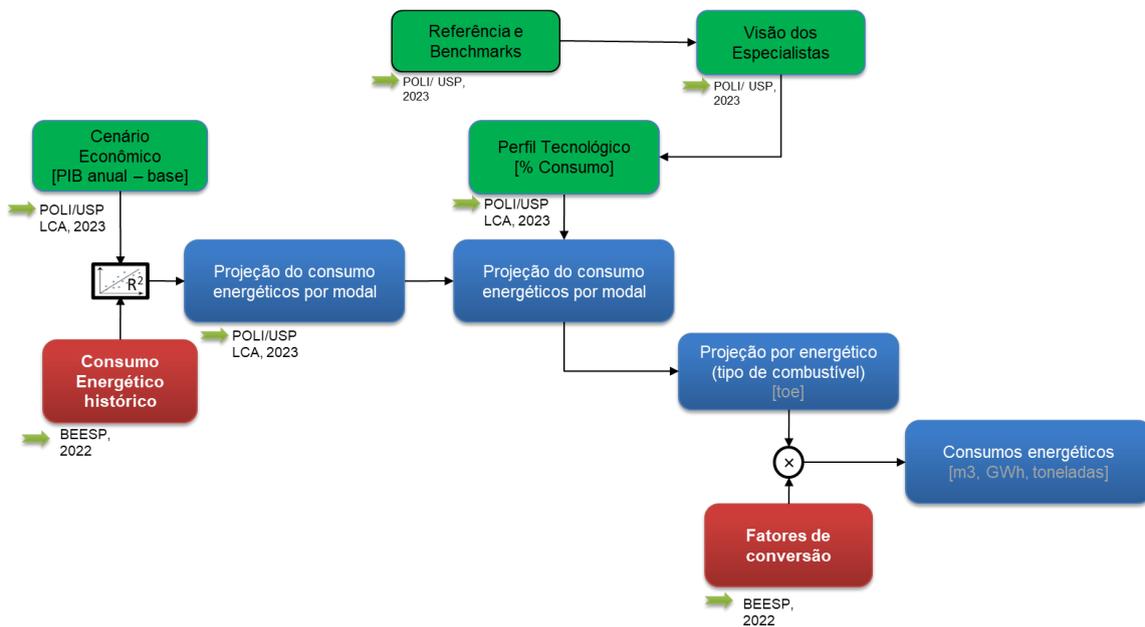
---

<sup>21</sup> Caderno de transportes: Curvas de Sucateamento

<sup>22</sup> Caderno de transportes: Intensidade de Uso (MMA, 2014)

<sup>23</sup> Caderno de transportes: Consumo específico por categoria de veículo

Figura 92 - Fluxograma da metodologia para o cálculo dos consumos energéticos para os modais ferroviário, hidroviário e aéreo



A construção do cenário de penetração de novas tecnologias para os modais ferroviário (segregado em carga e passageiros), hidroviário e aéreo foi desenvolvida assumindo-se premissas definidas com a participação de diversos profissionais da equipe do projeto, balizados por entrevistas com atores relevantes do setor de combustíveis e infraestrutura, informações de fabricantes, questionário específico e demais referências e *benchmarks* utilizados no projeto.

Considerando-se os respectivos históricos de consumo energético desses modais (GOV-SP, 2022), para cada um deles procede-se a determinação da evolução da demanda energética total ano a ano.

Para o modal ferroviário de carga foi utilizada a relação entre histórico de consumo e evolução do PIB-SP para determinar a evolução do consumo total deste modal.

Para o transporte ferroviário de passageiros foi utilizado índice da relação entre o consumo energético (em TEP) e a extensão da malha (em km) em 2021, as expectativas de expansão da malha de metrô, trens metropolitanos e intercidades (TIC), obtidas nas pesquisas junto aos agentes setoriais<sup>24</sup>, e no cenário de mitigação considerada uma eficiência crescente no índice de consumo/km, a base de 5% por

<sup>24</sup> Caderno de Transportes: Transporte Ferroviário

decênio, para determinar a evolução da demanda de energia elétrica deste modal, com as premissas resumidas na Tabela 8.

*Tabela 8 - Premissas consideradas no cenário de expansão para o ferroviário de passageiros*

Rede Ferroviária	2021	2030	2040	2050	km de rede adicionada por decênio
Metro (km)	100	130	180	230	(30+50+50)
CPTM + TIC (km)	270	320	370	440	
Total (Metro+CPTM+TIC) (km)	370	450	550	670	
Consumo energético /km - cenário de referência (103 TEP/km)	0,249	0,249	0,249	0,249	
Consumo/km - cenário de mitigação (103 TEP/km)	0,249	0,236	0,224	0,213	
Ampliação rede Trens Intercidades - TIC (km)	-	50 SP-CAMPINAS	50 SP-SOROCABA	70 SP-SJCampos	(50+50+70)

Para o modal hidroviário, dada sua participação percentual marginal na demanda total dos transportes, atualmente da ordem de 0,2% do total de transportes, e em termos de transição energética este modal ainda apresenta grande indefinição quanto às alternativas de rotas tecnológicas a serem implementadas, e, portanto, é recomendado manter especial atenção no acompanhamento da dinâmica. Em termos da demanda não há indicativos de mudança relevante, tanto na demanda interna como para abastecimento de frotas marítimas de logística nacional e global, e o cenário definiu manter como constante ao longo de todo o período o respectivo valor da demanda energética total deste modal como apurada no BESP em 2021. A demanda atual, praticamente toda atendida com diesel fóssil, ao longo da trajetória é deslocada com a penetração de biocombustíveis, na oferta do mix de diesel, com a penetração da tecnologia de eletrificação de embarcações de pequeno porte (balsas e rebocadores da hidrovía Tietê-Paraná), penetração de tecnologias com uso de combustíveis avançados, derivados do hidrogênio e de biomassas.

Para o modal aéreo, considerado o setor de transporte de maior dificuldade para efetivar uma transição, foi utilizada a relação entre histórico de consumo e evolução do PIB-SP para determinar o cenário da evolução do consumo total deste modal. O querosene de aviação representa 8,2% da demanda total energética de transportes do Estado em 2021 e no cenário proposto considerou uma transição mais tardia, com o QAV fóssil ainda relevante e com a penetração de alternativas tecnológicas de

combustíveis de baixo carbono como o SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), LCAF (*Lower Carbon Aviation Fuel*) e combustíveis sintéticos, efetiva a partir de meados do período de estudo. Por fim, a tecnologia de eletrificação aérea também apresenta uma penetração, considerada para aeronaves de menor porte, a partir da metade do período.

## Modais de transporte - Categorias e tecnologia de motorização

As categorias dos modais de transportes consideradas na elaboração dos cenários são listadas abaixo. Para o modal rodoviário foram utilizadas as categorias de veículos adotadas pela CETESB (CETESB, 2022). Já para os modais ferroviário, hidroviário e aéreo, utilizou-se uma metodologia de tratamento pelo consumo energético.

- **Modal rodoviário:** Automóveis, Comerciais leves, Motocicletas, Ônibus urbanos, Micro-ônibus, Ônibus rodoviários, Caminhões leves, Caminhões semi-leves, Caminhões médios, Caminhões semipesados, Caminhões pesados
- **Modal ferroviário:** Composições de carga e composições de passageiros
- **Modal hidroviário:** Embarcações
- **Modal aéreo:** Aeronaves

Quanto à motorização para o modal rodoviário, foram definidas as seguintes tecnologias:

- **Gasolina:** Motor a Combustão Interna movido exclusivamente a Gasolina-C;
- **Etanol:** Motor a Combustão Interna movido exclusivamente a Etanol hidratado;
- **Flex:** Motor a Combustão Interna movido a Gasolina C ou Etanol hidratado;
- **HEV gasolina:** Veículo Híbrido Elétrico/Combustão Interna movido a Gasolina C;
- **HEV flex:** Veículo Híbrido Elétrico/Combustão Interna movido a Gasolina C ou Etanol hidratado;
- **PHEV gasolina:** Veículo Híbrido Elétrico Plug-in/Combustão Interna movido a gasolina;
- **PHEV Flex:** Veículo Híbrido Elétrico Plug-in/Combustão Interna movido a gasolina C ou Etanol hidratado;
- **Diesel:** Motor a Combustão Interna ciclo Diesel;
- **Gás:** Motor a Combustão Interna movido a Gás;
- **BEV:** Veículo Elétrico à Bateria;
- **Hidrogênio:** Veículo Elétrico a Célula a Combustível movido a Hidrogênio.

O modal ferroviário foi tratado considerando duas categorias. A categoria das composições de carga, com locomotivas utilizando exclusivamente energéticos combustíveis, líquidos e gasosos, com acionamento elétrico e podendo contar com complementação de baterias. A segunda categoria é das composições de passageiros, nesta, considerados os trens de subúrbio, metrô e veículos urbanos sobre trilho, majoritariamente eletrificadas, alimentadas por catenária ou trilho e utilização de baterias, e com progressiva participação nesse cenário de composições alimentadas por energéticos combustíveis, tanto por biometano como por hidrogênio. O cenário desenvolvido para as duas categorias considerou as seguintes tecnologias de motorização:

- **Diesel**
- **Elétrico pantógrafo**
- **Elétrico a bateria**
- **Gás (GN e biometano)**
- **Hidrogênio e seus derivados**

O modal hidroviário também foi abalizado por duas categorias. A categoria das embarcações de médias e longas distâncias, utilizando exclusivamente energéticos combustíveis líquidos (diesel) e sintéticos (amônia e e-metanol). A segunda categoria de embarcações costeiras, nesta consideradas as barcas e balsas alimentadas a diesel com transição para elétrico e a bateria. O cenário desenvolvido para as duas categorias considerou as seguintes tecnologias de motorização:

- **Diesel**
- **Elétrico a bateria**
- **Sintéticos**

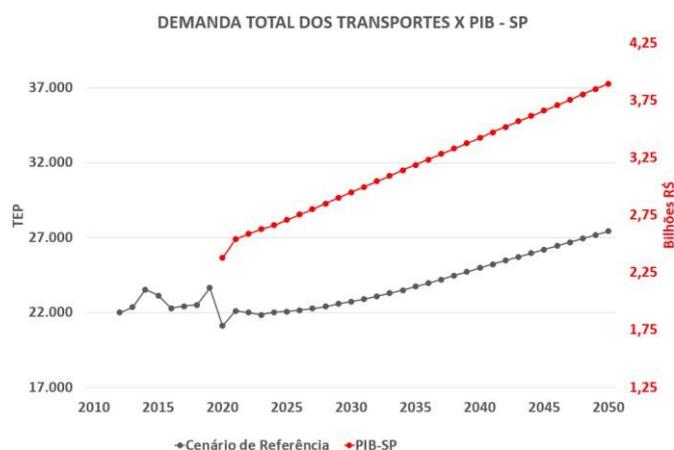
O modal aéreo foi classificado em duas categorias. Uma categoria com as aeronaves para médias (~ 150 assentos) e longas distâncias (> 150 assentos), utilizando exclusivamente energéticos combustíveis líquidos (QAV, BioQAV e sintéticos). Um segundo grupo da categoria de aeronaves de curto alcance (< 50 assentos) alimentadas a baterias. Com base nesses cenários, as seguintes tecnologias de motorização foram definidas para o modal aéreo:

- **Elétrico a bateria**
- **Querosene de aviação (QAV)**
- **BioQAV**
- **Sintéticos**

## Cenário de referência para o setor de transportes

A linha de base, em termos de consumo energético do setor de transportes, foi construída levando-se em consideração, como ponto de partida, o cenário de base do PAC 2050, o histórico de demanda do setor declarado no BESP 2022 e a projeção do PIB paulista no cenário de referência. A simulação no modelo foi desenvolvida de modo a obter as demandas de energéticos para cada modal, mantidas as respectivas opções tecnológicas iniciais de motorização e o padrão vigente de utilização de energéticos. Por fim, totalizou-se a demanda de transportes para obter a linha de base da trajetória da demanda setorial (em TEP), conforme a Figura 93.

Figura 93 - Demanda total do setor de transportes vs PIB do Estado de São Paulo



## Cenário de mitigação e projeção do perfil tecnológico de motorização e combustíveis no transporte

O cenário construído de mitigação lida de forma estratégica, priorizando obter a redução do consumo de diesel fóssil no modal rodoviário, especialmente nos veículos de carga e transporte público. Em segundo lugar, o cenário busca o deslocamento da gasolina na frota de veículos leves e de logística. Por fim, o cenário projeta o deslocamento de querosene fóssil (QAV) no modal aéreo e do diesel fóssil nos modais ferroviário e hidroviário.

Em face da importância, mas também da dificuldade da descarbonização do setor de transportes no Estado, três alternativas tecnológicas de motorização se apresentam

para propiciar o deslocamento almejado dos combustíveis fósseis para alternativas de baixo conteúdo de carbono:

**(i)** a eletrificação da frota de veículos circulantes (híbrido, híbrido plug-in, elétrico puro e célula combustível);

**(ii)** a utilização de biocombustíveis (biodiesel, diesel verde, etanol, etanol 2G, BioQAV), hidrogênio e seus derivados<sup>25</sup>, bem como combustíveis sintéticos de baixo conteúdo de carbono; e

**(iii)** a utilização de gás metano (GNV e biometano).

Importante ressaltar que essas alternativas são consideradas nos cenários construídos de forma complementar e/ou combinadas, para atender a diversidade de aplicações do setor de transporte.

As premissas para construção dos cenários tecnológicos da demanda energética por modais foram as seguintes:

#### ☒ Modal ferroviário de carga

- Não há tendência de eletrificação por tecnologia pantográfica;
- Penetração de eletrificação complementar (hibridização) a bateria;
- Penetração de gás no mix de combustível, com participação de GN e biometano;
- Penetração de biodiesel e diesel verde na oferta de diesel;
- Penetração marginal do hidrogênio de baixo carbono no final do período.

#### ☒ Modal ferroviário de passageiro

- Eletrificação predominante mantida;
- Penetração marginal do hidrogênio no final do período.
- Modal hidroviário
- Penetração de eletrificação para embarcações de pequeno porte e balsas;
- Penetração de biodiesel e diesel verde na oferta de diesel;
- Penetração marginal dos combustíveis avançados, com evolução setorial em definição.

#### ☒ Modal aéreo

---

<sup>25</sup> Derivados do H2: amônia, e-metanol e e-querosene

- Querosene de aviação predominante ao longo do período, com mix progressivo de combustíveis sustentáveis, baixo carbono e base biocombustíveis;
- Penetração de eletrificação nas aeronaves de pequeno porte e curtas distâncias
- Penetração marginal de combustíveis avançados a partir da metade do período, com evolução setorial em definição.

Para todas as frotas com tecnologia de motorização ciclo diesel, o cenário de mitigação prevê trajetória de oferta do combustível com aumento da participação do biodiesel e diesel verde (HVO) na mistura do diesel, considerados os limites técnicos que garantam desempenho e a vida dos motores. Nessa projeção, a evolução da composição inicial do mix do diesel mostra participação de 11% de biodiesel e 89% de diesel fóssil (2021) e a trajetória de mitigação com decrescente parcela do diesel fóssil, a qual se reduz a 40% no mix do combustível em 2050, e evolução crescente das parcelas de biodiesel e diesel verde (HVO) até atingir um total de 60% no mix em 2050, oferecido a todas as categorias do modal rodoviário.

## Projeção das vendas de veículos novos entrantes na frota rodoviária paulista

A prospectiva faz a previsão das unidades vendidas anualmente para cada categoria dos veículos do modal rodoviário, com base no histórico das vendas e na projeção de PIB para o Estado de São Paulo, as quais se somam às respectivas frotas nas diversas categorias de leves e pesados no horizonte até 2050. O detalhamento dessas prospectivas se encontra no Anexo IX<sup>26</sup> do Caderno de Transportes.

### Automóveis, comerciais leves e motocicletas

Para automóveis de passeio projeta-se crescimento das vendas anuais, passando de 400 mil novas unidades no ano de 2022 para mais de 870 mil em 2050. Para os comerciais leves a projeção indica que as vendas anuais evoluam de 58 mil unidades em 2022 para 107 mil em 2030, chegando a 127 mil em 2050. Já para motocicletas, estima-se vendas na ordem 252 mil unidades em 2030, chegando a cerca de 290 mil motocicletas vendidas no ano final do estudo.

### Caminhões e ônibus

Os caminhões estradeiros representam as categorias com maior participação nas vendas de veículos pesados, passando de 19 mil unidades em 2030 para 23 mil em

---

<sup>26</sup> Caderno de Transportes: Projeção de Vendas - Modal Rodoviário

2050. Já os caminhões urbanos apresentam uma trajetória de queda nas vendas, passando de 8 mil veículos vendidos em 2030 para 7 mil no horizonte até 2050. Para a categoria dos ônibus urbanos, projeta-se um aumento das vendas anuais, passando de 2 mil unidades em 2022 para 4 mil unidades vendidas em 2050. Já os ônibus rodoviários apresentam uma projeção de aumento das vendas, passando de 1 mil veículos vendidos em 2021 para 1,5 mil em 2050. No caso dos micro-ônibus, prevê-se 1 mil unidades vendidas no ano de 2022 e 1,2 mil em 2050.

## **Projeção da estrutura das tecnologias de motorização por categoria na frota modal rodoviário**

Nos cenários desenvolvidos, consideradas as projeções de vendas anuais e as curvas de sucateamento, projeta-se um crescimento da frota rodoviária para cada subcategoria, passando a frota total rodoviária dos 15 milhões de veículos (CETESB, 2020) para 19,7 milhões no horizonte até 2050, um aumento percentual de 31%.

### **Automóveis**

Para a frota de automóveis de passageiros, a qual supera os 10 milhões de veículos no início do período de estudo, projeta-se cerca de 13,7 milhões de unidades no horizonte de 2050. O cenário de mitigação projeta uma trajetória de redução da participação dos veículos ciclo Otto flex (gasolina e etanol hidratado) de 8 milhões (78,5% da frota) em 2022 para 5,4 milhões (40%) em 2050. Já para os veículos não-flex, movidos a gasolina ou a etanol, estima-se uma participação marginal dos mesmos na frota de automóveis no horizonte de 2050, perfazendo 53 mil (0,4% da frota) e 1 mil (0,01%) unidades, respectivamente. Em paralelo a essa trajetória de redução da frota de veículos a combustão, prevê-se o declínio dos custos de aquisição e avanço na fabricação local dos automóveis de passageiros eletrificados, os quais percorrem menores distâncias e são utilizados por menos tempo durante o dia, o que os torna mais facilmente adaptados à rotina de carregamento das baterias. A partir deste cenário, projeta-se um aumento da parcela dos automóveis das categorias puramente elétricos (BEV) e eletrificados (HEV-flex e PHEV-flex) na frota de automóveis do estado, chegando aos 7,4 milhões de veículos no horizonte até 2050. Desse total, estima-se que em 2050, os BEVs chegarão a uma participação de 25% (3,4 milhões) na frota, os HEV-Flex de 15% (2 milhões) e os PHEV-flex outros 15% (2 milhões).

### **Motocicletas**

Para a categoria das motocicletas que representam a segunda maior frota do Estado em número de unidades, com 2,5 milhões de veículos circulantes, e operam com as

tecnologias de motorização a gasolina (1,6 milhões) e flex (921 mil), o cenário de mitigação prevê uma expressiva redução da motorização a gasolina e entrada relevante da eletrificação a partir de 2030, evoluindo até uma participação na frota total de motocicletas de 52,6% (1,8 milhões de unidades) no horizonte de 2050.

### **Comerciais leves**

Os veículos comerciais leves e de logísticas contabilizam uma frota de 1,6 milhões de veículos circulantes em área urbana no Estado de São Paulo, sendo 544 mil com motorização diesel e 306 mil a gasolina. O cenário de mitigação é ancorado tanto nas pressões impostas pela redução das emissões devido aos compromissos ESG e na crescente utilização destes veículos para distribuição em trajetos menores pré-estabelecidos nas cidades (*last mile*), o que indica uma diversidade de alternativas para propiciar o deslocamento no consumo desses combustíveis fósseis, inclusive com potencial banimento dos comerciais leves movidos a gasolina em 2040 e do diesel em 2050. No horizonte do estudo, o cenário mostra uma frota de 1,3 milhões de veículos com tecnologias de baixa ou zero emissões em 2050, frota cuja estrutura terá 40% de veículos puro elétricos (BEV), 19% de flex, 17% de híbridos plug-in flex (PHEV-Flex) e 9% movidos com a gás (GNV, preferencialmente biometano), restando 13% da frota (247 mil) operando com diesel e 1% com gasolina (10 mil).

### **Caminhões urbanos**

Uma das categorias priorizadas para descarbonização, os caminhões urbanos (agrupados aqui nas categorias de semi-leves, leves e médios), também conhecidos como VUCs (Veículos Urbanos de Carga), contabilizaram em 2021 uma frota de 190 mil veículos movidos estritamente a diesel. Na mesma esteira das pressões relativas aos programas ESG e as crescentes restrições das emissões à circulação de veículos pesados e poluentes em áreas urbanas, soma-se a característica de os caminhões urbanos percorrem trajetos menores a partir de rotas planejadas. Neste segmento, o cenário de mitigação projeta um aumento da frota de caminhões urbanos movida a gás (utilizando GNV e crescente participação, preferencial, do uso do biometano) de 5 mil (3% da frota) em 2030 para 24 mil (15%) em 2050, deslocando a demanda do diesel. Adicionalmente, projeta-se uma relevante entrada da eletrificação para descarbonização do segmento, com participação na frota de caminhões urbanos puramente elétricos evoluindo de 7 mil unidades (4% da frota) em 2030, para 27 mil (16,2%) em 2040 e 56 mil (35%) em 2050, permitindo uma logística de recarga facilmente adaptada aos centros de distribuição e garagens. Outra tecnologia de motorização considerada, mas ainda de forma marginal, no cenário para descarbonização da categoria é o hidrogênio, com trajetória de participação na frota de 0,5% (1 mil veículos) em 2040 e 1,9% (3 mil unidades) no horizonte de 2050.

### **Ônibus urbano e micro-ônibus**

Com uma frota de ônibus urbanos e micro-ônibus, movidos a diesel, que reúne 78 mil veículos circulantes no Estado, a descarbonização deste segmento apresenta um diferencial em relação às outras categorias, pois é ancorado pela aprovação da Lei nº 16.802 de 2018 (Município de SP, 2018), que determina aos operadores de serviços de transporte público do município de São Paulo, a redução das emissões de poluentes da frota de 14 mil ônibus urbanos da capital (ICCT, 2022). Nesse movimento da descarbonização das frotas de ônibus urbanos do município, o Estado de São Paulo detém uma expressiva oportunidade de liderar o movimento para a descarbonização do transporte coletivo nos ambientes urbanos e metropolitanos, uma vez que abriga significativa parte da indústria nacional, com uma cadeia produtiva robusta, consolidada e em operação, além de atração de novos grupos industriais estrangeiros, reinserção do parque industrial nas cadeias produtivas globais e atendimento de demanda regional latino-americana. Há potencial para a geração de empregos e desenvolvimento de tecnologia nacional e, adicionalmente, melhorar a qualidade do transporte público para o cidadão, com redução de ruído e emissões locais.

Nesse cenário, a trajetória de mitigação projeta redução expressiva da participação da motorização diesel na frota de ônibus urbanos, evoluindo de cerca 99% da frota em 2021 para 26% (27 mil unidades) em 2050. O cenário mostra uma trajetória de aumento da frota de ônibus urbanos movida a gás (utilizando GNV e crescente participação, preferencial, do uso do biometano), atingindo 3 mil veículos (4% da frota) em 2030, 10 mil (10%) em 2040 e 12 mil unidades (12%) em 2050. A descarbonização do segmento se dá, de forma mais relevante, com a trajetória de crescente participação de ônibus urbanos puramente elétricos na estrutura da frota, atingindo 10 mil unidades (12% da frota) em 2030, 36 mil (38%) em 2040 e próximo a 61 mil (60%) em 2050. Uma terceira tecnologia de motorização, com uso do hidrogênio, participa com menos peso no cenário e com entrada mais ao final do horizonte, respondendo por cerca de 500 unidades (0,6% da frota) em 2040 e 2 mil veículos (2,2%) em 2050.

### **Caminhões estradeiros**

Os caminhões estradeiros - que abrange os grupos de caminhões pesados e semipesados - e ônibus rodoviários, contabilizam, somados, uma frota de pouco mais de 300 mil veículos de longo curso, circulantes dentro e fora do Estado de São Paulo, com motorização exclusivamente a diesel. A trajetória de descarbonização é mais desafiadora para estes veículos, tanto em relação à capacidade de autonomia, na logística de abastecimento e recarga dessa frota como em relação à operação & manutenção da frota. Diante desse desafio, projeta-se para o cenário de mitigação

diversas rotas para uma redução significativa da participação da motorização diesel nessas frotas, novamente combinada com redução da utilização do diesel fóssil pelo aumento da parcela de biodiesel e diesel verde na composição do combustível.

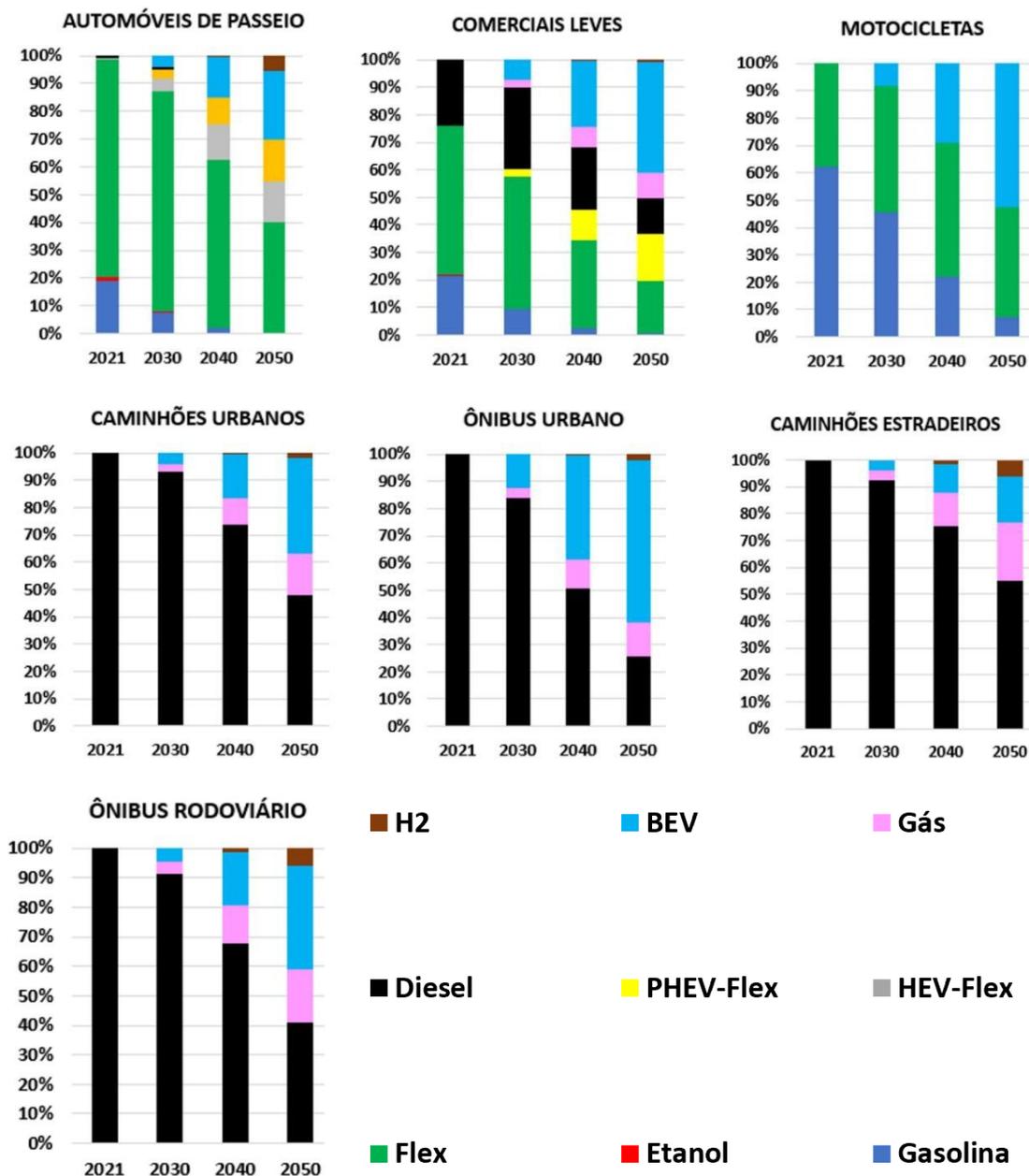
Para os caminhões estradeiros que reúnem uma frota de 274 mil veículos 100% movidos a diesel (2021), o cenário de mitigação projeta um crescimento da frota para 428 mil veículos em 2050, com participação de 55% movido a diesel e os outros 45% movidos a tecnologias de motorização de baixa ou nula emissão. Neste cenário, estima-se a penetração de caminhões elétricos a bateria (BEV) com trajetória de participação de 12 mil unidades (4% da frota) em 2030, 42 mil (11%) em 2040 e 74 mil (e 17%) em 2050. Uma segunda tecnologia de motorização são os caminhões movidos a gás (GN e Biometano), sendo previsto uma frota de 12 mil unidades (4% da frota) em 2030, 47 mil (12%) em 2040 e 94 mil (22%) em 2050. Uma terceira tecnologia de motorização, com uso do hidrogênio, participa com menos peso no cenário iniciando na metade do período, perfazendo 5 mil unidades (1,4% da frota) em 2040 e 26 mil (6,0%) em 2050.

### **Ônibus rodoviário**

Para a categoria dos ônibus rodoviários, o cenário de mitigação prevê a transição da frota de 28 mil veículos exclusivamente a diesel (2021) por outras alternativas. A participação da motorização diesel passa para 26 mil veículos (91,3% da frota) em 2030 e progressivamente se reduz até 12 mil veículos (41% da frota) em 2050. Essa trajetória é viabilizada pelo aumento da participação do gás (utilizando GNV e crescente participação, preferencial, do uso do biometano, alcançando 1,2 mil veículos (4,4% da frota) em 2030, 3,7 mil (12,8%) em 2040 e 5,2 mil (17,8% da frota) em 2050. A eletrificação também se apresenta como alternativa, sendo projetada a entrada da tecnologia de motorização elétrica em 1,2 mil ônibus rodoviários (4,4% frota) em 2030, 5,2 mil (18,2%) em 2040 e 10,3 mil (35,2%) em 2050. Tendo uma logística de recarga de alta potência localizada em pontos de parada e terminais rodoviários. O hidrogênio participa da descarbonização de forma menos relevante a partir da metade do período de estudo, atingindo 400 unidades (1,3% da frota) em 2040 e 1,8 mil unidades (6,0%) em 2050.

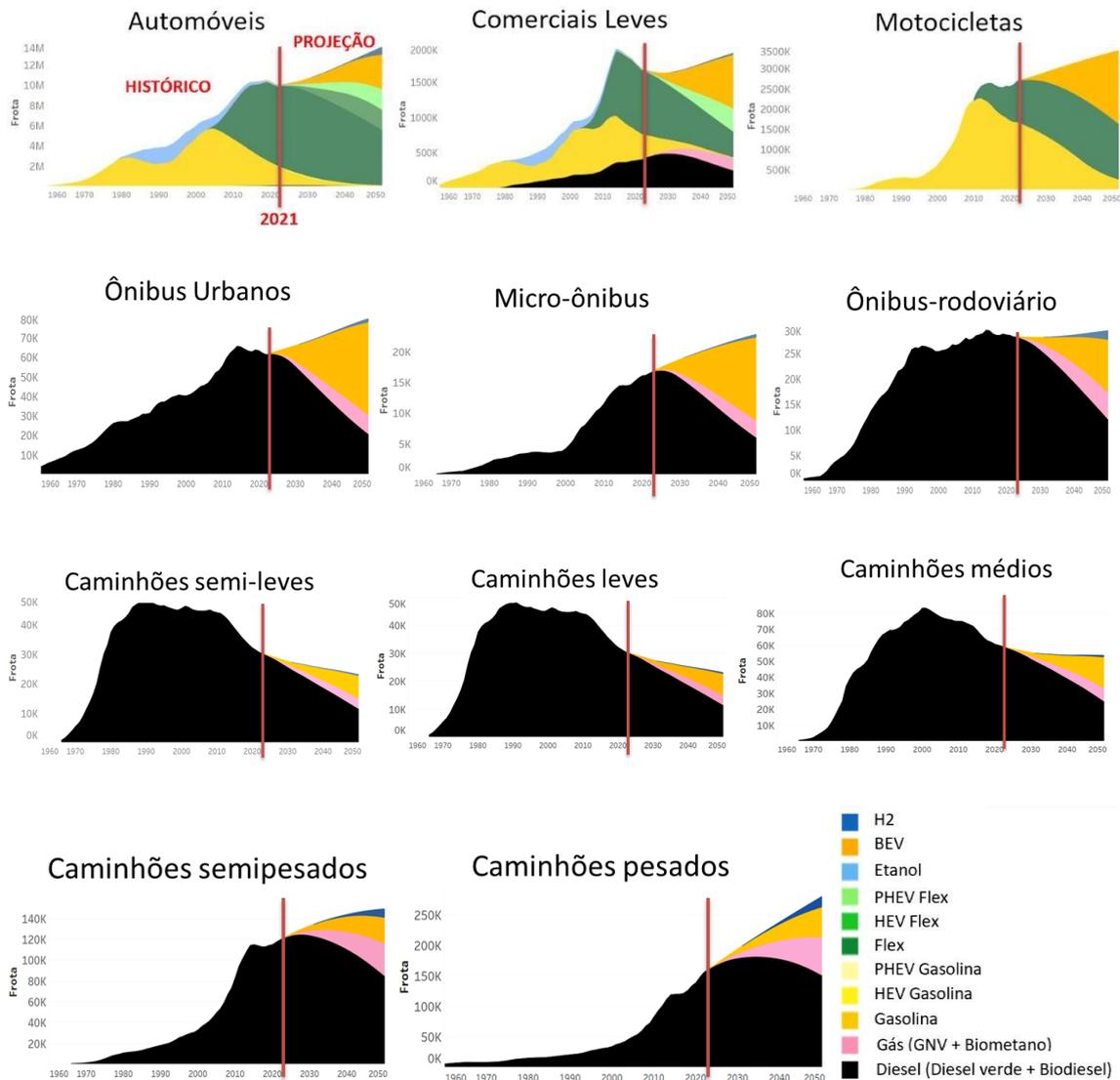
A Figura 94 resume as trajetórias, para o modal rodoviário, da estrutura de participação das tecnologias de motorização, para cada respectiva categoria.

Figura 94 - Trajetórias da Estrutura de participação das tecnologias de motorização na frota modal rodoviário, por categoria



A Figura 95 resume as trajetórias das frotas de cada segmento, para o modal rodoviário, apresentando a evolução de participação das tecnologias de motorização, para cada respectiva categoria.

Figura 95 - Projeção das frotas de veículos por categoria de veículos e respectivas trajetórias de tecnologias de motorização no modal de transporte rodoviário



## Projeção da demanda de energéticos do modal rodoviário

No cenário de mitigação de emissões, com as trajetórias de motorização das frotas rodoviárias construídas com as diversas tecnologias consideradas, resulta em uma mudança relevante na estrutura da demanda de energéticos do setor de transportes rodoviário do Estado ao longo do período até o horizonte de 2050, com uma redução substancial da participação dos combustíveis fósseis, particularmente o diesel.

### **Transição do diesel no modal rodoviário**

A demanda total de diesel no modal rodoviário segue trajetória decrescente, recuando de 10,7 bilhões litros em 2021 para 6,4 bilhões de litros em 2050. Acompanhada de progressiva participação dos biocombustíveis no mix do diesel ofertado, o efeito combinado resulta em forte queda na demanda do diesel de petróleo no modal rodoviário, o qual recua de 9,5 bilhões de litros para 2,6 bilhões de litros em 2050 e a participação de diesel de origem não fóssil chegando a 3,8 bilhões de litros, 40% no mix de demanda total do diesel para o modal rodoviário em 2050.

A intensificação da presença do gás metano no modal rodoviário também contribui para deslocar parte da demanda original de diesel, inicialmente com uso do gás natural veicular de origem fóssil (GNV) e trajetória de participação crescente do biometano, o qual atinge 50% da demanda total de gás veicular em 2050, com impacto significativo nas frotas de ônibus e caminhões, bem como em parcela da frota de veículos comerciais leves de logística urbana com motorização diesel.

A eletrificação é uma segunda alternativa considerada para a redução de demanda do diesel no modal rodoviário, com participação de forma relevante no segmento de ônibus e veículos comerciais leves de logística urbana, mas também na eletrificação de parte da frota de caminhões.

O hidrogênio, em menor proporção, mostra uma terceira possibilidade para a trajetória de redução de diesel fóssil no consumo do modal rodoviário, com entrada importante nos segmentos de comerciais leves, ônibus e caminhões.

### **Transição da gasolina no modal rodoviário**

Para a gasolina C, que concentra sua demanda nos segmentos de automóveis de passeio, motos e veículos comerciais leves, o cenário de mitigação projeta uma redução de mais de 99% da demanda total, passando de 9,4 bilhões de litros em 2022 para menos de 40 milhões de litros em 2050. Destaca-se para o cenário proposto, que a composição da gasolina C comercializada, mantém fixo seu mix de 72,5% de gasolina A, de petróleo, e 27,5% de álcool anidro ao longo de todo o período do estudo e, portanto, a demanda de etanol anidro acompanha a trajetória de redução da gasolina C. Para este cenário, a trajetória de deslocamento da demanda da gasolina C se dá utilizando-se múltiplas alternativas tecnológicas de motorização.

Estima-se um aumento na demanda do etanol hidratado, em termos absoluto e relativo, para aplicação no modal rodoviário, tanto pelos veículos de tecnologia convencional flex de combustão interna (flex), como para os veículos flex híbridos plug-in (PHEV-Flex) e veículos flex híbridos (HEV-Flex). Prevê-se também que em

meados da década de 2040, haverá um pico da demanda do etanol hidratado, evoluindo de 8,5 bilhões de litros em 2021 até uma máxima de demanda de 14,5 bilhões de litros em 2044 e passando a decrescer a partir desse ano com a progressiva participação da eletrificação na matriz do transporte.

A trajetória de progressiva eletrificação de frotas rodoviárias com veículos “*plug in*” também contribui no deslocamento da demanda de gasolina C, a qual é substituída pela demanda de energia elétrica do sistema elétrico, com a penetração de tecnologias de veículos elétricos a bateria (BEV) e veículos flex híbridos plug-in (PHEV-Flex), estes últimos concentrados no segmento de automóveis de passeio.

O gás veicular, com a evolução do gás natural fóssil e do biometano como já descrito, participa também na trajetória do deslocamento da gasolina C demandada por parcela da frota de comerciais leves.

A inserção do hidrogênio, novamente em menor proporção, contribui para a trajetória de redução da gasolina C, com penetração nos segmentos de automóveis e comerciais leves.

#### **Trajетória do gás veicular no modal rodoviário**

No total, o modal rodoviário apresenta uma trajetória da demanda de gás metano de 0,2 bilhão de m<sup>3</sup> em 2021 que é 100% GNV fóssil, passando a 0,7 Bilhão de m<sup>3</sup> em 2030 (com 5% de participação de biometano), 1,9 bilhões de m<sup>3</sup> em 2040 (com 25% de biometano), e alcança uma demanda de gás veicular total de 3 bilhões de m<sup>3</sup>, 50% de biometano, em 2050.

#### **Trajетória do hidrogênio no modal rodoviário**

O hidrogênio começa a penetrar de forma significativa no modal rodoviário a partir do 2030, crescendo até chegar em 60 mil Ton/ano em 2040, e atingir 368 mil Ton/ano em 2050.

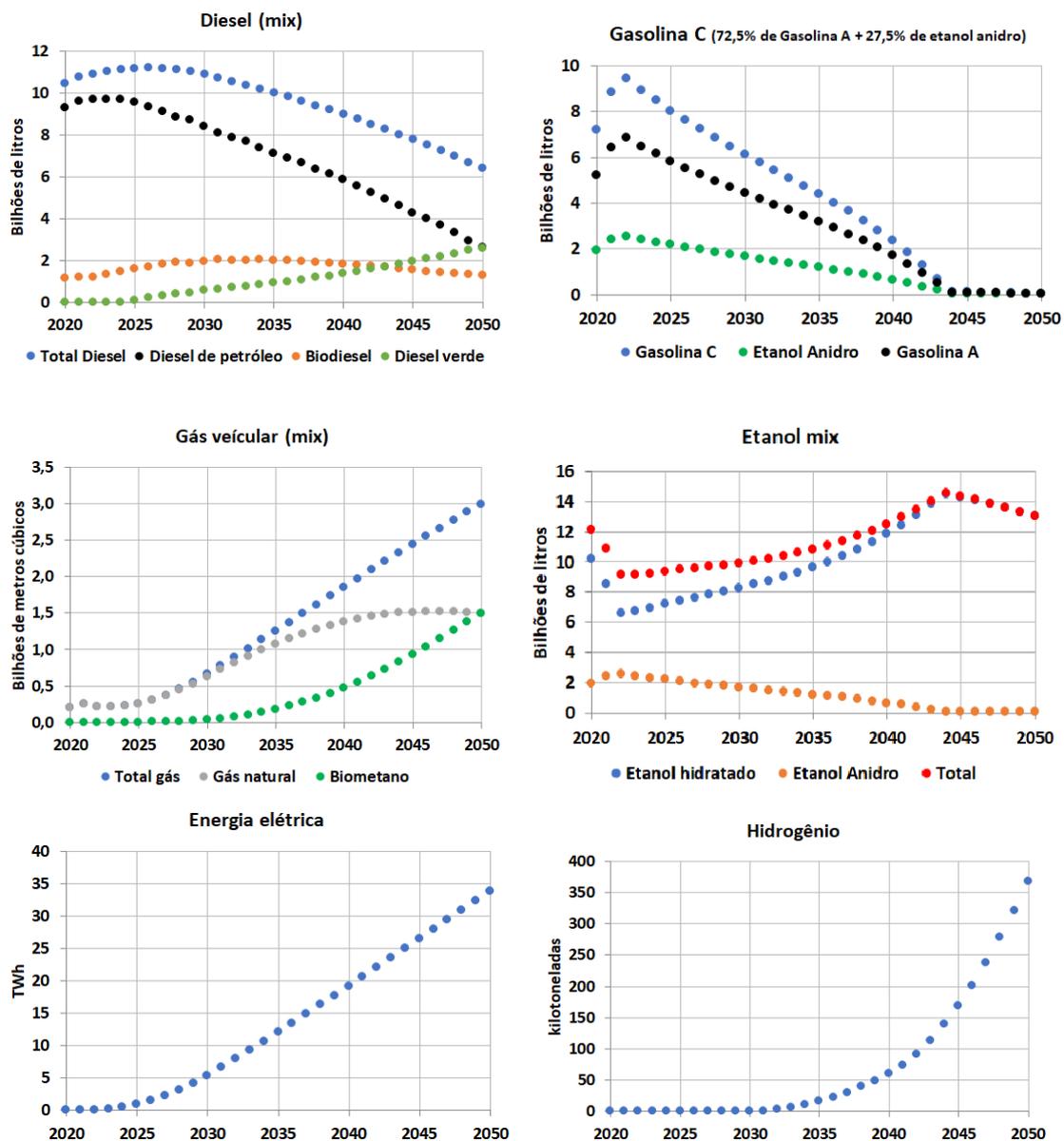
#### **Trajетória da demanda de energia elétrica no modal rodoviário**

A demanda de energia elétrica no modal rodoviário é inexpressiva no início do período do estudo, e a trajetória do cenário de eletrificação apresenta crescimento acentuado da demanda e atinge 5,4 TWh em 2030, 19 TWh em 2040, e chega a 33,8 TWh em 2050, sendo 40% deste último demandado pela frota de automóveis de passeio.

## Consolidação das trajetórias da demanda dos diversos energéticos no modal rodoviário

A Figura 96 apresenta as projeções de demanda de energéticos do transporte rodoviário nas respectivas unidades comerciais utilizadas no BESP.

Figura 96 - Projeção da demanda de energéticos do transporte rodoviário, em unidades comerciais



## Projeção da demanda de energéticos dos modais ferroviário, aéreo e hidroviário

### Ferrovário de carga

Para o modal ferroviário de carga, o cenário de mitigação resulta em uma demanda praticamente constante de diesel em torno de 250 milhões de litros até o horizonte 2050, mas com a progressiva participação do biodiesel e diesel verde e a decrescente parcela do diesel fóssil no mix. O cenário apresenta aumento de eletrificação a bateria com o consumo de quase 0,2 TWh em 2030, evoluindo para cerca de 1 TWh em 2050. A penetração, mais adiante no período, da tecnologia e utilização do hidrogênio apresenta demanda de cerca de 1 kt em 2040 e chegando a pouco mais de 5,7 kt em 2050.

### Ferrovário de passageiro

Para o modal ferroviário de passageiros o cenário projeta crescente consumo de energia elétrica a partir de trajetória de expansão do Metrô de São Paulo e do avanço no plano de implantação dos TICs / CPTM (trens intercity), passando o consumo de 1 TWh em 2021 para 1,6 TWh em 2050. O hidrogênio também participa na diversificação tecnológica, apresentando demanda de 0,4 kt em 2040 e chega a 2,1 kt em 2050.

### Aéreo

No modal aéreo, prevê-se a penetração de novas alternativas tecnológicas a partir da última década do período, com combustíveis sustentáveis na forma de sintéticos (e-metanol, amônia, e-querosene) chegando a 150 milhões de litros, e bioquerosene com a demanda de 300 milhões de litros em 2050, os quais juntos compõem cerca de 12% da demanda total do aéreo. Somado às ações previstas de ganhos de eficiência lideradas pela governança setorial, a demanda do QAV fóssil evolui de 2,2 bilhões de litros em 2021 para 3,6 bilhões de litros em 2050. O cenário mostra também uma penetração menos relevante da eletrificação a partir do horizonte de 2040, restrita a aeronaves de menor porte de curto curso, evoluindo da demanda de 0,2 TWh e alcançando os 0,8 TWh no horizonte de 2050. O cenário não considera eletrificação para aeronaves comerciais de longos trajetos.

### Hidroviário

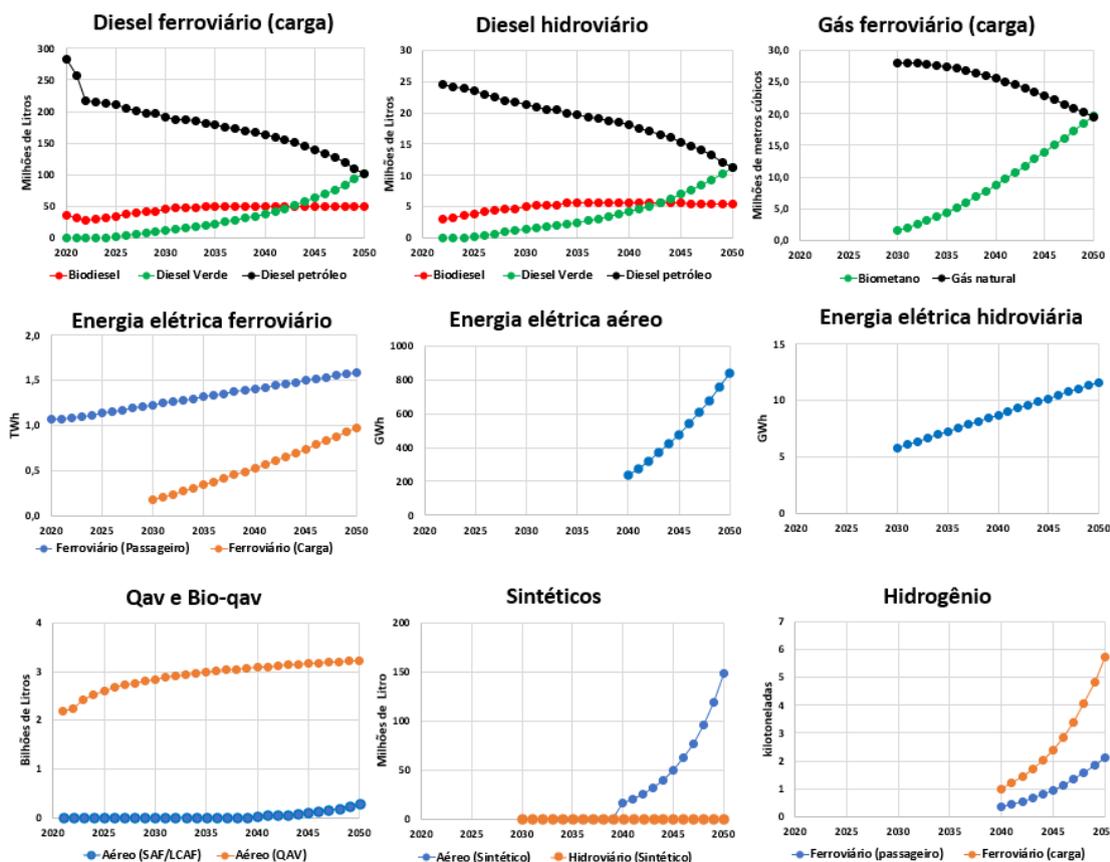
No modal hidroviário, cuja demanda energética é marginal no setor de transporte e permanece no cenário demandando majoritariamente o diesel, o qual terá a

participação significativa de biodiesel e diesel verde no mix ofertado. Com a penetração da eletrificação para embarcações de pequeno porte, balsas e empurradores chega a uma demanda de 12 GWh em 2050. No cenário, os combustíveis sintéticos atendem apenas a demanda de desenvolvimento e de projetos pilotos de teste.

## Consolidação das trajetórias da demanda dos diversos energéticos nos modais ferroviário, hidroviário e aéreo

A Figura 97 apresenta as projeções de demanda de energéticos dos modais ferroviário, hidroviário e aéreo nas respectivas unidades comerciais utilizadas no BESP.

Figura 97 - Projeção da demanda de energéticos do transporte ferroviário, hidroviário e aéreo



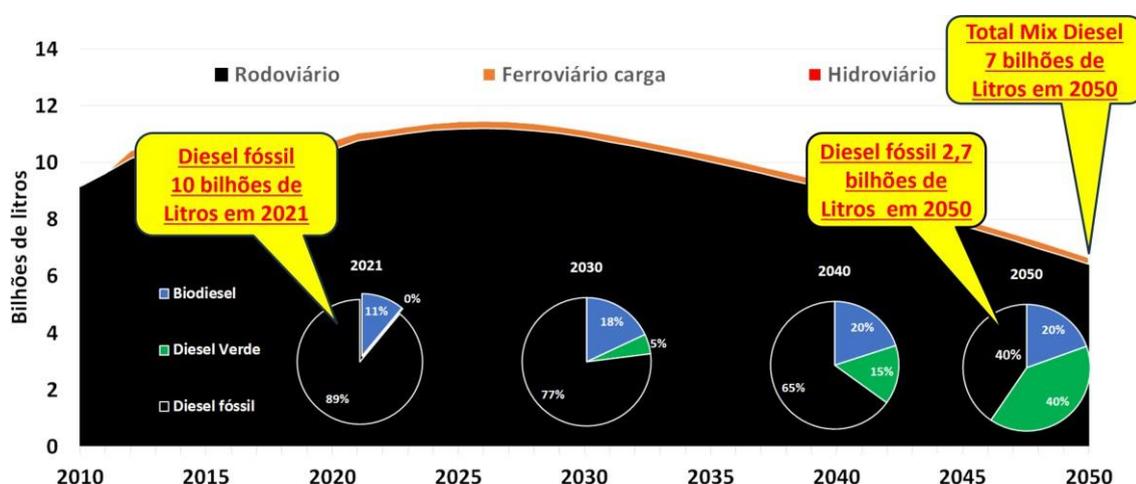
## Projeção do total da demanda de energéticos do setor de transportes

Considerando todos os modais de transporte, o conjunto de ações propostas no cenário de mitigação propicia uma trajetória para a redução da demanda total de diesel e, adicionalmente, redução expressiva na parcela de participação do diesel fóssil no mix do combustível ofertado (Figura 98/Figura 98).

O consumo de diesel fóssil observado em 2021 é de 10 bilhões de litros, se reduziria para 2,7 bilhões de litros em 2050, uma redução de 72% em relação ao valor absoluto de 2021.

Já o biodiesel e diesel verde tem trajetória de aumentam sua parcela na mistura do diesel ofertado, passando de 11% na mistura em 2021 para 59% do mix em 2050. Em termos absolutos, a demanda aumentaria de 1,2 bilhões de litros em 2021 para 2,6 bilhões de litros em 2030 e chegaria a 4 bilhões de litros em 2050.

Figura 98 - Demanda total de diesel fóssil, biodiesel e diesel verde



O cenário para demanda total de gás metano para atender o transporte apresentaria uma trajetória na qual em 2021 100% da demanda é atendida pelo gás natural fóssil e o biometano aumenta progressivamente sua participação percentual no atendimento da demanda total. Assim, o biometano responde por 5% da demanda total de gás em 2030, evoluindo para 25% em 2040 e chegando a 49% da demanda total em 2050.

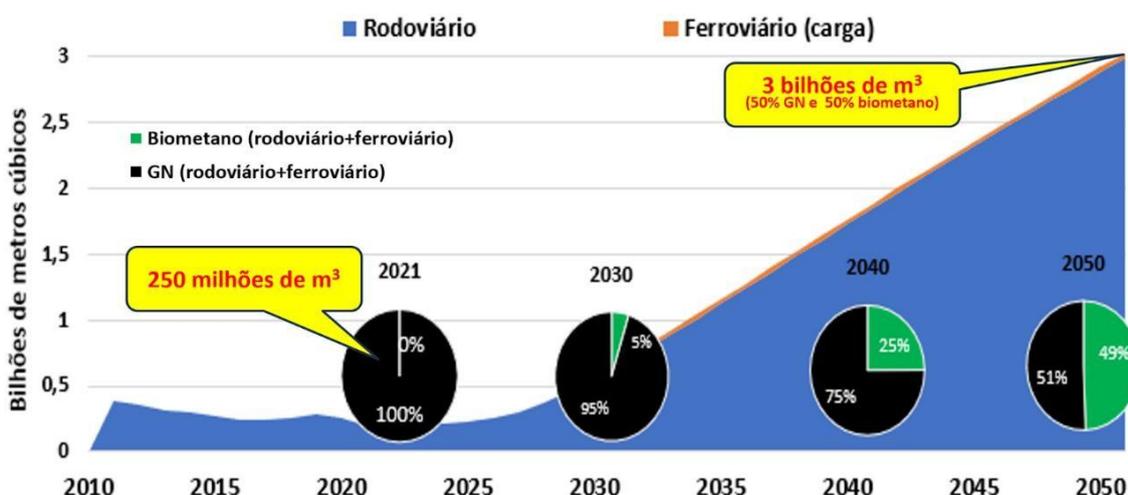
No final no horizonte, a demanda total combinada de gás natural e biometano alcança os 3 bilhões de m<sup>3</sup> conforme apresentado na

Figura 99, tendo o modal rodoviário pesado de carga e passageiro como maiores consumidores do setor de transportes.

A trajetória do gás natural fóssil evolui de 250 milhões de m<sup>3</sup> (100% da demanda de gás veicular) em 2021 para 651 milhões de m<sup>3</sup> (95% da demanda total) em 2030, 1,4 bilhões de m<sup>3</sup> (75 % de participação) em 2040 e 1,5 bilhões de m<sup>3</sup> (51% da demanda) em 2050.

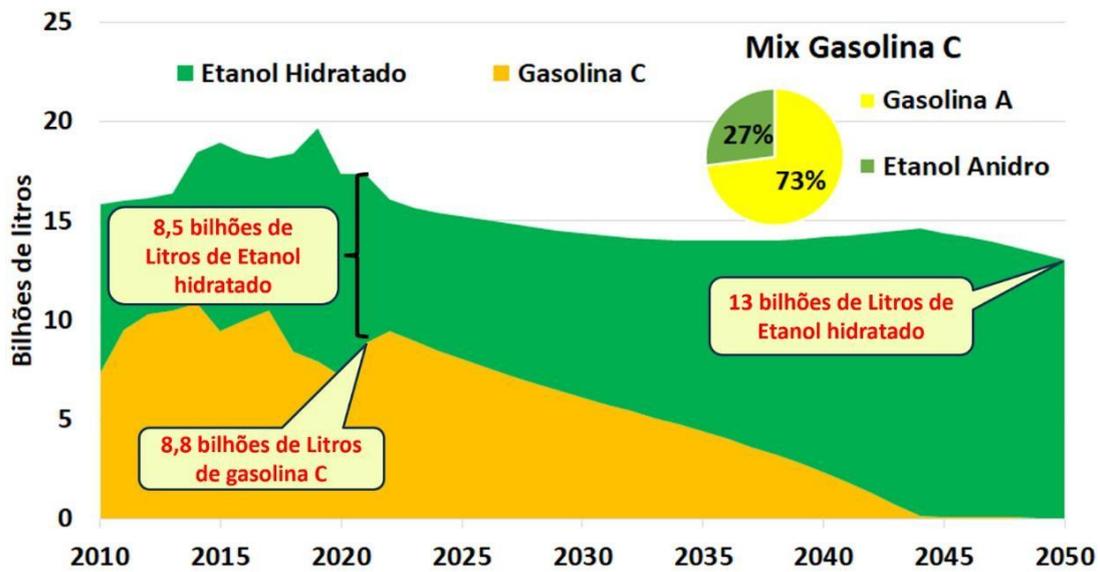
A penetração do biometano alcança 34 milhões de m<sup>3</sup> em 2030, 470 milhões de m<sup>3</sup> em 2040 e 1,5 bilhões de m<sup>3</sup> em 2050.

Figura 99 - Demanda total de gás natural e biometano no modal de transportes



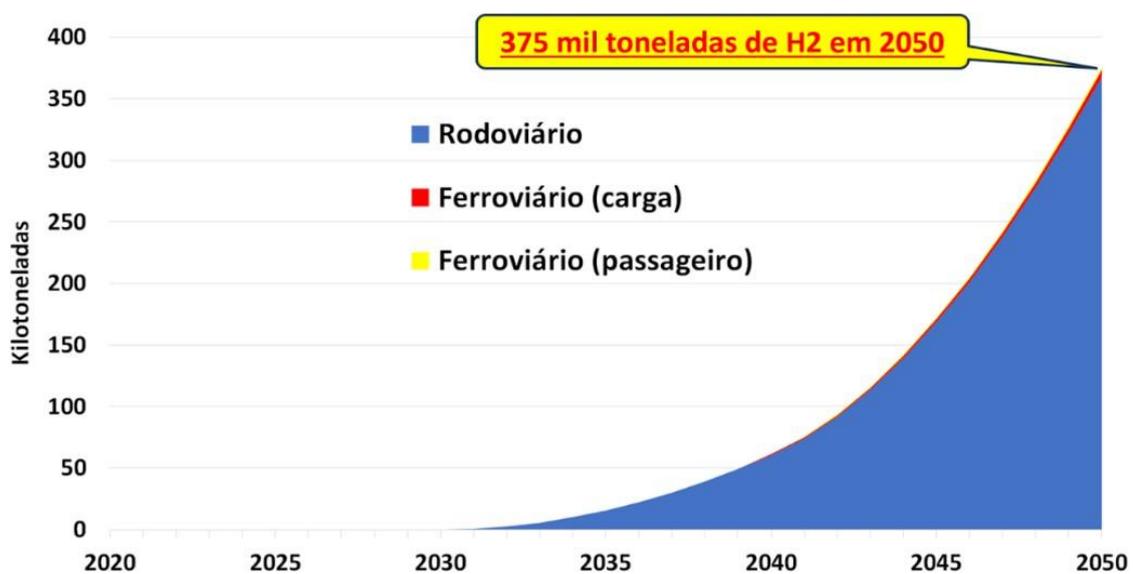
A gasolina apresenta uma trajetória fortemente decrescente na demanda de gasolina C (contendo álcool anidro e gasolina A), passando de 8,8 bilhões de litros em 2021 para 38 milhões em 2050 (Figura 100). O etanol hidratado aumenta sua participação no atendimento da demanda, passando de 8,5 bilhões em 2021 para 13 bilhões de litros em 2050.

Figura 100 - Demanda total de gasolina C e etanol hidratado no modal de transportes



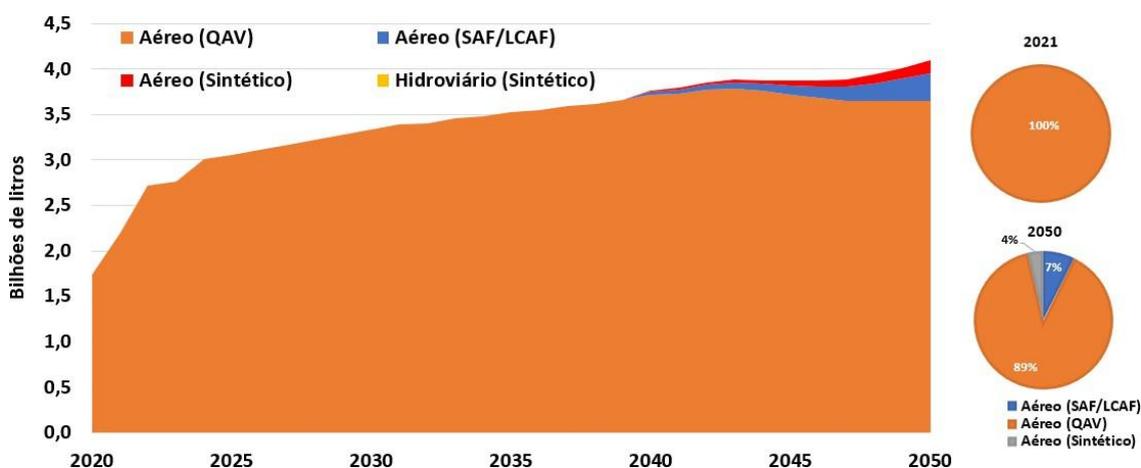
Para a trajetória da demanda total de hidrogênio o consumo do “novo” combustível passa de 50 mil toneladas em 2040 para 375 mil toneladas em 2050. Nesse cenário, o modal rodoviário se apresenta como principal consumidor do energético (Figura 101).

Figura 101 - Demanda total de hidrogênio para o modal de transportes



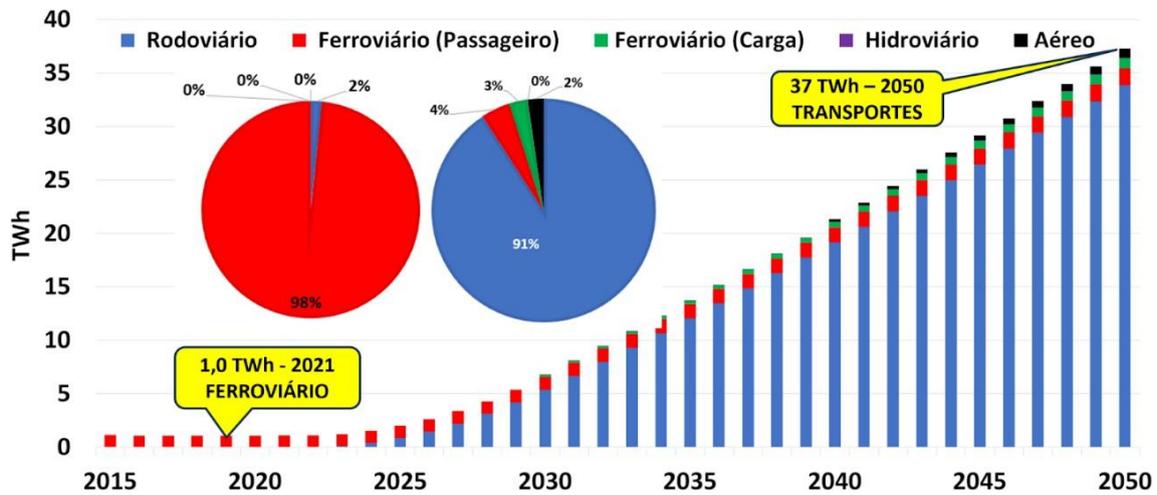
A Figura 102 apresenta a trajetória para QAV, Bio-QAV e sintéticos demandados pelos modais aéreo e hidroviário. Vale destacar que esses dois modais ainda estão em fase de discussão e definição das rotas tecnológicas a serem implementadas, e, portanto, é recomendado manter especial atenção no acompanhamento da dinâmica dos mesmos.

Figura 102 - Demanda total de Bio-QAV e combustíveis sintéticos no modal de transportes



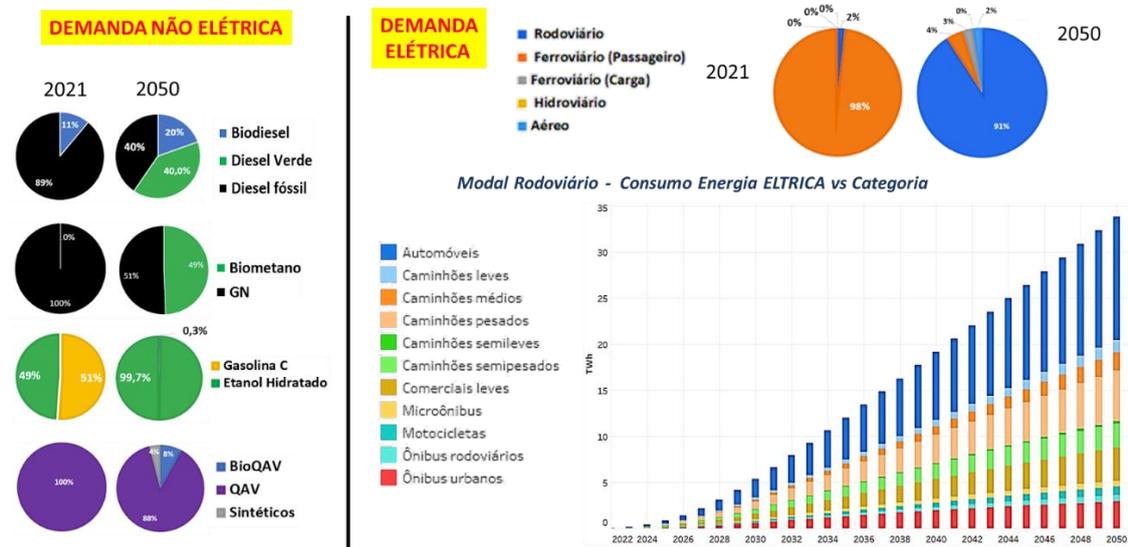
O cenário de eletrificação considerando todos os modais de transporte evoluíram do consumo de 1,1 TWh, em 2021, para 6,7 TWh, em 2030, 21 TWh, em 2040, alcançando 37 TWh em 2050. O modal rodoviário responde por 79% da demanda de energia elétrica em 2030 (5,4 TWh), e chega a 91% em 2050 (34 TWh). A Figura 103 apresenta a trajetória da demanda total e participação dos modais.

Figura 103 - Demanda total de eletricidade no modal de transportes



O resumo geral da demanda de energéticos, elétricos e não elétricos, na trajetória do setor de transporte é apresentado na Figura 104.

Figura 104 - Quadro resumo da demanda de energéticos para o setor de transportes no Estado de São Paulo



## Projeção da demanda energética no cenário de mitigação para o setor de transportes

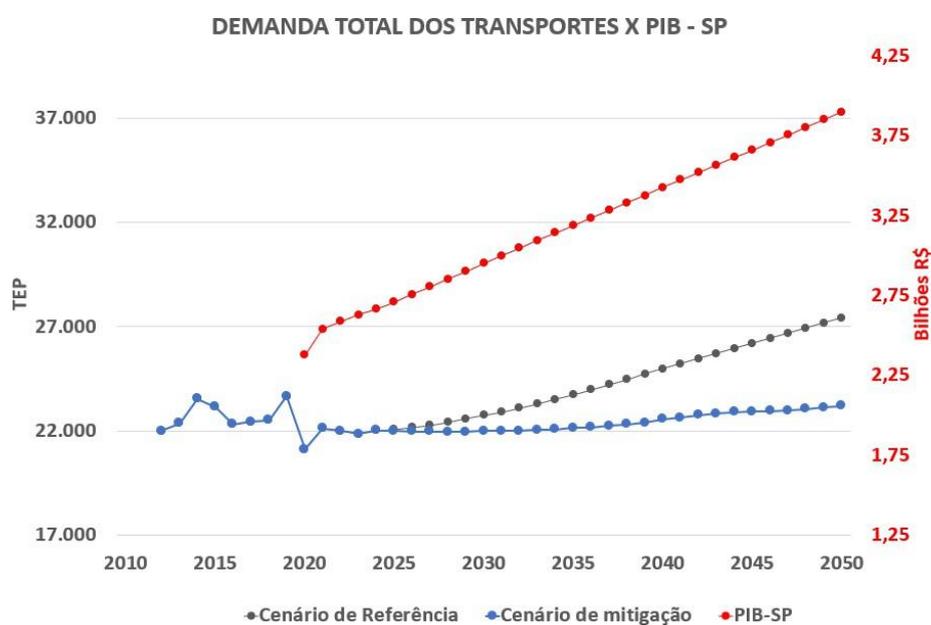
Com o conjunto das simulações, feitas de modo a se obter as trajetórias para o cenário de mitigação das respectivas demandas de energéticos para cada modal, convertidas para uma mesma unidade de energia (TEP), permite a comparação com a linha de base da trajetória de referência, e também com a trajetória do PIB-SP utilizada na cenarização, conforme apresentado Figura 105.

Ao longo da trajetória do cenário de mitigação, a partir de 2021, o crescimento do PIB-SP se dá com um consumo energético praticamente constante na produção do serviço de transporte de passageiros e cargas, com a relação demanda energética/ PIB caindo, o que se traduz como um ganho no ambiente econômico do estado.

Assim, observa-se os seguintes resultados e potenciais impactos provenientes do cenário estudado:

- Maior utilização de energéticos renováveis, e /ou de menor intensidade de carbono, na matriz do transporte;
- Evolução do PIB do estado com menor consumo de energia no setor de transporte por unidade de PIB;
- Contribuição efetiva para o atingimento do objetivo de menor emissão equivalente de CO<sub>2</sub>;
- Impacto positivo no ambiente urbano (poluição do ar, ruído)

Figura 105 - Projeção da demanda energética do setor de transportes e da trajetória do PIB do Estado de São Paulo para o cenário de mitigação



# Setor de Energia Térmica e Combustíveis

## Preâmbulo

O presente capítulo estruturou-se com base em quatro pilares (quatro Ds) ao discutir a relevância que os combustíveis de origem fóssil (gás natural e derivados de petróleo) e seus equivalentes renováveis terão como energia térmica no PEE/SP 2050.

O primeiro pilar é o da **Descarbonização**. Entende-se a necessidade de que a reindustrialização do Estado de São Paulo conte com maior participação de sistemas energéticos mais sustentáveis e eficientes. Logo, deve-se buscar a redução de emissões de carbono para a atmosfera nos processos térmicos em todos os setores socioeconômicos. Essas reduções podem ser atingidas através de:

- o Avanços dos combustíveis gasosos em substituição a combustíveis líquidos e sólidos menos eficientes e menos sustentáveis;
- o Processos de combustão mais eficientes e integrados, incluindo sistemas de cogeração de alta performance;
- o Energia térmica produzida por fontes renováveis eficientes;
- o Promoção de benefícios socioambientais relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS);
- o Substituição parcial de combustíveis por eletrificação e expansão da eletrotermia;
- o Adoção de medidas mitigatórias às emissões de GEE, incluindo CCS, CCUS, BECCS e maior eficiência energética.

O segundo eixo estruturante deste capítulo versa sobre os avanços logísticos e a **Digitalização** dos sistemas. Observa-se uma adoção crescente de sistemas digitais tais como: redes inteligentes, *Internet das coisas*, sensores, *big data*, *blockchain*, comunicação e *analytics*. Tais tecnologias, se integradas aos sistemas térmicos também contribuem com a maior participação de renováveis intermitentes nas redes logísticas. A digitalização também pode promover a expansão da cobertura estadual dos sistemas logísticos de rede e a granel para gases combustíveis possibilitando maior concorrência multimodal entre energéticos e maior conexão aos mercados globais dos gases combustíveis.

Os terceiro e quarto “Ds” estruturantes deste capítulo são a **Descentralização** e a **Diversificação**. O primeiro ao buscar promover a acentuação da produção de combustíveis por diversos agentes e fontes de suprimento, mudando o atual quadro de produção predominantemente centralizada, acaba por consequência, fortalecendo

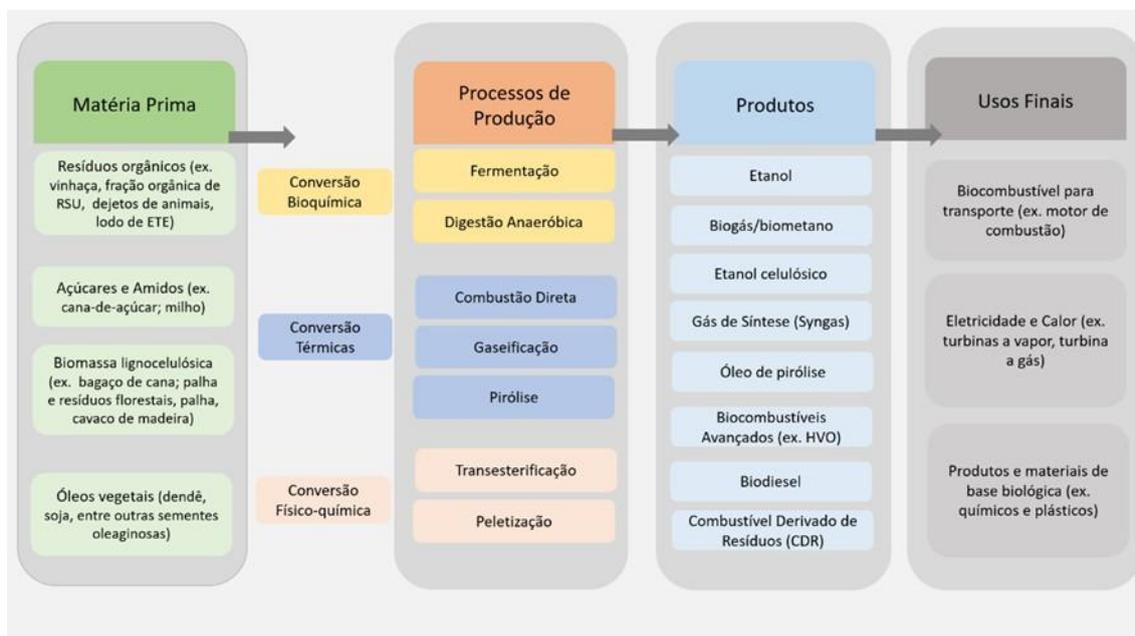
também a produção distribuída de fontes renováveis. O segundo, por sua vez entende que é possível realizar modernização e descarbonização sem comprometer a segurança energética.

Portanto tais eixos possibilitam avanços no autoconsumo e nos sistemas integrados descentralizados e de alta performance (incluindo a cogeração e outros sistemas híbridos), assim como o melhor aproveitamento das fontes renováveis de energia. Inclui-se aqui ganhos de valor adicionado e de circularidade dos recursos energéticos disponíveis tais como resíduos agrícolas e urbanos entre outros tipos de biomassa presentes no estado.

### Bioenergia no contexto da descarbonização

Bioenergia é a energia gerada a partir de processos de conversão de biomassa, na qual a energia produzida pode ser utilizada diretamente como combustível ou processada em combustíveis líquidos ou gasosos. Produzida a partir de diferentes tipos de materiais biológicos, como culturas agrícolas diversas e vários tipos de resíduos orgânicos (por exemplo, resíduos agroindustriais, dejetos de animais, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, entre outros), os usos finais da bioenergia incluem, fornecimento de calor, produção de eletricidade e várias aplicações como combustíveis para transporte. A Figura 106 apresenta, os principais processos de conversão de biomassa em bioenergia, os produtos possíveis e usos finais da bioenergia.

Figura 106 - Rotas tecnológicas, produtos e usos finais da bioenergia



Fonte: adaptado de (IEA, 2017).

## Benefícios socioambientais da bioenergia e a relação com os ODS

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)<sup>27</sup> servem como estrutura abrangente para o desenvolvimento de políticas holísticas que abordem prioridades ambientais, sociais e econômicas. Suas diretrizes e ações propostas são ferramentas importantes que buscam maximizar os benefícios positivos e evitar impactos negativos na sustentabilidade da bioenergia sustentável. A substituição do uso tradicional de bioenergia para tecnologias modernas de produção de bioenergia é um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável para 2030 (ODS 7- Energia Limpa e Acessível) e tem ligação com outros 11 dos 17 ODS, entre eles ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 13 (Ação Climática) (BLAIR, et al. 2021).

Destaque-se a conexão com o ODS 8 e ODS 9: além da redução de emissões, a bioenergia pode trazer benefícios sociais e econômicos ao envolver fornecedores e empresas locais e contribuir com as práticas de gestão de resíduos, transformando fluxos de resíduos em energia. Por exemplo, o desenvolvimento da cadeia de biogás e biometano, representa uma alternativa eficiente de descarbonização de vários setores, induz e fomenta a interiorização do gás com geração de emprego e desenvolvimento da cadeia de suprimento.

Cadeias de fornecimento de bioenergia e biorrefinarias podem impulsionar o desenvolvimento industrial e criar empregos locais em diferentes níveis. Além de oportunidades de descarbonizar setores industriais com ofertas térmicas, a pode fornecer insumos para indústria química aliando pesquisa, desenvolvimento e inovação em tecnologias de base biológica.

## Modelos de Negócios Orientados para Economia Circular

O Estado de São Paulo, tem potencial para o desenvolvimento de diferentes *hubs* de produção da bioenergia aderentes com vocações regionais. A produção de bioenergia no estado pode se desenvolver a partir de modelos de negócios sustentáveis voltados para Economia Circular, buscando sinergias possíveis, seja em infraestrutura, desenvolvimento tecnológico ou trocas de matéria prima (resíduos, por exemplo) para ganho de escala. Ou seja, empresas (ou setores) que tradicionalmente são desconectados (ex. como agropecuária e saneamento) poderão se unir e obter

---

<sup>27</sup> Propostos pela Organização das Nações Unidas, no âmbito da Agenda 2030, representam ações e metas de todos os países - desenvolvidos e em desenvolvimento - em uma parceria global visando o fim da pobreza, melhoria da saúde e a educação, redução da desigualdade, estímulo ao crescimento econômico e combate às mudanças climáticas.

vantagens competitivas na produção de bioenergéticos em processos simbióticos. Grandes geradores de biomassa podem desempenhar papéis de âncoras para o desenvolvimento da cadeia de bioenergia, fomentando condições para que o ecossistema de negócios se consolide no estado com atração de pequenas empresas, inovação e desenvolvimento tecnológico.

Modelos de negócios voltados para economia circular foram investigados por (Pavan, et al., 2021). O estudo avaliou os benefícios socioeconômicos e ambientais, para conversão de resíduos em energia com base na dinâmica de ancoragem entre as usinas de açúcar e álcool e demais fornecedores de biomassa em uma rede de simbiose agroindustrial. Os resultados evidenciam o alto potencial do Estado de São Paulo para produção de bioenergia a partir da utilização de múltiplas matérias-primas orgânicas envolvendo diferentes setores geradores de resíduos. O estudo explorou a simbiose industrial como um processo de desenvolvimento de fontes de produção de bioenergia regionais, promovendo inovação tecnológica com ganho de escala.

## Biogás e Biometano

O biogás e biometano são combustíveis de origem renovável produzidos pelo processo de digestão anaeróbica. Nesse processo microrganismos convertem matéria orgânica em gás com produção simultânea de calor. A mistura gasosa formada é chamada de biogás, que é formada principalmente por metano (50% - 75% em volume) e dióxido de carbono (25% - 50% em volume). A proporção dos componentes presentes no gás produzido (biogás) depende das condições ambientais e do tipo de substrato (biomassa). Os principais fatores que influenciam a digestão anaeróbica e, portanto, a produção de biogás, são temperatura, pH, umidade, natureza do substrato, teor de carbono e nitrogênio. O substrato (matéria orgânica) pode ser resíduos sólidos urbanos, lodo de esgoto, dejetos animais, entre outros.

O uso de biodigestores para produção de biogás foi difundido através de diferentes iniciativas, a partir da década de 60. Na década de 1970, essa propagação da tecnologia de produção de biogás ganhou força devido à crise do petróleo que motivaram pesquisas sobre energias com fontes alternativas. No contexto da redução da dependência da importação de derivados de petróleo, o Decreto nº 87.079/1982 do PME colocou o biogás como uma alternativa para racionalizar a utilização da energia. No entanto, alguns problemas de operação fizeram com que o uso da tecnologia entrasse em declínio. Entre os anos 1990 e 2000, o biogás voltou a ser discutido no Brasil como alternativa para reduzir as emissões de GEE por meio de projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e seus respectivos créditos de carbono.

O interesse na produção de biogás e biometano sofreu altos e baixos desde os períodos iniciais nos anos 1970 até que em 2010, tornou-se alternativa energética

importante para o Brasil, quando o biogás passou a ser mais fortemente utilizado na geração de bioeletricidade e mais recentemente na produção de biometano.

Vale destacar que o Biometano ( $\text{CH}_4$ ) é obtido a partir do biogás através de processos de purificação com a retirada de vapor d'água; dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Com poder calorífico maior que o biogás e características físico-químicas muito semelhantes ao GN (Gás Natural), o biometano é intercambiável aos diversos usos do Gás Natural.

## Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO)

O óleo vegetal hidrotratado (HVO) é um produto do hidro craqueamento de lipídios residuais. Enquanto o biodiesel é formado a partir de processos de transesterificação ou Ester Metílico de Ácido Graxo (FAME) podendo ser usado em até 15% como uma mistura com o óleo diesel fóssil, o HVO pode ser misturado em concentrações mais altas ou usado como uma alternativa sem a necessidade de ajustes mecânicos (Bohl, 2018); (Valeika, 2022). Isso ocorre porque o HVO tem uma composição química semelhante ao diesel. O HVO, assim como outros combustíveis verdes, pode ser produzido a partir de materiais orgânicos, óleos vegetais e gorduras animais. Há uma variedade de matérias-primas que podem ser utilizadas, tais como: óleo vegetal de cozinha usado, soja, canola, colza, óleo de palma, óleo de milho e gorduras animais (sebo não comestível de aves e bovinos) (Cremonez et al., 2021; EPE, 2020).

O Brasil possui um grande potencial para liderar a produção de HVO, haja vista sua experiência prévia com biocombustíveis. Com a implantação da política RenovaBio, espera-se que o Brasil estimule a produção de HVO para o cumprimento da meta sustentável global.

A nível nacional, projetos pilotos de HVO já foram realizados com sucesso e, espera-se que a produção em larga escala seja realizada em breve. Em 2006, a Petrobras patenteou sua própria tecnologia HBIO, que foi usada para produzir cerca de 400 milhões de litros de diesel misturado com 5% HVO em 2020 em sua planta REPAR (Paraná), a partir de óleo de soja. Além disso, outro precursor e grande investidor é a Brasil BioFuel (BBF), empresa que investiu aproximadamente 322 milhões de dólares na construção da primeira biorrefinaria HVO autônoma do país na cidade de Manaus. Prevê-se que a produção comece em janeiro de 2025 com uma capacidade de 5 milhões de litros por ano (Djelouadji & Hillairet, 2019; ECB Group, 2021; FAO, 2019).

O Estado de São Paulo, por sua vez, possui um grande potencial de produção de HVO tanto através da construção de plantas autônomas quanto pela conversão das refinarias existentes. Considerando as projeções de demanda para 2050 de cerca de 2,5 milhões de  $\text{m}^3$ , estima-se que a oferta de HVO deverá crescer em aproximadamente 88%, com base na produção atual. Nesta projeção, assumiu-se um

aumento da capacidade já instalada na REPLAN, que as plantas de Piracicaba e São Caetano do Sul manteriam a mesma capacidade e que não seriam construídas novas refinarias dedicadas a HVO. Efetivamente haveria uma conversão de aproximadamente 1,2 milhões de m<sup>3</sup> da capacidade anual das refinarias de diesel fóssil para HVO. Somente as refinarias instaladas em SP correspondem a 42% da capacidade total no Brasil. Logo a conversão ou aumento da capacidade de produção de HVO pode contribuir não somente para a descarbonização do estado, mas também de outros, por meio de uma política nacional.

## GLP Renovável e BioGLP

Assim como o óleo diesel, o gás natural e o hidrogênio, é possível produzir compostos químicos similares ao gás liquefeito de petróleo por meio de fontes de energia renovável (GLPR) e/ou biogênica (BioGLP). Os processos para sua obtenção já são conhecidos pela indústria assim como suas matérias primas, algumas das quais amplamente disponíveis no Estado de São Paulo. Os custos e o domínio tecnológico ainda são as principais barreiras para a produção de larga escala, não apenas no Brasil, mas em todo o mundo. Essa seção apresenta algumas das principais rotas de produção de BioGLP e GLPR, sumarizadas na Tabela 9, assim como estratégias de como o Estado de São Paulo pode se tornar pioneiro na produção e utilização deste combustível.

*Tabela 9 Rotas sugeridas para produção de BioGLP no Estado de São Paulo*

Rota	Matéria Prima
<b>Pirólise lenta</b>	Resíduos do carvão vegetal (bio-óleos)
<b>Desidratação + Hidratação</b>	Glicerina
<b>Gaseificação + Fischer-Tropisch</b>	Biomassa lignocelulósica ou resíduos sólidos urbanos (RSU)
<b>Power-to-X</b>	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> e eletricidade

## Gás natural de origem fóssil

O gás natural (GN) pode ter seu início nos EUA, em 1821. Com o desenvolvimento de gasodutos mais eficientes após a Segunda Guerra Mundial, sua utilização se tornou mais frequente. O gás natural, quando puro, é incolor e inodoro e, ao ser queimado, produz energia. Ele tem impactos ambientais mais moderados quando comparado a outros combustíveis fósseis, em função da sua composição. Em 2021, as reservas globais eram de 199,76 trilhões de metros cúbicos. O gás natural é usado principalmente para aquecimento, geração de eletricidade e nas indústrias

petroquímicas e de fertilizantes. O GN representa por volta de 17% do consumo global de energia (bp, 2023; GECF, 2022; IEA, 2021).

No Brasil, o GN teve sua origem no século XIX, voltado principalmente para iluminação, com empresas com CEG e Comgás. Com o advento da eletricidade, houve um declínio em sua utilização primária. Nos anos subsequentes, houve esforços para diversificar a matriz energética incluindo o gás natural e nos anos a partir de 1990, foram descobertas mais reservas e houve investimento em infraestrutura. A relação com outros países, como a Bolívia, e a construção de gasodutos, como o Gasbol, influenciaram a expansão dos usos finais de GN e sua inserção no mix nacional.

A reestruturação do mercado, com a os estabelecimentos de novas distribuidoras, por meio de contratos de concessão, ampliou substancialmente o consumo e os investimentos na expansão de rede de distribuição entre 1997 até os dias de hoje. Há de se enfatizar a existência de contratos de concessão firmados no Estado de São Paulo, até 2049, com planos de investimentos para ampliação dos usos e distribuição de GN e que podem permitir maior inserção de gases combustíveis renováveis com baixa pegada carbônica.

## Derivados de Petróleo e Alternativas

O petróleo, termo originado do latim cujo significado é “óleo de pedra”, é um produto conhecido pela humanidade desde a antiguidade. Essencialmente, o petróleo é composto por uma mistura de hidrocarbonetos que quando separados podem prover uma diversidade de substâncias com diversas aplicações industriais e energéticas. Segundo dados do balanço energético de energia (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), as reservas provadas de petróleo em 2022 eram de 2,3 bilhões de m<sup>3</sup> (14,9 bilhões de barris) e a produção naquele ano foi de 175, 5 milhões de m<sup>3</sup> (1,1 bilhões de barris).

A questão do refino de petróleo é frequentemente apontada como uma limitação do Brasil, uma vez que sua capacidade de refino é inferior à demanda nacional, sendo necessário a importação de produtos do refino. O Estado de São Paulo é o maior polo de refino de petróleo do Brasil, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2023) o estado processou em 2022, 48,86 milhões de metros cúbicos de petróleo, o que corresponde a 44% de toda a produção nacional. O Estado de São Paulo abriga quatro das onze refinarias que são propriedade da Petrobrás, duas delas fundadas na década de 1950 (Presidente Bernardes e Capuava). A Refinaria de Paulínia, maior do Brasil, correspondendo a cerca de 20% da capacidade nacional, foi fundada em 1972, e a Refinaria Henrique Lage, terceira maior do país, em 1980. Deste modo observa-se que a produção de derivados de petróleo é estratégica, logo é importante considerar formas de descarbonizá-la e reduzir seus impactos ambientais. Além disso, também

estão instaladas no Estado de São Paulo duas refinarias privadas, a Univen Petróleo que se encontra paralisada desde 2012 e a SSOIL Energy que iniciou sua produção em 2022.

Atualmente já existem fontes energéticas capazes de substituir parte do consumo de óleo diesel e gasolina no estado de SP. O consumo de gasolina, que é mais utilizada por veículos leves e comerciais, possui já substitutos importantes como o etanol, o gás natural veicular (GNV) e a eletricidade/hibridização. Com relação ao óleo diesel, utilizado por veículos pesados, como ônibus e caminhões, suas principais alternativas são os líquidos de origem biogênica como o biodiesel de transesterificação e o óleo vegetal hidrotratado (HVO), assim como o gás natural em sua forma comprimida ou liquefeita. Além disso, é importante considerar também alternativas para os setores industrial, comercial e residencial, que dentro do horizonte do PEE/SP 2050, podem vir a ser abastecidos com o BioGLP ou GLP Renovável.

## **Emissões de gases do efeito estufa das refinarias paulistas**

O refino consiste nas etapas do processo que transformam o petróleo cru em produtos acabados, como combustíveis, produtos petroquímicos, óleos lubrificantes, óleos especiais e asfalto. Os principais processos, normalmente estruturados em plantas industriais interligadas dentro de uma refinaria podem ser classificados em três grandes grupos: físicos, químicos e de tratamento (CONCAWE, 1999).

O processo físico do refino do petróleo consiste na separação dos diferentes tipos de hidrocarboneto por meio de faixas de ebulição, conhecidos como processos de destilação. O petróleo é submetido a diferentes temperaturas e pressões que resultam na vaporização dos diferentes hidrocarbonetos e posterior condensação gerando a separação dessas frações. Os processos químicos promovem a alteração da estrutura dos componentes por meio da exposição do petróleo a condições extremas de pressão e temperatura assim como a utilização de catalisadores para aceleração do processo. Por fim, o processo de tratamento tem como objetivo separar do produto final, determinadas impurezas que afetam seu rendimento e valor econômico.

Durante o processo de refino do petróleo pode-se destacar duas principais fontes de emissões de GEE, emissões do processo e emissões fugitivas. As emissões de GEE no processo ocorrem principalmente devido à queima de combustíveis para suprir a energia necessária aos processos de refino. Emissões de dióxido de carbono de caldeiras, fornos de processo, turbinas, tochas e incineradores são as principais emissões de GEE. Por outro lado, emissões fugitivas são liberações não-intencionais de vazamentos de equipamentos e superfícies seladas, bem como de vazamentos de tubulações subterrâneas (Chan, 2006).

Para a quantificação aproximada das emissões de GEE das refinarias paulistas foram adotados os critérios do IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories apresentados por Chan, 2006 e Bittencourt, 2018. Para o cálculo das emissões de GEE adotou-se os valores da Tabela 10, com base nos dados de produção do ano de 2022. A Refinaria da SSOIL foi removida desta análise por apresentar ainda produção muito baixa e por não corresponder à totalidade de 2022.

Tabela 10. Fatores de Emissão das Refinarias

Etapa	Valores (por 1000m <sup>3</sup> de derivado processado)
<b>Emissões dos processos de refino</b>	108 t CO <sub>2eq</sub>
<b>Emissões pela combustão em tocha (flare)</b>	2,78 t CO <sub>2</sub>
<b>Emissões fugitivas</b>	0,06 t CH <sub>4</sub> *

\*Potencial de aquecimento global (GWP) do metano (CH<sub>4</sub>) é de aproximadamente 25, ou seja, cada tonelada de CH<sub>4</sub> é igual a 25 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Deste modo, estimou-se que as emissões aproximadas de gases do efeito estufa pelo parque de refino paulista é na ordem de 5,49 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por ano (Tabela 11). Além disso, nota-se que os processos de refino correspondem a mais de 96% das emissões, ou seja, onde as principais ações de mitigação deve ser focada.

Tabela 11. Estimativa das Emissões das Refinarias do Estado de SP

Refinaria	Produção em 2022 (milhões de m <sup>3</sup> )	Emissões de GEE (em milhões de toneladas de CO <sub>2eq</sub> )			
		Processos	Flare	Fugitivas	Total
Refinaria de Paulínia	22,00	2,38	0,06	0,03	2,47
Refinaria Henrique Lage	13,38	1,45	0,04	0,02	1,50
Refinaria Presidente Bernardes	10,11	1,09	0,03	0,02	1,14
Refinaria de Capuava	3,38	0,37	0,01	0,01	0,38
<b>Total</b>	<b>48,88</b>	<b>5,28</b>	<b>0,14</b>	<b>0,07</b>	<b>5,49</b>

## Estratégias e tecnologias para redução das emissões GEE em refinarias

O aumento de eficiência do parque de refino e a utilização de tecnologias inovadoras são as principais estratégias para reduzir as emissões do setor. Em outras palavras, ao produzir mais derivados com menor consumo de energia e emite-se assim menos CO<sub>2</sub> por metro cúbico produzido. Além disso, a conversão da capacidade de refino para produtos de origem biogênica e a captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> (CCS) também contribuem para mitigação destas emissões.

O turbo-expansor é uma tecnologia que pode ser utilizada para aumentar a eficiência da produção das refinarias. Utilizado para produzir potência elétrica, consiste em uma turbina de fluxo axial ou radial de alta eficiência, que expande o gás de alta pressão advindo da queima parcial do coque ou dos gases de combustão da Unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado (UCCF) (Chan, 2006; Silva, 2013). A energia gerada com a descompressão deste gás pode ser utilizada para acionar o compressor da unidade ou pode ser encaminhada à rede (Costa, 2013).

A Refinaria de Paulínia já conta com um turbo expansor que utiliza gás efluente do regenerador de uma UCCF para geração 14 MW de energia elétrica. Além disso ela também já recebeu novos sistemas de cogeração, utilizando um turbogerador a gás natural e uma caldeira de recuperação de calor para geração de vapor de alta pressão. Esta instalação teve como intuito atender a nova demanda energética das plantas de hidrocarbonetos da gasolina e diesel. Portanto a adoção de turbogeradores e unidades de cogeração é um exemplo que pode ser expandido internamente na própria Refinaria de Paulínia e difundido para outras unidades de refino do Estado de São Paulo.

A produção de derivados que também utilizam biomassa como matéria-prima pode ser considerado sendo considerado uma opção para a descarbonização das refinarias. Este processo foi testado, aprovado e patenteado pela Petrobras, e consiste na produção de óleo diesel a partir do processamento de óleo vegetal em refinarias. O combustível é produzido através de hidrotreatamento (HVO), nele é adicionado até 10% de óleo vegetal ao óleo diesel de petróleo. Tanto o HVO quanto o BioGLP serão discutidos mais adiante.

No entanto, devido ao montante de emissões geradas nos processos das refinarias, O CCS é definitivamente uma das alternativas mais importantes para mitigação de GEE nas refinarias. Atualmente, projetos de CCS utilizam diversos critérios para avaliação da área de interesse (Bachu, 2010). Muitas destas categorias abordam características da bacia sedimentar, como tectônica, estratigrafia, hidrogeologia e geotermia; recursos da bacia e maturidade da indústria; fontes de CO<sub>2</sub>, acessibilidade e infraestrutura, e condições climáticas; fatores econômicos, políticos e sociais (Bachu, 2010). Para injeção de CO<sub>2</sub> em uma bacia sedimentar, a profundidade pode ser de no

mínimo 800m, e a rocha de armazenamento deve se localizar próximo às fontes emissoras, tendo em vista que o custo do transporte pode inviabilizar a atividade.

O Estado de São Paulo possui diversas formações que podem receber este CO<sub>2</sub>, não somente das refinarias, mas também de outras atividades industriais, assim como outros estados brasileiros, tornando-se um hub nacional de CCS. A Bacia de Santos, por exemplo, onde já há atividade exploração de petróleo na atualidade, poderá armazenar CO<sub>2</sub> em campos depletados de óleo e gás. Nesse sentido, a única área nesse estágio atualmente é o campo de Merluza. Segundo Ciotta (2019), a capacidade de armazenamento de CO<sub>2</sub> nesse campo é de aproximadamente 50 Mt.

A Bacia do Paraná apresenta formações salinas profundas com elevado potencial para armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. Nesse tipo de ambiente o CO<sub>2</sub> precisa ser injetado a mais de 800 m abaixo da superfície para ser mantido em estado supercrítico (ou fase densa). Estudos preliminares apontam um potencial de armazenamento de CO<sub>2</sub> apenas em aquíferos salinos na Bacia do Paraná, considerando essas três formações analisadas em aproximadamente 450 Gt (Ketzer et al. 2007).

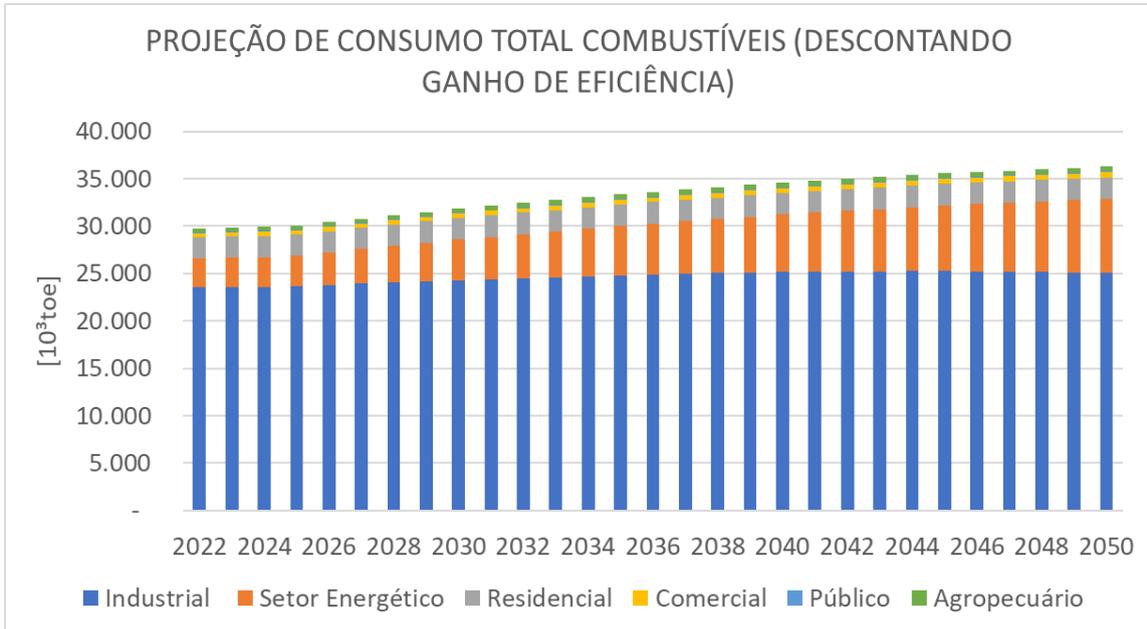
Conclui-se, portanto, que as refinarias localizadas no estado de São Paulo encontram-se em grande vantagem competitiva para a utilização do CCS uma vez que todas elas se encontram em áreas com possibilidade de estocagem em formações geológicas profundas. A utilização da Bacia de Santos como principal hub é uma oportunidade interessante, visto a relativa proximidade com três refinarias paulistas (RECAP, REVAP e RPBC) e a existência de infraestrutura que poderia ser utilizada e/ou adaptada para esse fim.

## **Evolução da demanda térmica agregada no cenário referencial**

Os principais direcionadores do crescimento das demandas térmicas são: os parâmetros macroeconômicos e sociais sinalizados; as políticas de reindustrialização do Estado de São Paulo, com maior participação de equipamentos e sistemas energéticos mais sustentáveis e eficientes; e as demandas por redução de emissões de carbono para a atmosfera nos processos térmicos em todos os setores socioeconômicos

Em 2021, estima-se que as demandas térmicas tenham representado cerca de 55% do consumo total de energia no Estado de São Paulo e tal protagonismo não deve ser alterado ao longo de todo o horizonte de planejamento até 2050. A Figura 107 apresenta a estimativa de evolução da demanda térmica agregada por setor socioeconômico.

Figura 107 - evolução da demanda térmica agregada por setor socioeconômico



A Figura 108 e a Figura 109 apresentam os valores absolutos e a participação na evolução estimada da demanda térmica agregada por tipo de combustível (incluindo eletrificação adicional para usos eletrotérmicos).

Figura 108 - Demanda térmica agregada por tipo de combustível

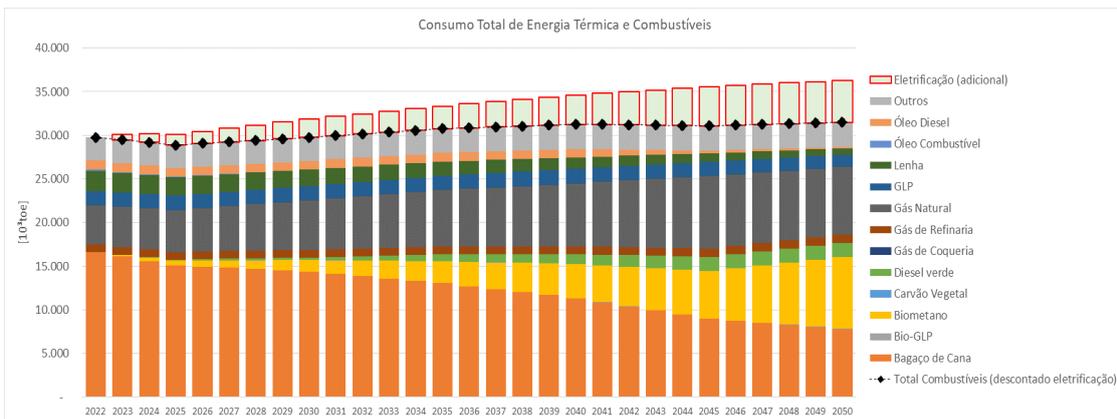
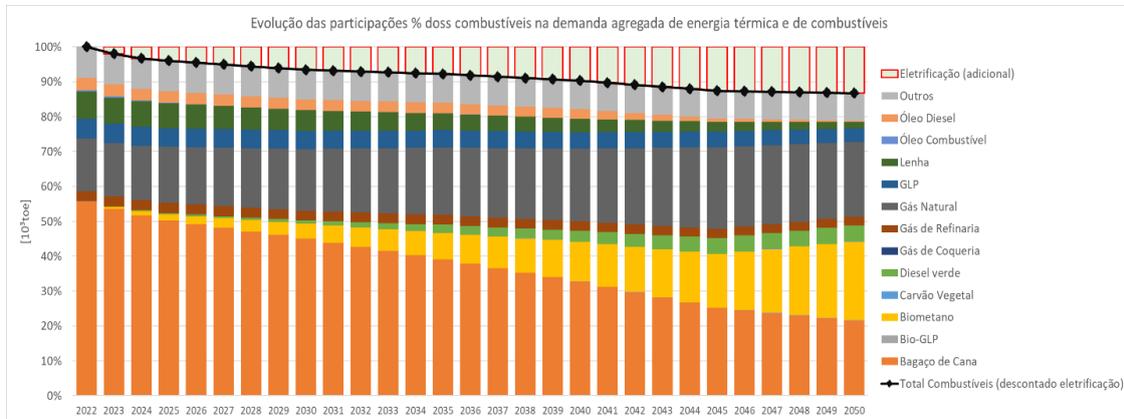
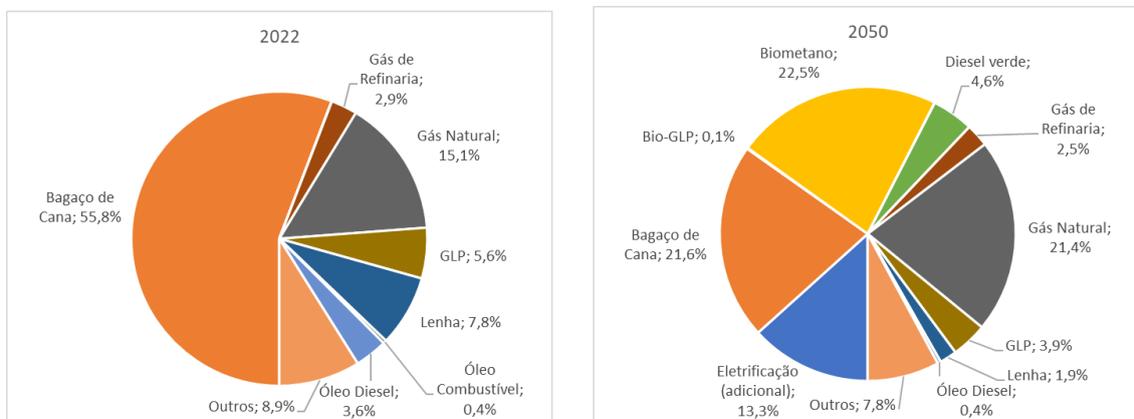


Figura 109 - Participação por combustível na demanda térmica



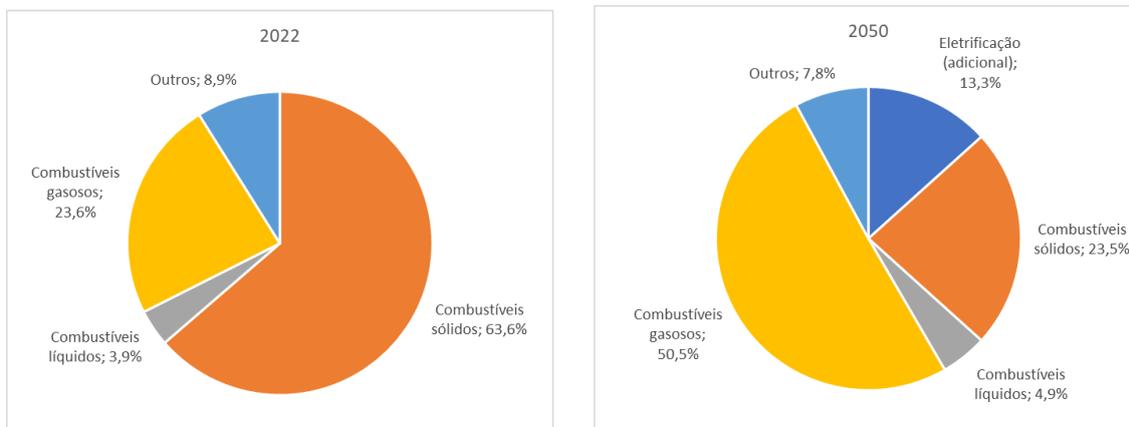
A Figura 110 mostra o importante aumento da diversificação energética para o atendimento da demanda térmica.

Figura 110 - Diversificação energética para o atendimento da demanda térmica



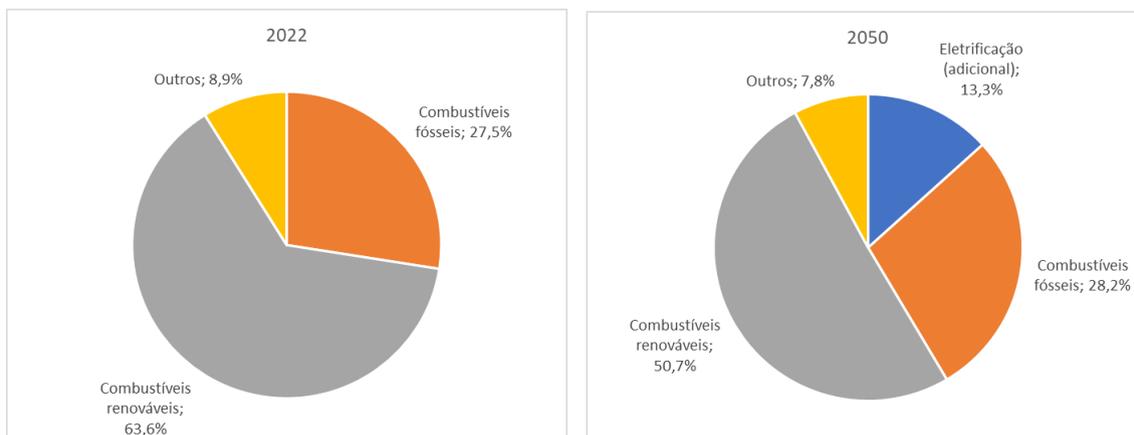
Na Figura 111 observa-se uma redução expressiva da participação de derivados de petróleo fósseis, e de biocombustíveis sólidos (lenha e bagaço de cana) nas utilizações térmicas.

Figura 111 - Redução expressiva da participação de derivados de petróleo fósseis, e de biocombustíveis sólidos



Na Figura 112 projetou-se um avanço substancial da participação dos gases combustíveis, com predominância do gás natural e do GLP até 2035; e avanço posterior robusto de combustíveis gasosos renováveis (principalmente biometano e BioGLP). Crescimento sistemático da eletrificação como solução de descarbonização de processos térmicos (com avanço da eletrotermia).

Figura 112 - Participação dos gases combustíveis



## Contexto dos usos finais no setor industrial

Conforme MME/FDTE (2005) e EPE (2019), cerca de 80% da demanda de energia do setor industrial brasileiro é voltada para o calor de processo e aquecimento direto, ambos os processos térmicos. O calor de processo envolve a transferência indireta de

calor usando um fluido intermediário, como água ou vapor, enquanto o aquecimento direto refere-se à transferência direta de calor (MME/FDTE, 2005) (Costa, 2013). No contexto do calor de processo, não há restrições técnicas para a substituição de fontes fósseis por gás natural, enquanto no aquecimento direto, as limitações dependem do método de transferência de calor e das condições do equipamento (Fernandes, 2008).

(Gallo, 2018) destaca a viabilidade de substituir óleo combustível por GN, enquanto a substituição de eletricidade por gás natural apresenta desafios, principalmente em processos que dependem de radiação em atmosferas inertes. No entanto, substituir GLP por gás natural é viável do ponto de vista econômico e tecnicamente simples, requerendo apenas a conversão dos queimadores.

No setor industrial, existem diferentes perspectivas para a inserção do biogás e do biometano, mas em geral são formas de descarbonizar o uso de gases combustíveis, em especial do gás natural. No caso do biogás, o seu uso é voltado, em especial, para a produção de vapor em cogeração. Espera-se que esse uso de biogás no setor industrial se restrinja às indústrias que sejam também fontes de resíduos para a produção do biogás. Nas demais indústrias, entende-se que a adoção será do biometano. As aplicações do biometano são similares às do gás natural, mas alguns ajustes podem ser necessários para adequar o uso de biometano puro em substituição ao gás natural. Isso decorre da diferença no Índice de Wobbe (Iw) e pode impactar mais significativamente processos que envolvam altas temperaturas.

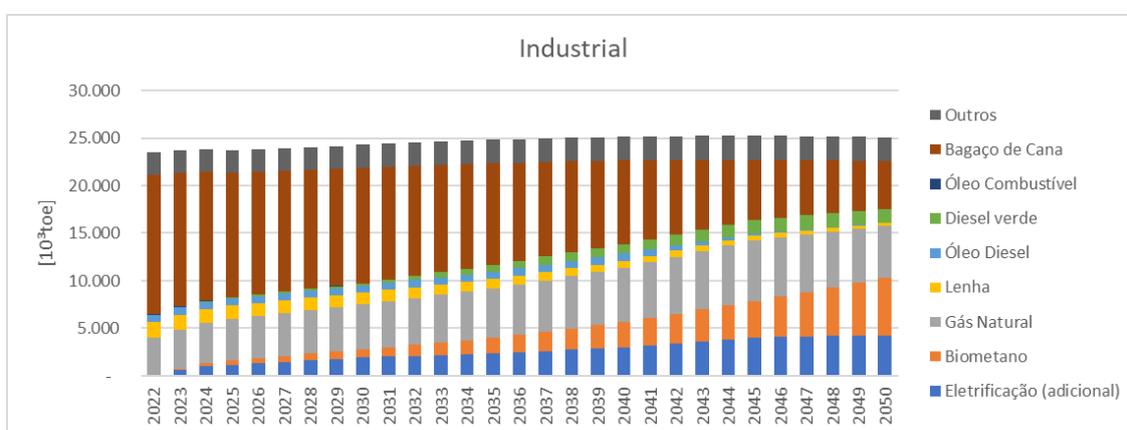
O consumo de derivados e petróleo (GLP, óleo diesel e óleo combustível) representa cerca de 5% do consumo total da indústria. O óleo combustível, caracterizado por ser mais pesado que os outros derivados de petróleo, é usado na indústria para aquecimento e geração de vapor em caldeira. Ainda assim tais funções podem ser substituídas por combustíveis menos poluentes e renováveis, como o gás natural e o biometano. Espera-se que com a disponibilização do diesel verde (HVO – Hydrotreated Vegetable Oil) no mercado seja criada uma oportunidade de descarbonização dos usos de óleo diesel e óleo combustível.

No setor industrial, a magnitude do consumo de GLP e as sinergias de processos e matérias-primas faz com que o setor possa ser um importante facilitador na produção de BioGLP e GLP Renovável. Diversas rotas se cruzam com processos ou matérias-primas relacionado com as indústrias paulistas como, por exemplo, a indústria petroquímica e rota de Fischer-Tropsch, a indústria de produção de biodiesel e o seu rejeito de glicerina, a indústria de madeira e carvão vegetal e os bio-óleos oriundos dos processos de pirólise, entre outras.

## Demanda térmica no setor industrial

Considerando os cenários propostos para eficiência energética, o consumo térmico industrial deve aumentar de 23.515 mil TOEs, em 2022, para 25.094 mil TOEs, em 2050 (Figura 113). Isso representa uma expansão agregada de 6,72% e um crescimento médio anual de 0,23% ao longo do horizonte de planejamento. O consumo térmico industrial atingirá seu pico em 2045, quando totalizará 25.256 mil TOEs. Em seguida, apresentará ligeiros declínios em função do avanço das políticas de eficiência energética.

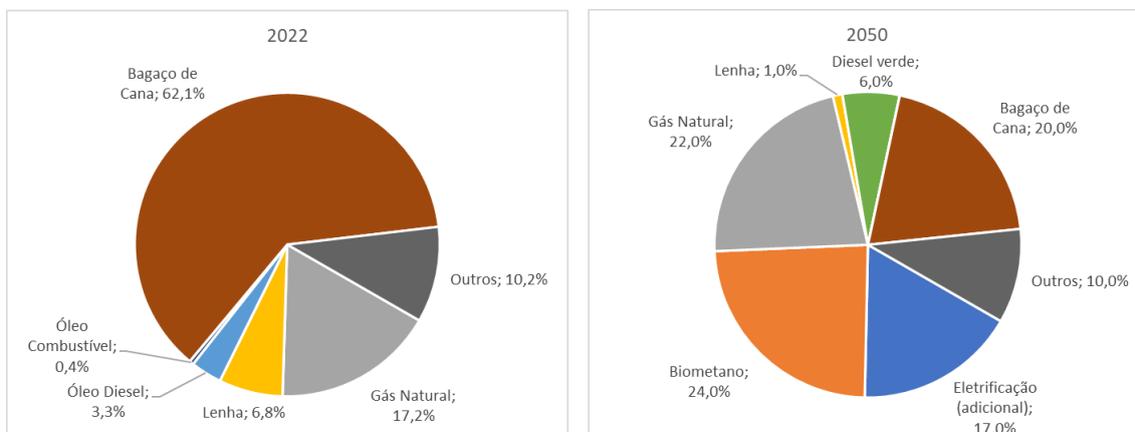
Figura 113 - Consumo térmico industrial



Nos usos industriais, a redução do consumo de derivados de petróleo fósseis, da lenha e do bagaço de cana abrirá espaço para o avanço dos gases combustíveis (principalmente gás natural e biometano) e para o diesel verde (e outros combustíveis líquidos renováveis). Conforme apresentado pela

Figura 114, em 2050, o bagaço de cana terá cedido ao biometano o papel de liderança na matriz térmica industrial paulista (com 24%). O gás natural (22%) e o bagaço de cana (20%) ocuparão o segundo e terceiro postos, sendo seguidos de perto pela eletricidade (17%), que ampliará seu papel nos usos térmicos.

Figura 114 - Consumo de combustíveis para uso térmico na indústria



## Contexto dos usos finais no setor residencial

Os dados sobre a posse de eletrodomésticos são essenciais para avaliar os usos finais de energia no setor residencial. Enquanto eletrodomésticos primários, como fogões e geladeiras, são amplamente prevalentes (90-100%), mesmo em lares de baixa renda, os eletrodomésticos secundários, como freezers, são menos comuns. A (EPE, Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. , 2015) relata que 55% do consumo energético residencial é destinado à cocção, com os usos finais elétricos representando os restantes 45%. Estudos, como os de (Jannuzzi & Schipper, 1991) e (Almeida, Schaeffer, & LA Rovere, 2001) destacam o aquecimento de água como um dos principais consumidores de energia após a cocção.

O GN é principalmente utilizado para cocção, aquecimento de água e climatização em domicílios, com outras aplicações, como lavadoras a gás, sendo raras no Brasil. As principais substituições energéticas são de GLP para GN para cocção e de eletricidade para GN para aquecimento de água, conforme (EPE, 2019) e (Pereira JR, 2018).

Esta última substituição visa ampliar a eficiência energética de gases combustíveis para geração de calor e ampliar o conforto térmico. No setor residencial, a inserção do biometano é esperada como uma forma de descarbonizar o uso de gases combustíveis, em especial do gás natural. Os usos são os mesmos do gás natural e, de fato, a principal expectativa de inserção é através do uso do gás advindo da rede de distribuição onde tenha havido injeção do biometano.

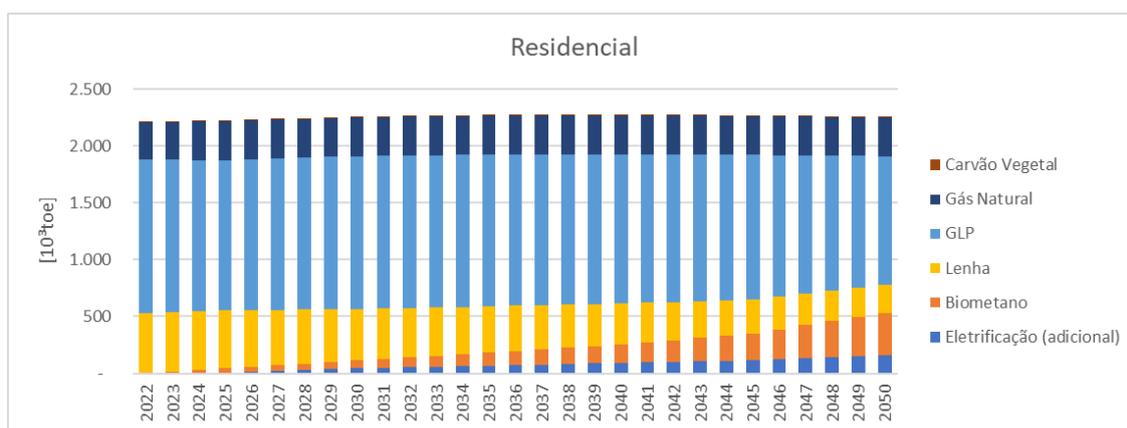
No Estado de São Paulo, o gás liquefeito de petróleo (GLP) é o principal derivado de petróleo consumido no setor residencial, com uma participação de 23% em todo o Estado e caracteriza-se como um combustível importante para promoção de acesso à energia limpa e segura dentro do setor residencial quando considerado que é um importante substituto da lenha, uma vez que sua combustão é mais limpa e reduz a exposição dos habitantes de um domicílio à fuligem e outros poluentes emitidos pela queima da lenha. A utilização do GLP obtido por meio de fontes renováveis ou biogênicas, cuja possibilidade de oferta no Estado de São Paulo será discutida adiante, pode constituir uma importante estratégia para descarbonização do setor residencial.

### Demanda térmica no setor residencial

Em função dos ganhos de eficiência energética e da baixa dinâmica populacional esperada para o Estado ao longo do horizonte de planejamento, o consumo térmico residencial deve se expandir apenas 2% ao longo do período de planejamento, passando de 2.210 mil TOEs, em 2022, para 2.254 mil TOEs, em 2050 (

Figura 115). Com o avanço das redes de distribuição de gás canalizado, o gás natural e o biometano apresentam demandas crescentes no setor residencial e passam a ocupar 31% da demanda térmica residencial.

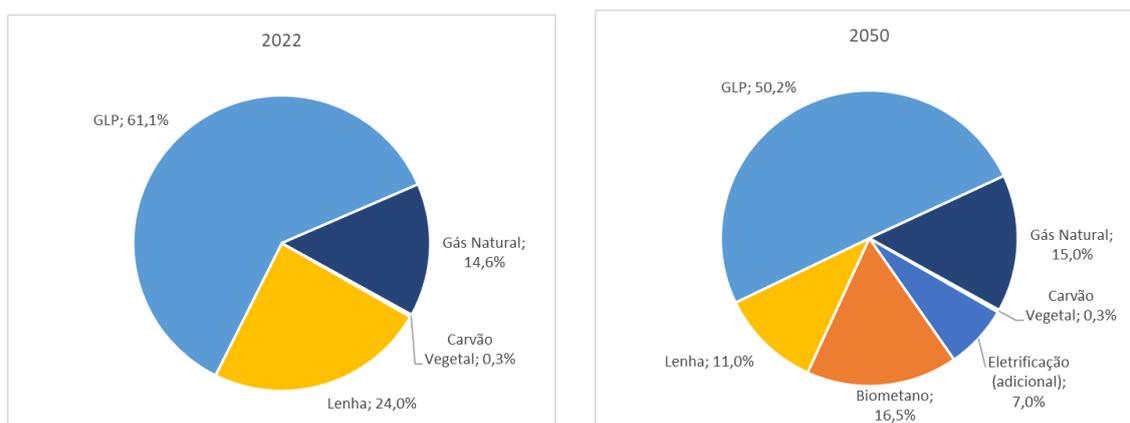
Figura 115 - Consumo térmico residencial



A eletrotermia também se expande como solução para a descarbonização do consumo térmico de importantes nichos do mercado residencial, ganhando 7% de participação de mercado até 2050. O GLP e a lenha perdem respectivamente cerca de 11% e 13% de suas participações de mercado (

Figura 116). Observe-se que essa queda se torna mais acentuada a partir de 2035 com o avanço mais expressivo do consumo de biometano, principalmente com sua injeção nas redes de distribuição de gás canalizado.

Figura 116 - Participação dos energéticos no consumo térmico residencial



## Contexto dos usos finais nos setores comercial e público

As atividades principais do setor comercial e público no Brasil englobam áreas como hoteleiro, bancário, hospitalar, ensino, bares, restaurantes e shopping centers. Segundo a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo (ELETROBRAS, 2008), há dois principais grupos de usos finais de energia: o primeiro, com setores bancário, de ensino e shoppings, destaca-se pelo uso de climatização, enquanto o segundo, incluindo setores hoteleiro, hospitalar, bares, restaurantes e supermercados, tem demanda por aquecimento e refrigeração não ligados à climatização. O GN é utilizado em atividades comerciais como cocção, aquecimento de água, refrigeração e geração de eletricidade, com potencial de substituição do GLP por GN em cocção e eletricidade por GN em aquecimento de água. Apesar do potencial, o óleo combustível, substituível pelo GN, tem uma participação limitada no setor, representando apenas 3,7%. No setor comercial, a inserção do biometano é esperada como uma forma de descarbonizar o uso de gases combustíveis, em especial do gás natural. Os usos são os mesmos do gás natural e, de fato, uma das possibilidades de inserção é através do uso do gás advindo da rede de distribuição onde tenha havido injeção do biometano. Em alguns casos, dada a maior sensibilidade às políticas de descarbonização, organizações podem optar por fornecimento dedicado de biometano, o que justifica maior inserção do biometano no setor comercial comparativamente ao setor residencial.

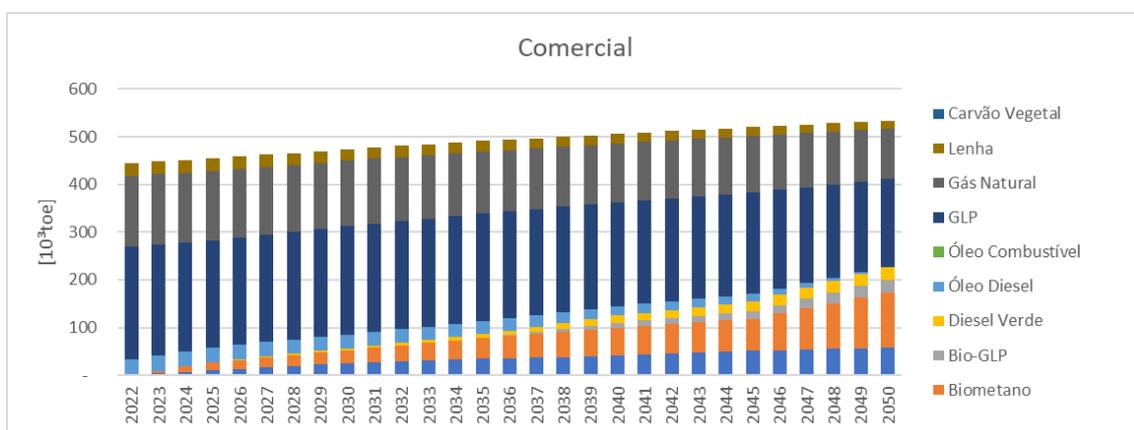
No setor comercial e público, os derivados de petróleo corresponderam a apenas 8,6% (461 toe) do consumo dos setores comercial e público em 2021. Os principais usos finais destes setores para os derivados de petróleo no setor comercial e público envolvem aquecimento de água, cocção de alimentos e refrigeração. Os principais substitutos para estes combustíveis são o gás natural ou biometano para processos de aquecimento e resfriamento, além da eletrificação de alguns usos. Espera-se que com a disponibilização do diesel verde (HVO – Hydrotreated Vegetable Oil) no mercado seja criada uma oportunidade de descarbonização dos usos de óleo diesel e óleo combustível. O GLP também pode ser substituído por GLP Renovável ou BioGLP, no entanto, ainda não existe oferta suficiente destes recursos energéticos no Brasil. Algumas rotas para produção de GLP Renovável e BioGLP são apresentadas mais adiante na seção de oferta. A utilização de GLP Renovável e BioGLP tem o potencial de contribuir para que os setores comercial e público atinjam a neutralidade de carbono por meio da substituição do GLP de origem fóssil. Estes setores podem adotar, portanto políticas ou estratégias próprias que visem a difusão desses combustíveis.

### Demanda térmica no setor comercial

O Consumo térmico no setor comercial deverá aumentar 19,8%, passando de 433 mil TOEs, em 2022, para 533 mil TOEs, em 2050, ou seja, um crescimento anual médio de 0,65% ao longo do horizonte de planejamento (

Figura 117). A dominância dos gases combustíveis nos usos térmicos do setor permanecerá inabalável, porém espera-se uma importante diversificação de fontes com o avanço de combustíveis mais sustentáveis.

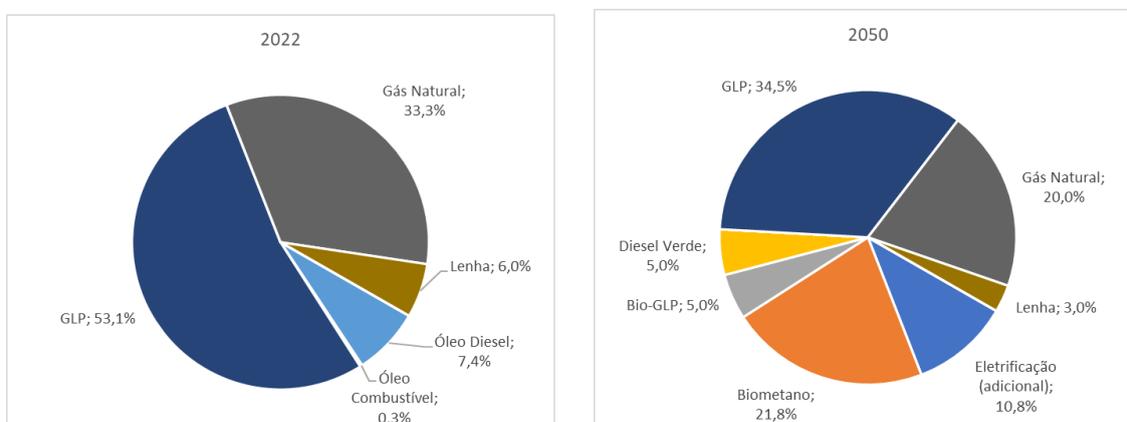
Figura 117 - Consumo térmico no setor comercial



Em 2022, o GLP e o gás natural representaram 86,6% da matriz térmica setorial. Em 2050, os gases combustíveis ainda participarão com 81,3% da matriz, contudo, 26,8% da demanda já será atendida por gases renováveis: biometano (21,8%) e BioGLP (5%) (

Figura 118). A lenha verá sua participação de mercado ser reduzida pela metade, de 6% a 3%. Os combustíveis fósseis líquidos deixarão de ser utilizados nas demandas térmicas setoriais, sendo parcialmente compensados por uma maior disponibilidade de diesel renovável (ou diesel verde). No setor comercial paulista, a eletrotermia também ganhará mais espaço e a eletrificação deverá representar cerca de 11% da demanda térmica setorial em 2050.

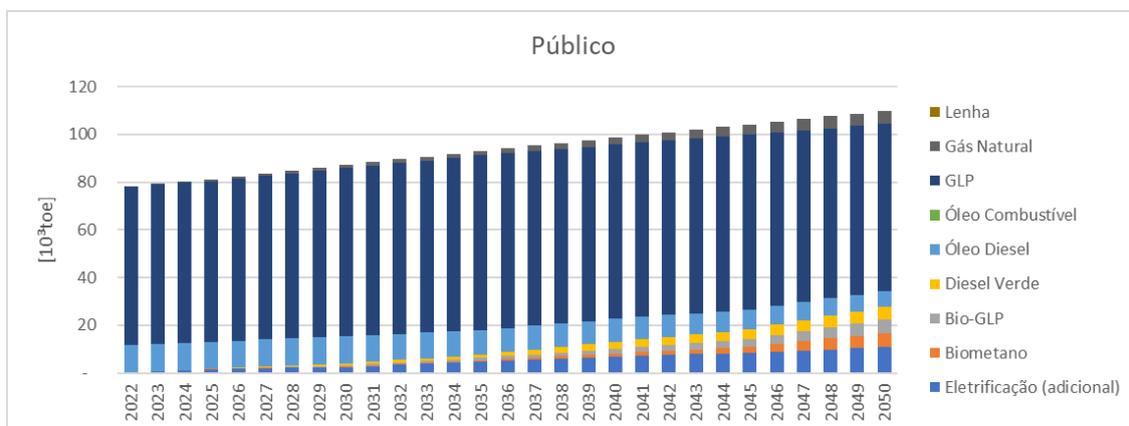
Figura 118 - Participação dos combustíveis no setor comercial



## Demanda térmica no setor público

Apesar de ser um setor de baixo consumo térmico, o setor público é aquele que deverá apresentar a maior expansão ao longo do horizonte de planejamento, passando de 78 mil TOEs, em 2022, para 110 mil TOEs, em 2050, isto é, um crescimento de 40,2% (crescimento anual médio de 1,21%) no período (Figura 119). Em 2022, o setor dependia 100% de combustíveis fósseis (85% do GLP; e 15% do óleo diesel). Até 2050, inclusive por indução de políticas públicas que procurarão incentivar a descarbonização e a diversificação energética setorial, o diesel e o GLP perderão 30% dessa participação de mercado.

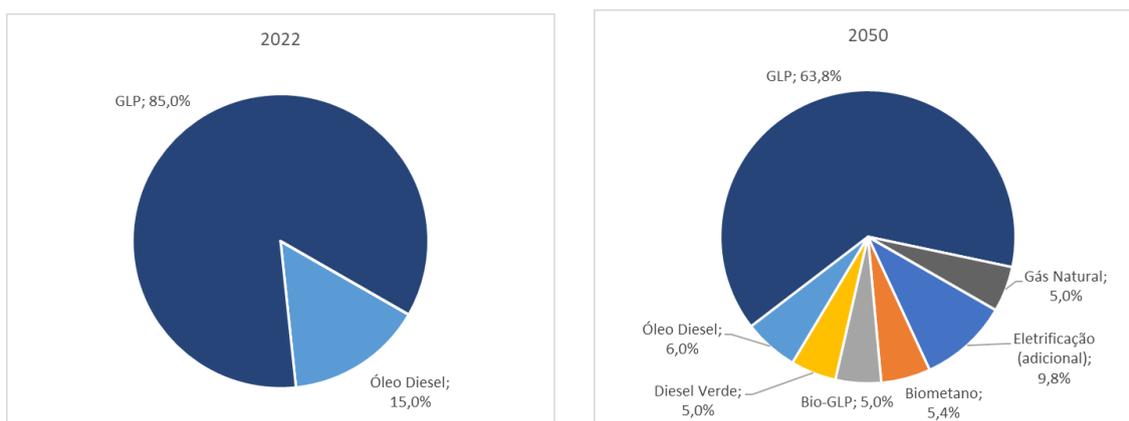
Figura 119 - Consumo térmico no setor público



A eletrotermia avançará no setor e a eletrificação dos processos térmicos ganhará 9,8% de participação de mercado. Combustíveis mais sustentáveis também ocuparão papéis crescente na matriz térmica setorial. Em 2050, biometano (5,4%), gás natural (5%), BioGLP (5%) e diesel verde (5%) terão construído participações relevantes na matriz térmica setorial, inclusive antecipando soluções que poderão ser difundidas para outros setores posteriormente (

Figura 120).

Figura 120 - Evolução na matriz térmica do setor público



## Contexto dos usos finais no setor energético

O principal tipo de uso final dentro do setor energético é a produção de vapor, que pode ser utilizado como calor de processo ou para geração local de eletricidade.

Dentro dos processos térmicos, também há casos de utilização em aplicações de aquecimento direto, que por especificidades de temperatura e radiação de chama, podem requerer ajustes na troca do energético em uso.

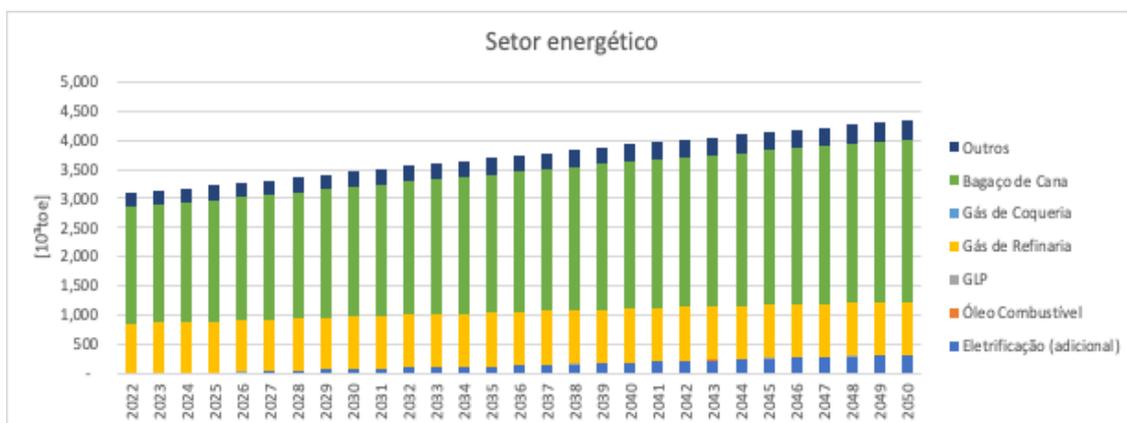
O setor energético inclui os centros de transformação como refinarias e destilarias. No caso das refinarias, os principais energéticos são o gás de coqueria e o gás de refinaria. Dada a integração energética das refinarias, dificilmente esses energéticos serão deslocados, ainda que alguma eletrificação possa ser observada, sendo que a estratégia de descarbonização mais provável esteja vinculada a adoção de tecnologias de CCS, como discutido no começo deste capítulo.

Espera-se uma expansão das destilarias, sejam autônomas ou anexas, para acompanhar a demanda de etanol em especial para o setor de transporte. O principal energético dessas unidades é o bagaço de cana, que produz calor de processo e bioenergia. A indústria sucroalcooleira onde se inserem essas destilarias é um caso especial, pois possui elevado potencial de produção de biogás e biometano e existem múltiplas possibilidade de integração desses gases renováveis. Ressalta-se ainda que a introdução do etanol de segunda geração a partir do bagaço de cana irá aumentar a disponibilidade de vinhaça, que sugere maior potencial de produção de biogás e biometano. Por fim, existem múltiplas aplicações na própria indústria, como uso de biometano nas máquinas e caminhões como combustível e a geração de bioeletricidade com biogás.

## Demanda térmica no setor energético

O setor energético deve apresentar uma relevante expansão na demanda térmica ao longo do horizonte de planejamento, passando de 3,1 mil TOEs, em 2022, para 4,3 mil TOEs, em 2050, isto é, um crescimento de 40,8% (crescimento anual médio de 1,23%) no período (Figura 121).

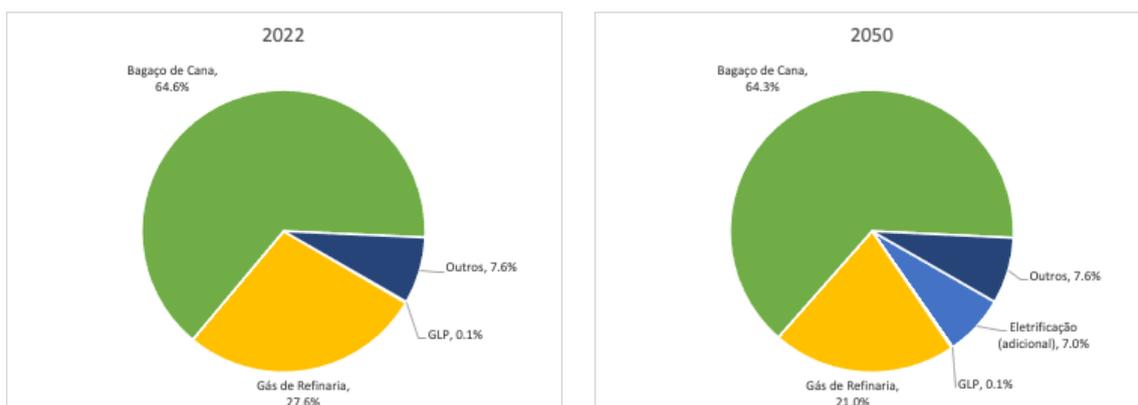
Figura 121 - Demanda térmica no setor energético



Em 2022, as principais fontes para o setor eram o bagaço de cana com 65% e o gás de refinaria com 28%. Em 2050, devido à estrutura do próprio setor e seus centros de transformação, essa participação deve se manter similar, com o bagaço de cana respondendo por 65% e o gás de refinaria por 21%. A eletrotermia avançará no setor e a eletrificação dos processos térmicos ganhará 7% de participação de mercado (

Figura 122). A demanda por combustíveis mais sustentáveis, em particular o etanol, desempenha um papel na matriz térmica setorial. O crescimento da produção de etanol, no horizonte de 2050, implica em um crescimento no uso de bagaço de cana no setor energético.

Figura 122 - Evolução na matriz de consumo térmico para o consumo energético



## Oferta de energia térmica e combustíveis

### Direcionadores da oferta

#### Oferta Nacional

No Estado de São Paulo foram identificados os seguintes principais direcionadores de oferta nacionais e internacionais. Nacionalmente, tem-se a importância das bacias sedimentares de Campos e Santos, Pré-Sal, para as ofertas de combustíveis fósseis (petróleo e gás natural). Além disso observa-se também a bacia sedimentar terrestre do Paraná poderá eventualmente desvendar potenciais recursos comerciais de gases não convencionais. Contudo, tais recursos não são contabilizados nos cenários de oferta previstos até 2050.

Os dados demonstram que as refinarias existentes suprem as demandas paulistas por derivados de petróleo e vendem os excedentes para outros estados enquanto se espera uma modernização do parque de refino paulista acelera a produção de combustíveis líquidos verdes. Além disso, vislumbra-se a oportunidade de integração da indústria de refino paulista a sistemas de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> (materialização de oportunidades em CCS e BECCS) permite a descarbonização gradual da indústria do refino.

Enfatiza-se também o potencial de conexão dutoviária e através de outros modais de movimentação de gases entre o setor sucroenergético e os centros de carga consumidores de gases combustíveis.

Por fim, espera-se que a produção de biogás e biometano amplie-se com o avanço da economia circular no setor sucroenergético paulista.

## Oferta Importada

Com relação às ofertas importadas, a Bolívia permanece a supridora de gás natural para os mercados paulistas, via gasoduto internacional Gasbol. Para a última década do horizonte de planejamento, 2040/2050, as incertezas aumentam em relação à capacidade exportadora da Bolívia.

O desenvolvimento das reservas de gás não convencional na formação de Vaca Muerta gera um potencial exportador de GN para a Argentina que pode aproximar-se a 2 trilhões de pés cúbicos (TCF) anualmente. No horizonte da década de 2040/2050, exportações crescentes da Argentina podem substituir aquelas declinantes da Bolívia, desde que investimentos da ordem de 40 a 50 bilhões de US\$ sejam realizados em sistemas logísticos de movimentação e exportação de gás naquele país.

A importação de GNL via Terminal de Regaseificação de Santos entra em operação no final de 2023, para atender a um primeiro contrato de suprimento para a Comgas de 3 milhões de m<sup>3</sup>/dia. O terminal de regaseificação de capacidade de suprimento de até 14 milhões de m<sup>3</sup>/dia, devendo contribuir para a segurança de suprimento do mercado paulista ao longo de todo o horizonte de planejamento.

Marginalmente, São Paulo permanece exportador líquido de derivados de petróleo fósseis, e com importações atendendo demandas específicas e pontuais não supridas pelas refinarias locais.

## Direcionadores referentes à transição energética paulista

No contexto da transição energética paulista, os gases combustíveis têm papel crescente. A garantia de oferta é essencial para que o gás natural e o GLP atuem tanto como substitutos de fontes mais poluidoras e com piores pegadas em emissões de carbono (carvão, e derivados líquidos de petróleo), quanto como complemento para formas renováveis de energia, garantindo a segurança energética, fornecimento constante e estável.

Gases combustíveis de origem renovável (biogás, biometano, bioGLP e H<sub>2</sub> de baixo carbono) são vetores essenciais para a descarbonização energética paulista. A materialização de sua oferta, inclusive em substituição aos gases combustíveis de origem fóssil, depende prioritariamente de investimentos e avanços nos sistemas de produção e logística (movimentação) desses gases, garantindo um acesso ampliado aos consumidores paulistas.

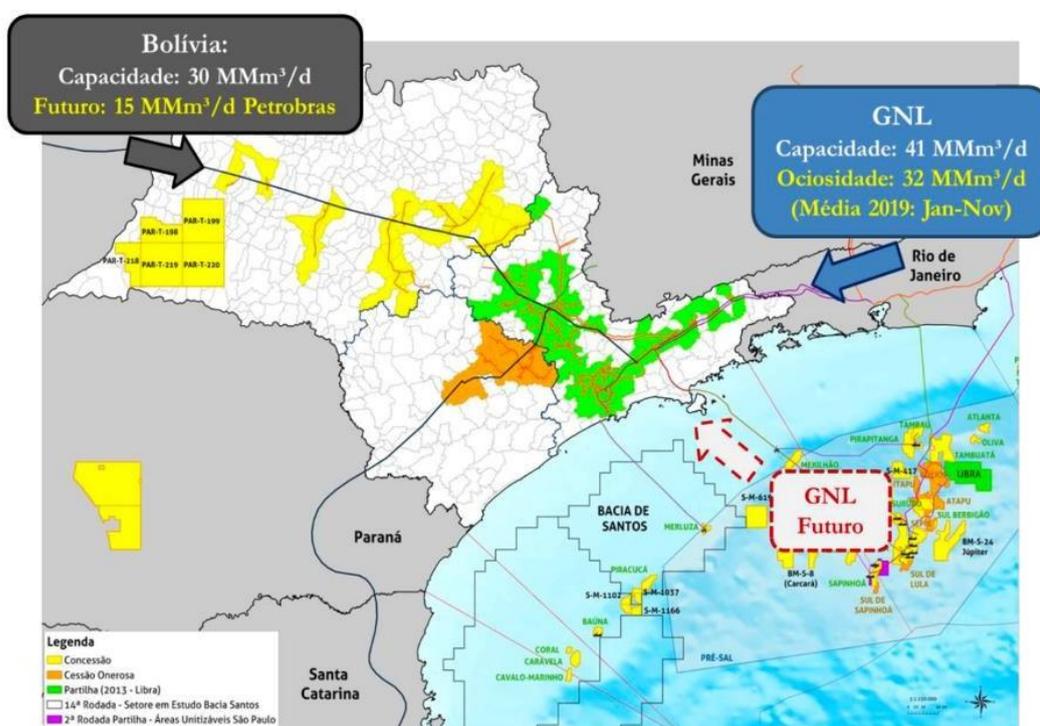
Os combustíveis derivados de petróleo fósseis ainda são essenciais naquelas realidades onde os usos finais de gases combustíveis e a eletrificação encontram dificuldades de penetração, incluindo os sistemas de transporte.

Derivados de petróleo fósseis serão gradualmente substituídos e excluídos do mix energético paulista até 2050, sendo substituídos por fontes energéticas mais sustentáveis. Incluem-se, então, os combustíveis líquidos renováveis cuja oferta depende do avanço de biorrefinarias. Combustíveis líquidos renováveis serão crescentemente produzidos e ofertados pelas próprias refinarias de petróleo e/ou por biorrefinarias dedicadas.

## Mapeamento da oferta Doméstica de Combustíveis

A Figura 123 situa o Estado de São Paulo, e seus principais centros de consumo, como o principal hub de gás natural do país, o qual é servido por diversas rotas que permitem amplas e diversificadas ofertas domésticas e importadas de gás natural (através de rotas dutoviárias e terminais de importação de GNL).

Figura 123 - Mapeamento da oferta paulista de combustíveis



A Figura 123 também mostra as áreas de exploração e produção de petróleo e GN, situadas próximas dos centros de carga paulistas. Offshore, destaca-se o papel central das bacias sedimentares de Santos e Campos (pré-sal). Onshore, destaca-se a porção da bacia sedimentar terrestre do Paraná situada em território paulista.

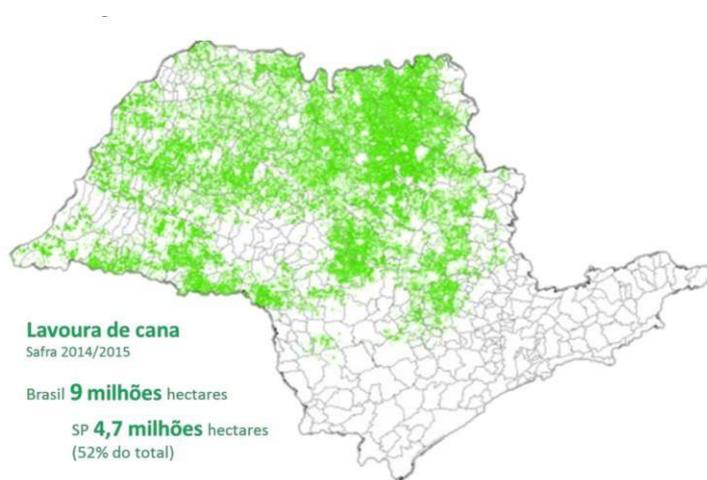
O Estado de São Paulo é segundo maior produtor e detentor de reservas provadas de GN no Brasil, observando-se a sua contribuição na produção nacional de GN aumentar de 7,71% para 12,41%. A infraestrutura de escoamento permite acesso à 75% das reservas provadas nacionais contidas nas bacias sedimentares de Santos e Campos. Além de acesso às fontes de oferta nacionais, a infraestrutura de movimentação de GN permite também acesso às fontes importadas oriundas do Gasbol e dos terminais de importação de GNL. Em adição o Estado contempla a maior malha de distribuição de GN do país e também a maior base de consumidores. Neste contexto, os investimentos em ampliação da malha de distribuição e dos usos finais deste energético, em linha, com as diretrizes deste plano, são compatíveis com os contratos de concessão vigente, ou seja, até 2049, e apresentam importante oportunidade de serem vetores da descarbonização do Estado por meio do acesso à oferta de gases combustíveis renováveis nos diversos usos finais. Permitindo-se assim, uma transição para fontes de gases combustíveis de baixa pegada carbônica sem diminuir a

segurança energética, que é característica da infraestrutura vigente da indústria de GN no Estado.

A

Figura 124 mapeia as zonas canaveiras do Estado de São Paulo, que concentram quase 50% do setor sucroalcooleiros nacional. Essas áreas esverdeadas são potenciais candidatas à produção e suprimento de biogás e biometano para os mercados paulistas.

Figura 124 - Zonas canaveiras do Estado de São Paulo



Outros bioenergéticos disponíveis regionalmente também representam oportunidade de expansão da oferta de biometano no estado, tais como lodo de ETE, dejetos, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e dejetos animal. A busca por sinergias possíveis entre gás natural e biometano, seja através de compartilhamento de infraestrutura, desenvolvimento tecnológico e inovação poderá favorecer a expansão da cadeia de biometano, conforme apresentado no item 0 Bioeletricidade, deste trabalho.

## Detalhamento da oferta Doméstica de Combustíveis

Entre 2005 e 2018, as reservas provadas de gás natural de São Paulo cresceram 616%, posicionando o estado como o segundo maior em expansão de produção e reservas de 2012 a 2021, atrás apenas do Rio; apesar do decréscimo no índice R/P de 47,3 para 5,8 anos, a reinjeção do gás no estado aumentou de 9% para 38%, com redução da queima em *flare* de 5% para 1%.

O Estado é o centro de carga da malha de transporte de GN, com acesso direto a 75% das reservas provadas nacionais, nas bacias de Santos e Campos, acesso ao GASBOL e aos terminais de importação de GNL. A capacidade máxima de movimentação de GN no Estado é de 55 M m<sup>3</sup>/dia e com a instalação do terminal de regasificação e o gasoduto Cubatão – GASAN esta capacidade será aumentada em aproximadamente 27%.

A oferta de GN no estado combina fontes domésticas, importações via GASBOL e terminais de GNL, além de uma visão futura de inserir biometano no mix, evidenciando a diversidade e potencial de autonomia energética.

A oferta de biometano se insere no contexto da economia circular, onde resíduos podem ser aproveitados como ponto de partida para a sua produção. No Estado de São Paulo essa sinergia é ainda mais evidente considerando as diferentes opções de produção de biometano a partir dos resíduos do setor sucroenergético.

O estado de São Paulo possui atualmente cinco refinarias para derivados de petróleo, sendo que quatro delas estão em operação. Conforme a Tabela 12 mostra, em 2022, a produção total óleo diesel no estado de SP foi de quase 21 milhões de metros cúbico (m<sup>3</sup>), o que corresponde a mais do que o dobro da demanda do Estado em 2022 (10,1 milhões de m<sup>3</sup>).

Tabela 12 -Produção total óleo diesel no Estado de São Paulo

Refinarias SP	Sigla	Capacidade instalada (2023) em mil m <sup>3</sup> /dia	Produção 2022 (m <sup>3</sup> )	
			Óleo Diesel	GLP
<b>Paulínia</b>	REPLAN	69.000	10.061.382	1.605.658
<b>Presidente Bernardes</b>	RPBC	27.000	4.991.379	644.526
<b>Capuava</b>	RECAP	10.000	1.585.257	284.827
<b>Henrique Lage</b>	REVAP	40.000	4.178.819	790.995
<b>Univen</b>	UNIVEN	1.456	0	0
<b>Total</b>		147.456	20.816.837	3.326.006

Fonte: Governo de SP (2023)

Deste modo, pode-se observar que a capacidade de produção de óleo diesel do estado de SP é consideravelmente maior que o consumo atual e as projeções de demanda futuras (que são decrescentes). Isso significa que:

- o Mesmo que o estado de SP atinja o Net-Zero no consumo energético, ainda será possível manter sua produção de derivados para exportação para outros Estados;

- o Em caso de decréscimo do consumo de óleo diesel (pela substituição por biodiesel ou HVO), a capacidade de produção de diesel pode ser convertida para produção de outros derivados, como gasolina ou GLP, uma vez que estes combustíveis ainda terão alguma participação no setor de transportes e residencial, respectivamente.

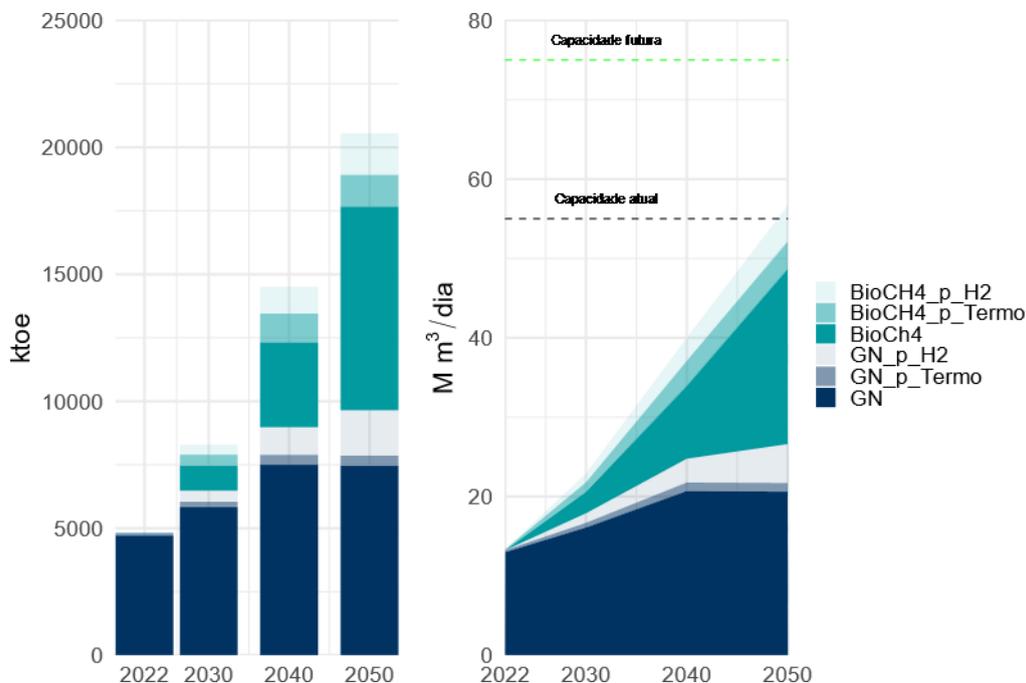
O GLP é um combustível importante para a promoção de acesso à energia limpa e segura dentro do setor residencial. O aumento do preço do botijão nos últimos anos causou uma redução do consumo pela população mais pobre, que passou a consumir produtos mais poluentes ou perigosos, como lenha e etanol para cocção. Por mais que o GLP tenha uma origem fóssil, o aumento da sua disponibilidade e acessibilidade cumpre uma função social e de saúde pública importante.

As projeções realizadas preveem um crescimento da participação do gás natural no mix de 9.45% para 16.1% em 2050, incluindo-se aquele para a produção de H<sub>2</sub>, crescimento anual de 1,9%. O biometano integrará o mix de oferta de GN atingindo a participação de 16.9% em 2050. Estima-se também o crescimento de combustíveis renováveis (etanol hidratado, diesel verde (HVO), BioGLP e H<sub>2</sub> verde) de 10,4% até 18.3% em 2050, com crescimento anual de 2%, assim como a eletrificação adicional nos setores da economia atinge 8,44% do mix em 2050, quanto há uma redução da participação de derivados de petróleo (-2.1%a.a.), biomassa (-3,1% a.a.) e lenha (-5,4%a.a.)

Conforme indicado na

Figura 125, o mix permanece basicamente com a mesma composição ao se considerar a geração de eletricidade. O maior acréscimo ocorre na participação da geração de eletricidade por meio de biomassa (acrécimo de 3.5% no mix em 2050) e o maior decréscimo ocorre na participação de derivados (decrécimo de -1.5% no mix em 2050). O gás natural tem sua participação reduzida em -0.3% e BioCH<sub>4</sub> aumentada em 1%, ambos no mix em 2050.

Figura 125 - Evolução no mix de Biogás e de Gás natural



A oferta de gás natural para os setores da economia excluindo-se a geração de termelétrica é de 25.5 Mm<sup>3</sup>/dia em 2050 (CAGR 2.4% a.a.), incluindo-se a geração de termoeletricidade a oferta atinge 26.6 M m<sup>3</sup>/dia em 2050 (CAGR 2.5% a.a.). A capacidade de movimentação de gás natural existente é 2 vezes maior que a oferta para as CDLs em 2050 e 2.8 vezes maior ao se considerar o TRSP e o gasoduto Cubatão-SBC.

Ao considerar-se que a totalidade da projeção de biometano será movimentada utilizando-se a malha de transporte, o valor em 2050 é próximo ao da capacidade atual e inferior à capacidade futura. A acomodação da geração termelétrica é geograficamente específica, mas é compatível com a capacidade de movimentação de gás natural existente. Assim como a oferta de biometano não necessariamente será incluída na malha de transporte por conta de sua localização geográfica.

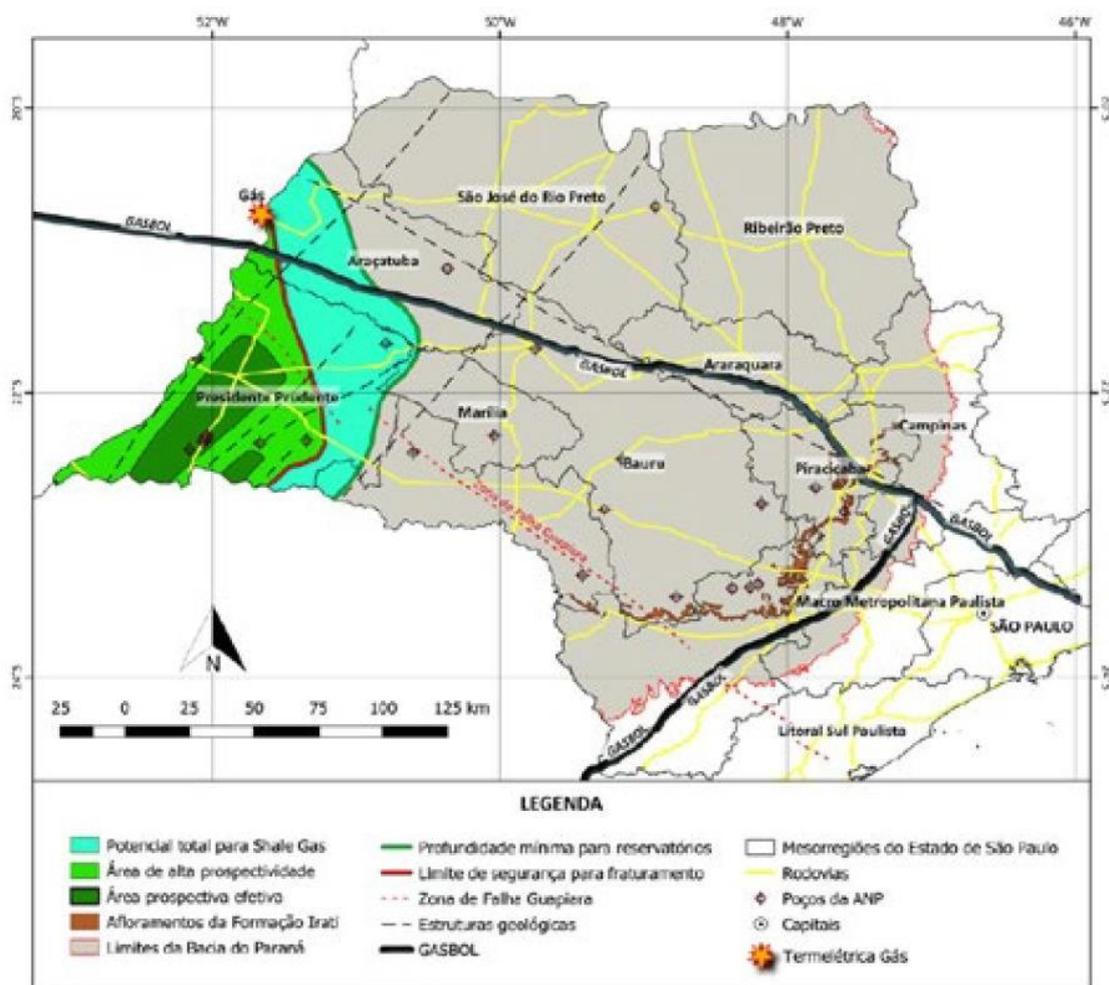
## Gases combustíveis não convencionais de origem doméstica e importada

A oferta adicional de gás natural fóssil não convencional doméstico passa pelo desdobramento da instalação de infraestrutura de poços e avanços regulatórios que permitam o fraturamento hidráulico nas formações geológicas alvo. No âmbito da oferta importada, os campos de Vaca Muerta, na Argentina, já produzem óleo e gás natural não convencionais, para atendimento de mercados domésticos e externos.

A pesquisa e exploração de recursos fósseis não convencionais em São Paulo não é nova. Iniciou-se no final da década de 1970 e ao longo dos anos 1980, com a perfuração de poços executados pelo Consórcio CESP-IPT (Paulipetro). Esses poços estão situados principalmente na porção centro-oeste de São Paulo, sobre camadas de folhelhos devonianos com matéria orgânica (folhelhos de interesse), conforme ilustrado na Figura 126, que destaca a parcela da Bacia Sedimentar do Paraná localizada no extremo oeste paulista e que se apresenta como a mais prolífica para eventuais descobertas de gases não convencionais no Estado de São Paulo. No entanto, há de se enfatizar as escassas atividades de exploração e de pesquisa de campo, que foram suspensas em função de inúmeras restrições socioambientais.

Na Figura 126 apresentam-se as áreas potenciais para gás natural não convencional a serem prospectadas no Estado de São Paulo, destacando-se as trajetórias do Gasoduto Brasil-Bolívia (GASBOL)

Figura 126 - Mapa de prospecção para Shalegas em São Paulo



Fonte: TASSINARI, C. C. G. et al (2021). Capítulo 3 – Item 3.4 - Potencial de exploração de não-convencionais – São Paulo. Em: MME – FGV – Rede GASBRAS (2021). O desenvolvimento da exploração de recursos não-convencionais no Brasil: Novas óticas de desenvolvimento regional. Cadernos FGV Energia, Fev 2021, Ano 8, Num. 12 (ISSN: 2358-5277).

O Estado de São Paulo pode ser pioneiro na exploração e produção de gases não convencionais, como o gás de folhelho (popularmente chamado de gás de xisto ou *shale gas*). Tassinari et al (2021) estimam que a formação Irati (Bacia do Paraná), que se distribui pelos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná, possui um potencial próximo de 26 TCF ou 736 bilhões de m<sup>3</sup>, o que equivale a mais do que dobrar as reservas nacionais conhecidas de gás natural (próximas de 450 bilhões de m<sup>3</sup> em 2020). Esse potencial não está computado entre as oportunidades de oferta de gás natural discriminadas neste PEE/SP 2050 e que se apresentam para o Estado de São Paulo ao longo do horizonte de planejamento até 2050.

Contudo, entende-se que futuras versões do PEE/SP 2050 possam gradualmente discriminar e revelar essas oportunidades. O avanço e materialização da exploração desses recursos pode causar importantes transformações na sociedade paulista, principalmente na região sudoeste, com a criação de novos postos de emprego, mercados e desenvolvimento de tecnologias. Esse potencial pode ampliar-se na perspectiva de desenvolvimentos de atividades conjuntas de produção de gases não convencionais e iniciativas de CCS e BECCS. As atividades vinculadas à produção de gás natural de fontes não-convencionais e captura de carbono podem proporcionar para o interior do Estado de São Paulo:

- Aumento da segurança energética com a diversificação de bacias e poços produtores;
- Expansão da rede de transporte e distribuição de gás natural;
- Crescimento e criação de novas atividades econômicas em regiões do interior do Estado;
- Aumento da competitividade preço do gás e redução da tarifa ao consumidor final;
- Expandir o uso de gás natural em diferentes setores (transporte, indústria, residencial) e na geração de eletricidade próximo das localidades consumidoras.
- Todos estes benefícios listados também contribuem para o desenvolvimento do CCS, BECCS, bem como produção de biogás e biometano.

O Estado de São Paulo possui infraestrutura laboratorial e recursos humanos capazes de desenvolver plenamente uma produção de *shale gas* segura, econômica e ambientalmente sustentável. A Divisão Científica de Tecnologia de Petróleo, Gás Natural e Bioenergia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo realiza uma diversidade de estudos de caráter interdisciplinar. Seus estudos tratam das questões regulatórias, econômicas, logísticas, ambientais, de segurança, de comunicação e geológicas. A Divisão disponibiliza, para o setor de gás natural e óleo, diversos laboratórios para ensaios de rochas associadas aos sistemas petrolíferos e serviços de avaliação geológica para potencial exploração de óleo e gás não convencionais.

As questões regulatórias e de percepção socioambiental têm se mostrado como principais barreiras para o desenvolvimento dos gases não convencionais em São Paulo e no Brasil. As avaliações dos especialistas indicam, a importância de endereçar corretamente os riscos da produção de gás não convencional, assim como o aprofundamento do conhecimento geológico do potencial brasileiro, a melhoria das condições logísticas, da segurança jurídica e percepção pública favorável.

O mais importante é que, para garantir a segurança, utilize-se de maneira consciente o princípio da precaução, de modo que não impeça o desenvolvimento econômico afastando investidores, caso seja muito rígida, mas que também não seja irresponsável, na situação de permissão de atividades de alto risco. A implantação de projeto de poço piloto parece adequada à aplicação do princípio da precaução ao caso, pois possibilitaria a identificação de eventuais riscos e de medidas de mitigação.

## Eficiência energética no consumo térmico

A eficiência energética das demandas térmicas e de combustíveis foi inserida no modelo econométrico com a premissa básica de que seu incremento se dê conforme a evolução histórica. Os maiores ganhos nesta demanda serão advindos da mudança de energéticos e eletrificação, que já possuem seus ganhos esperados contabilizados. A Tabela 13 apresenta os percentuais de ganhos de eficiência acumulados em períodos de 5 anos para cada setor, já os ganhos consolidados por setor até 2050 são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Eficiência energética anual no consumo térmico por setor

Eficiência Energética (não elétrica) - Acumulada		2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Total</b>	%	2,95%	4,80%	4,79%	4,81%	4,88%	4,96%
Setor Energético	%	0,09%	0,08%	0,06%	0,05%	0,04%	0,03%
Residencial	%	3,87%	6,81%	6,87%	6,84%	6,68%	6,51%
Comercial	%	2,69%	4,80%	4,86%	4,83%	4,72%	4,60%
Público	%	1,12%	1,99%	2,01%	2,00%	1,96%	1,91%
Agropecuário	%	0,10%	0,09%	0,06%	0,06%	0,05%	0,04%
Industrial	%	3,16%	4,62%	4,53%	4,62%	4,95%	5,31%

Tabela 14 - Eficiência energética no consumo térmico por setor – Acumulado até 2050

Eficiência Energética - EE [%]				
RESIDENCIAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL	OUTROS	Total
43,9%	29,6%	30,5%	12,3%	30,4%

O ganho de Eficiência Energética não-elétrica se dará pelos processos de eletrificação a partir de tecnologias novas e de alta eficiência. A Eletrificação é um processo global e, cada vez mais, os fabricantes de tecnologia expandiram os seus mercados para os diferentes setores e cadeias da economia. Alguns insumos energéticos, principalmente combustíveis líquidos também poderão ser substituídos por outros tipos de combustíveis menos emissores como os gasosos - o gás natural, em relação ao carvão e derivados de petróleo; ou por combustíveis renováveis, como o biogás e biometano nos diversos processos de fabricação.

No cenário de Referência, considerando a tendência de eficiência nos setores da economia baseado em histórico de demanda e nas projeções futuras a partir do método *Top Down*, os setores como o energético e o agropecuário apresentam baixo ganho de eficiência, em torno de 0,4% por período quinquenal. No caso do setor industrial e comercial, esses ganhos são maiores, resultado da substituição de equipamentos, *retrofit* de plantas industriais e modernização de estabelecimentos comerciais de grande porte, resultando em ganhos quinquenais próximos de 5%.

# Emissões de Gases de Efeito Estufa: Balanço Prospectivo e Mecanismos de Mercado de Carbono

Na presente Secção aborda-se inicialmente uma tecnologia de natureza disruptiva no combate à emissão de GEE, que congrega as técnicas de captura de Carbono, como importante subsídio para viabilizar premissas de suporte à formulação de cenários, a partir das quais se pode então estabelecer o Balanço de Emissões de GEE no Estado de São Paulo. Uma vez obtido o Balanço de Emissões, aborda-se os Mecanismos de Mercado de Carbono, que certamente irão ganhar expressão ainda maior no horizonte do PEE/SP 2050 e irão contribuir para uma maior competitividade de alternativas tecnológicas visando a redução da pegada de Carbono do Estado.

## Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), incluindo BECCS

O CO<sub>2</sub> é considerado um dos principais gases causadores do efeito estufa, sua emissão na atmosfera contribui para as mudanças climáticas e o aquecimento do planeta. Portanto desvencilhar-se ou transformar o CO<sub>2</sub> em outros produtos faz parte das estratégias de descarbonização das nações. Um grande problema do CO<sub>2</sub> é a estabilidade da molécula. Exige-se muita “ginástica química” e energia para convertê-lo em algo interessante e socio ambientalmente menos danoso. Desta forma, entende-se que as ciências e o desenvolvimento tecnológico ainda terão de evoluir para conceber soluções de utilização do CO<sub>2</sub> que sejam materiais para que possam compor políticas consistentes de descarbonização da economia.

O CO<sub>2</sub>, uma vez emitido e liberado na atmosfera, sua recuperação torna-se muito difícil e custosa, pois as concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera são muito baixas (lembrando que a atmosfera terrestre é composta de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de todos os demais gases dentre os quais, o CO<sub>2</sub>). Muito difícil separar esse percentual menor que 1% da massa gasosa total planetária. A forma mais natural de efetuar essa separação será via fotossínteses com o crescimento de plantas e/ou algas, capturando o CO<sub>2</sub> na forma de biomassa. Surgem, então, linhas de pesquisa e soluções tecnológicas que procuram incitar e maximizar essa captura natural, são as ditas Soluções Baseadas na Natureza (ou, do inglês, *Nature –Based Solutions*, NBS).

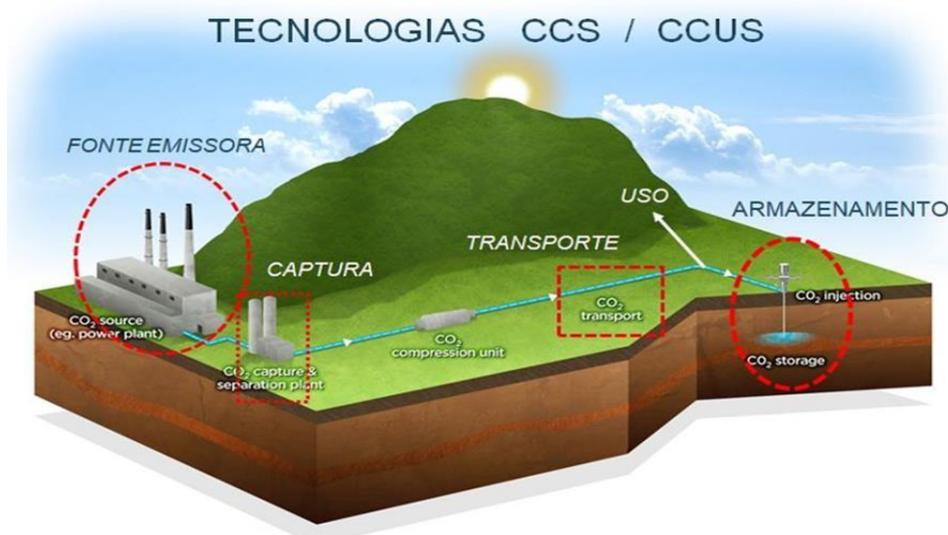
No PAC 2050 demonstrou-se interesse no tema e propôs-se estratégias de NBS a serem adotadas pelo Estado de São Paulo em sua RACE-TO-NET-ZERO até 2050. O reflorestamento de terras degradadas com florestas nativas é a iniciativa de NBS enfatizada no PAC 2050.

Tais oportunidades de NBS não se encontram discriminadas nesta versão inicial do PEE/SP 2050, já que elas não tratam de soluções relacionadas à energia. Entretanto, essas perspectivas poderão ser inseridas em revisões futuras do Plano energético.

Contudo, faz-se referência explícita neste item de tecnologias disruptivas à captura e armazenamento geológico do carbono (ou do inglês CCS, *Carbon Capture and Storage*). O CCS é ilustrado na Figura 127 e consiste em separar os gases e extrair o CO<sub>2</sub> próximo ao ponto (ou equipamento) gerador (seja esse a chaminé de uma termelétrica ou indústria com consumo energético intensivo, seja o escape de alguma grande máquina como motor ou turbina). A separação do CO<sub>2</sub> será facilitada em ambientes nos quais haja uma maior concentração do gás; em seguida, o CO<sub>2</sub> poderá ser transportado via dutos, ou outros modais, como o rodoviário, até uma região que conterà um sumidouro geológico do gás, que pode ser um antigo campo produtor de petróleo, uma caverna salina ou mesmo uma bacia sedimentar qualquer, com condições geológicas adequadas.

Nesse sumidouro o CO<sub>2</sub> é injetado sob alta pressão, através de poços de injeção similares àqueles que produzem petróleo e gás. O CO<sub>2</sub> injetado se difunde na rocha sumidouro e ali fica aprisionado. Esse aprisionamento poderá ser definitivo, via, por exemplo, a mineralização do carbono nas rochas, ou temporária, imaginando-se, eventualmente, que um dia, o CO<sub>2</sub>, como insumo competitivo para algum processo de conversão, possa ser extraído novamente das rochas sumidouros. A Figura 127 ilustra um processo de captura de carbono, conforme descrito anteriormente.

Figura 127 - Mecanismo de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)



Os produtores de bioenergia também começam a revisitar seus processos em busca de oportunidades próprias de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, nesse caso, essa captura é denominada de BECCS, do inglês *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*.

A produção de bioetanol de cana de açúcar ou do milho já pode ser considerada “neutra” no que diz respeito às emissões de CO<sub>2</sub> devido à fotossíntese das plantas. Além disso, os produtores desse combustível começam a desenvolver os primeiros projetos pilotos de BECCS e a implementar oportunidades mais ousadas.

O processo de fermentação adotado para a produção do bioetanol gera como resíduo um CO<sub>2</sub> em concentração elevadíssima, praticamente puro. Esse CO<sub>2</sub> ainda é fundamentalmente descartado na atmosfera. Porém, sob pressões ambientais e reconhecendo uma oportunidade tecnológica, o setor sucroenergético começa a identificar e implementar iniciativas de BECCS que, a rigor, permitirão produzir um biocombustível com “emissões negativas de CO<sub>2</sub>”, com captura de CO<sub>2</sub> superior àquela incorporada no processo de produção, considerada toda a cadeia produtiva do combustível, inclusive a captura de CO<sub>2</sub> agregada pela fotossíntese das plantas utilizadas na produção.

Espera-se que o biocombustível gerado com essa pegada negativa de carbono possa ser comercializado com um preço prêmio ou possa gerar adicionais de receita para o produtor com a comercialização de créditos de carbono adicionais.

A opção de captura de CO<sub>2</sub> na produção de biometano é também uma alternativa para que se obtenha emissões negativas. O destaque dessa opção se dá pelo mesmo fator apontado anteriormente para o etanol: a pureza do CO<sub>2</sub> emitido, o que facilita o processo de captura.

Dentre os principais desafios para além da tecnologia em si, estão questões relacionados ao custo do transporte até os locais de armazenamento, há expectativas que hubs possam ser criados para que esse custo seja diluído. Há ainda a preocupação de se encontrar locais seguros para o armazenamento do carbono, garantindo que não haja um escape gradual, fazendo com que o esforço para a captura e transporte seja em vão no médio e longo prazo.

Ainda assim, apesar dos desafios, a tecnologia de CCS é promissora e conta com muitas experiências pilotos, inclusive de BECCS, em curso em diversos países. Porém, uma que se mostra particularmente relevante no Brasil é liderada pela empresa Fuel Sustainability (FS), que construiu duas unidades operativas nas cidades de Lucas do Rio Verde e Sorriso, no estado do Mato Grosso, para a produção de etanol de milho (primeira planta de etanol de milho no Brasil), bem como a fabricação de outros produtos. A FS já produz mais de 1,4 bilhão de litros de etanol de milho por ano, além de 40 mil toneladas de óleo de milho, 415 mil MWh de energia elétrica e 1,2 bilhão de toneladas de DDGs. A FS já se consolidou como o quarto maior grupo produtor de etanol do Brasil a capturar o carbono biogênico de altíssima pureza dos processos de fermentação do milho, e posterior envio a formações rochosas sedimentares do Mato Grosso, tornaram-se iniciativas estratégicas para a empresa. A FS tem trabalhado para produzir o primeiro combustível do Brasil com pegada negativa de carbono. Similares iniciativas deverão futuramente ser apresentadas pelo setor sucroalcooleiro paulista em sua busca por soluções produtivas com reduzidas pegadas de carbono.

Nesta primeira versão do PPE/SP 2050, nenhuma cenarização quantitativa é apresentada para o potencial de CCS e BECCS no Estado de São Paulo. Contudo, o levantamento desse potencial e o estudo das principais oportunidades disponíveis, tanto onshore como offshore, são referenciados como tecnologia disruptiva de alto impacto a ser monitorada pelo governo do Estado de São Paulo, junto com agentes acadêmicos, empresariais e de entidades do terceiro setor. Revisões futuras do PEE/SP 2050 poderão indicar com maior clareza os papéis a serem esperados do CCS e do BECCS.

Destaque-se que embora não seja aprofundada a discussão acerca da tecnologia de captura de carbono a ser empregada, no plano de expansão de geração proposto considera-se a expansão termelétrica a gás natural no território paulista, além da produção de hidrogênio de baixo carbono a partir do gás natural. Em ambos os casos, adota-se como premissa básica que haverá captura de carbono nesses empreendimentos.

## Balanço de Emissões do Estado de São Paulo

A presente seção busca apresentar em que medida as ações e projeções propostas no PEE/SP 2050 são capazes de afetar e mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) a partir da comparação dos cenários previamente desenvolvidos

Nas seções anteriores foi apresentada a evolução da oferta e da demanda de energia para diferentes setores da economia de São Paulo. Dentre os setores discriminados estão o setor industrial, de transporte, que inclui os modais rodoviário, ferroviário, aéreo e marítimo, energético com uma segmentação específica para o setor elétrico, agropecuário e edificações dividido em residencial, comercial e público. Tais divisões buscaram reproduzir as classificações utilizadas no último Balanço de Energia do Estado de São Paulo 2022 (BEESP 2022), publicado em 2022 referente ao ano de 2021.

Com o propósito em mente, foram formulados dois quadros de emissões: o Cenário Base e o Cenário de Mitigação. O primeiro tem como objetivo espelhar a permanência do panorama tecnológico e comportamental vigente, dessa forma ele é um cenário de referência para o caso em que se assume que as medidas adotadas irão reproduzir o histórico. O segundo é elaborado de forma a projetar uma mudança de paradigma desejável e atualmente buscada pelo ESP, na qual a meta é a transição energética para uma descarbonização desse setor e da economia. Assim, inclui-se a implementação de todas as medidas e submedidas destinadas a reduzir as emissões presentes nesse Plano.

Com os resultados apresentados para cada um dos setores é possível estimar o montante de emissões de gases do efeito estufa que será mitigado uma vez que as medidas propostas no presente plano sejam implementadas e alcançadas. O atendimento da demanda de cada um dos setores e segmentos foi definida do ponto de vista tecnológico, o que impacta no recurso e/ou vetor energético utilizado. Tais decisões tem consequência no montante de emissão de GEE projetado.

Destaque-se que os resultados apresentados para os cenários considerados, tanto em termos de demanda, oferta e de emissões, são indicativos. Contudo, não traduzirão a realidade ao longo do horizonte temporal do plano. O conceito de projeção de diferentes cenários busca oferecer um exercício comparativo dos resultados construídos a partir da adoção de diferentes premissas. Com isso pode-se compreender como diferentes escolhas podem gerar diferentes trajetórias, mas de nenhuma forma este é um exercício de previsão exata.

A implementação das propostas e alternativas, especialmente no que tange à mensuração, o reporte e a verificação (MRV) das suas ações, deverão ser implementadas de maneira a oferecer subsídios para correções e ajustes periódicos de rotas do presente plano.

Os fatores de conversão energética, volumétrica, mássica e de equivalência de combustíveis seguiram os dados do BEESP 2022 (GOV-SP, Balanço Energético do Estado de São Paulo 2022 - ano base 2021, 2022) sempre que possível e os dados Balanço Energético Nacional 2022 (EPE, 2022) quando necessário.

Os valores de fatores de emissão de GEE utilizados estão apresentados na Tabela 15. Assim como para os fatores mencionados anteriormente, sempre que disponíveis optou-se por utilizar os fatores de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) apresentados no BEESP 2022 (GOV-SP, Balanço Energético do Estado de São Paulo 2022 - ano base 2021, 2022). Isso garante uma coerência com um dos principais documentos norteadores da situação energética do Estado e ao mesmo tempo possibilita uma validação dos resultados a partir dos dados históricos.

Contudo, nem todos os fatores de interesse estavam disponíveis no BEESP 2022, dessa forma, os valores faltantes, com destaque para todos os fatores de emissão de metano (CH<sub>4</sub>) e de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) foram obtidos a partir dos dados do (IPCC, 2021) e da 4ª Comunicação Nacional.

Ao se multiplicar os fatores de emissão com os dados de consumo de cada setor, oriundos das atividades necessárias de cada um deles para se atender a demanda projetada, obteve-se a trajetória de emissão de GEE para cada um dos cenários (Figura 128). A fim de se contabilizar as emissões de GEE em termos de potencial de aquecimento em função do carbono equivalente usou-se os fatores de aquecimento do metano e do óxido nitroso conforme o AR6 do IPCC que define que para um horizonte de 100 anos o potencial desses gases é de 29,8 CO<sub>2</sub>e e 273 CO<sub>2</sub>e, respectivamente.

Na Figura 128 é possível observar o quanto as trajetórias de emissões de GEE dos cenários Linha de Base e Mitigação divergem, chegando a uma diferença de 57% do segundo em relação ao primeiro. Ao se avaliar a emissão de GEE em 2050 e compará-la ao primeiro ano projeto (2023), que muito se aproxima dos valores contabilizados para 2021, percebe-se uma redução de 43%.

Tabela 15 - Fatores de emissão utilizados

Setor de Uso	Combustível	Fator de Emissão	Fator de Emissão	Fator de Emissão
		t de CO <sub>2</sub> /TJ <sup>1</sup>	kg CH <sub>4</sub> /TJ <sup>2</sup>	kg N <sub>2</sub> O/TJ <sup>2</sup>
Geral	Petróleo	69.70	0	0
Geral	Carvão Vapor	93.40	0	0
Edificações	Gás Natural	53.30	1.0	1.0
Indústria		53.30	5.0	4.0
Transporte Rodoviário		53.30	0.5	0.1
Edificações	Óleo Diesel	70.40	0.0	0.0
Indústria		70.40	0.2	0.4
Agropecuária		70.40	0.0	0.0
Transporte Rodoviário		70.40	5.2	2.8
Transporte Ferroviário		70.40	4.2	28.6
Edificações	Óleo Combustível	73.50	1.4	0.3
Indústria		73.50	3.0	0.3
Agropecuária		73.50	0.0	0.0
Transporte Rodoviário	Gasolina	65.80	17.2	7.5
Aviação		65.80	0.5	2.0
Edificações	GLP	59.90	1.0	2.5
Indústria		59.90	0.9	4.0
Geral	Nafta	11.10	0.0	0.0
Aviação	Querosene	68.30	0.0	2.0
Geral	Outras Secundárias	66.20	0.0	0.0
Geral	Gás de Coquera	63.50	0.0	0.0
Geral	Coque de Carvão Mineral	102.80	0.0	0.0
Geral	Gás de Refinaria	57.50	0.0	0.0
Geral	Outros Não Energéticos de Petróleo	64.10	0.0	0.0
Geral	Outros <sup>3</sup>	13.24	0.0	0.0
Geral	Outros Agropecuária <sup>3</sup>	61.89	0.0	0.0
Geral	Fóssil/Coque Petróleo <sup>3</sup>	69.33	0.0	0.0
Geral	SIN <sup>4</sup>	2.58E+14	0.0	0.0

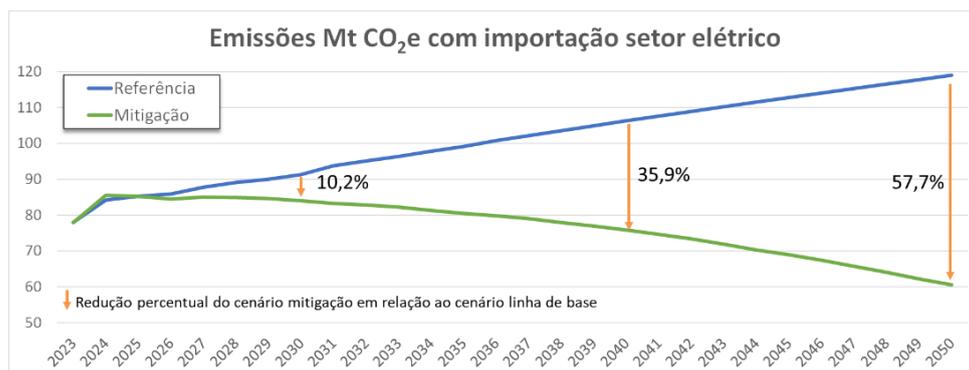
Fonte: Elaboração própria baseado em:

<sup>1</sup> São Paulo (2022)<sup>2</sup> 4Brasil (2020) e IPCC (2022)

<sup>3</sup> Ajustado de acordo com a emissão verificada em 2021 pelo BEESP 2022

<sup>4</sup> Fator de emissão do Sistema Interligado Nacional baseado nas projeções de evolução.

Figura 128 - Emissão de gases do efeito estufa para os cenários Linha de Base e mitigação em Mt CO<sub>2</sub>e.



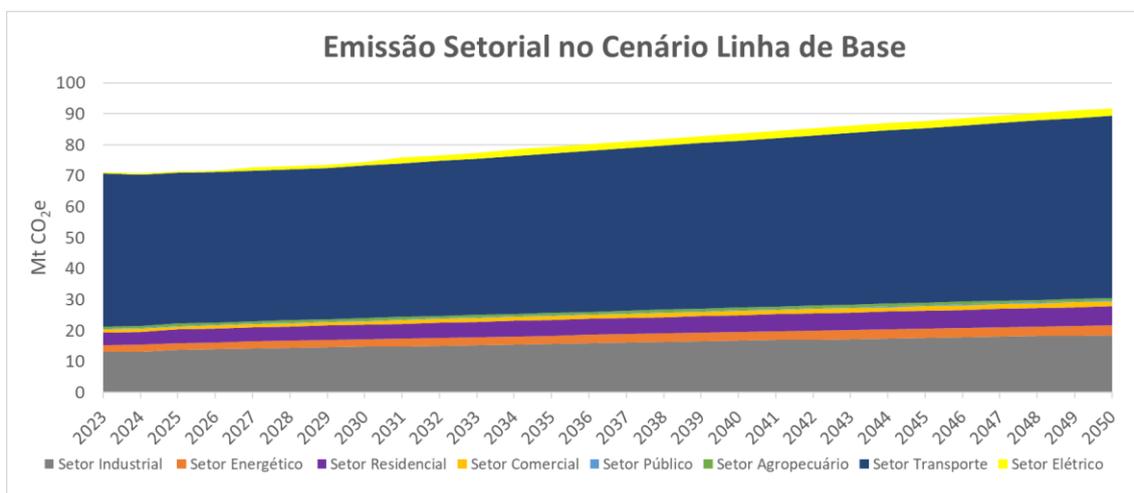
Fonte: Elaboração Própria

Percebe-se que o cenário de mitigação é capaz de reduzir a emissão de gases do efeito estufa em 2050 em mais que a metade se comparado ao cenário de linha de base. Vale destacar que a maior parte das reduções de GEE advém da redução de das emissões de gás carbônico, que é o principal gás emissor do setor energético. É ainda possível segregar tais resultados a nível setorial e entender como a projeção de cada setor contribuiu para a redução e/ou aumento das emissões de GEE a depender do cenário.

As Figura 129 e

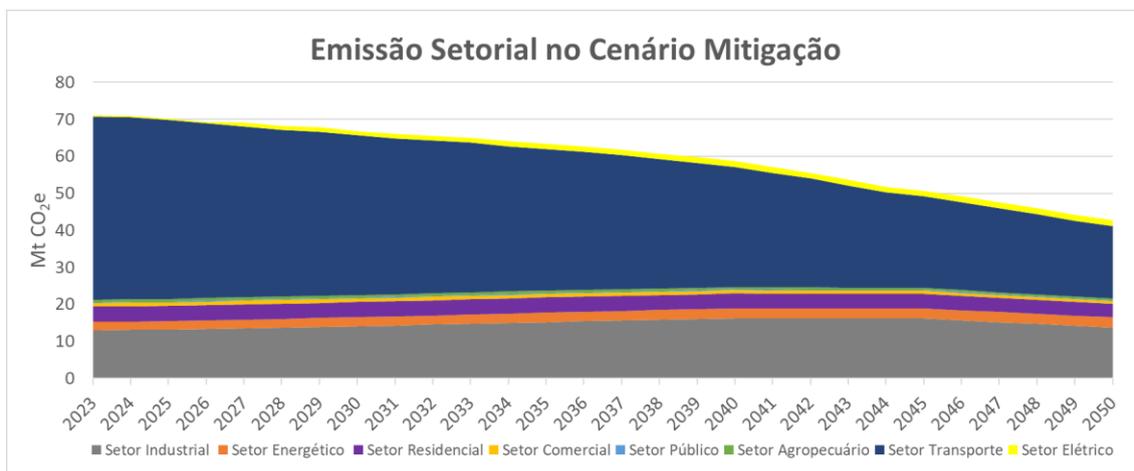
Figura 130 ilustram a variação total de emissão de carbono equivalente para os cenários de linha de base e mitigação, respectivamente. Nota-se que em ambos os casos o setor de transporte apresenta um acentuado impacto na evolução das emissões de GEE em relação a 2023. O computo das emissões de GEE do cenário linha de base do transporte baseou-se no trabalho desenvolvido no âmbito do Plano de Ação Climática de São Paulo. Definiu-se o valor de 2023 igual ao valor do cenário de mitigação e projetou-se o crescimento relativo igual ao verificado no PAC.

Figura 129 - Evolução das emissões de GEE para o cenário linha de base



Fonte: Elaboração Própria

Figura 130 - Evolução das emissões de GEE para o cenário mitigação



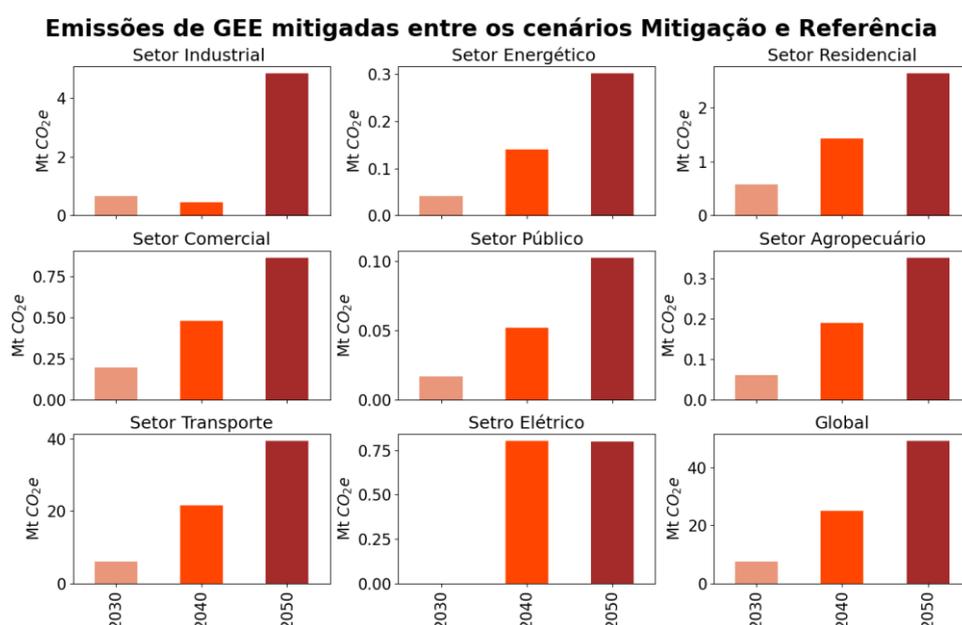
Fonte: Elaboração Própria

Apesar de o setor de transporte ser o de maior destaque nas reduções de emissão de GEE, os outros setores também foram capazes de contribuir para a atenuação das emissões em 2050 no cenário mitigação, tanto em termos absolutos, mas

especialmente quando comparados com o cenário de linha de base, o qual apresenta um crescimento nas emissões de GEE de 2023 até 2050 para todos os setores.

A Figura 131 apresenta o quanto cada um dos setores foi capaz de mitigar as emissões no cenário mitigação em relação ao cenário de linha de base. Percebe-se o grande destaque do setor de transporte, mas há espaço contribuição dos outros setores.

Figura 131 - Emissões mitigadas do cenário mitigação em relação ao cenário linha de base

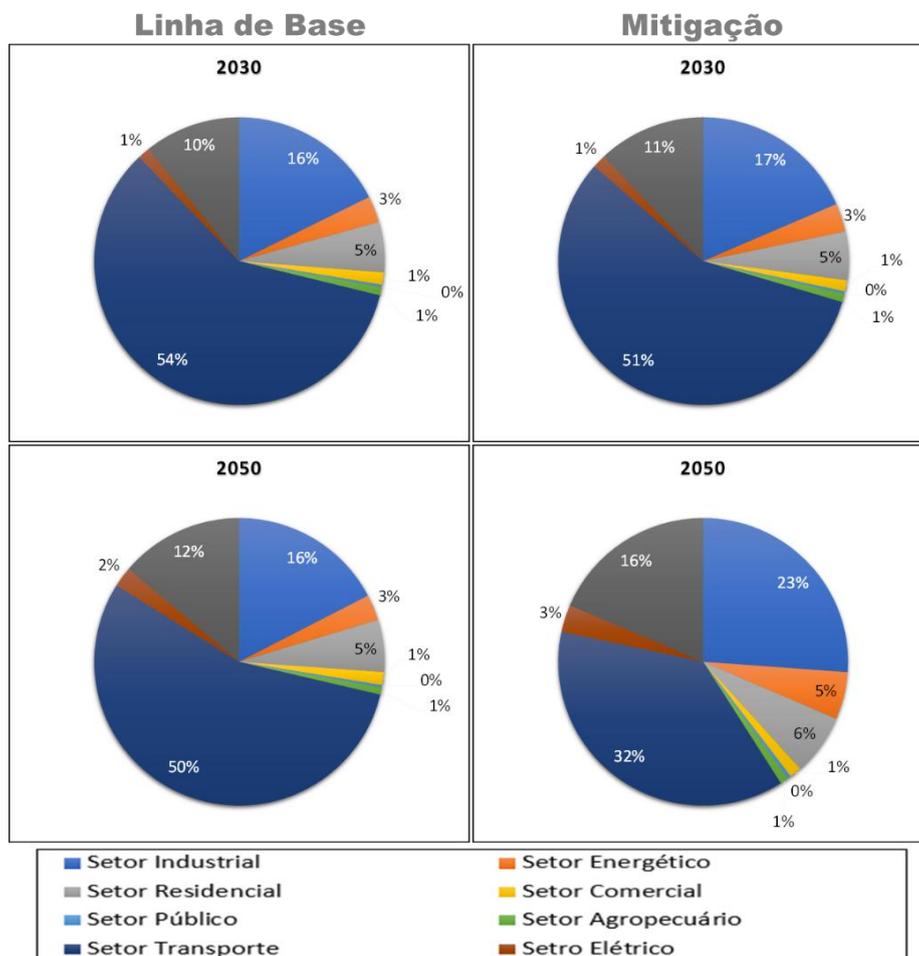


Fonte: Elaboração Própria

A maior parte da mitigação de GEE se dá devido a uma transição de combustíveis fósseis para fontes energéticas renováveis, eletrificação e a um ganho de eficiência associado. Tais aspectos não são considerados no cenário de Linha de Base. Muitos dos setores ou têm pouco espaço para transição ou diversos desafios associados a um encerramento do uso de fontes fósseis. O setor de transporte, apesar de apresentar desafios logísticos e alguns técnicos, por sua vez apresenta grande potencial de mitigação que foi altamente explorado no presente plano.

A Figura 132 mostra como o impacto das ações do setor de transporte afetam o perfil setorial de participação das emissões de GEE no ESP. Atualmente o percentual de emissões de GEE oriundas do setor de transporte é superior a 60%. No cenário de linha de base esse valor se mantém mais ou menos constante. Entretanto, no cenário de mitigação há uma gradual redução na qual o setor de transporte em 2050 passa a responder por cerca de 30% das emissões de GEE.

Figura 132 - Participação setorial relativa nas emissões de GEE do ESP



Fonte: Elaboração Própria

Destaca-se ainda que nos cenários elaborados, o ESP conseguiu reduzir a participação da quantidade de energia elétrica importada do grid. Tais valores não são comumente associados a emissão de quem importa e sim de quem produz, contudo, tal elemento mostra que ações dentro do ESP pode contribuir de forma a extrapolar os limites do território estadual, gerando benefícios a níveis nacionais no que diz respeito ao cumprimento das metas de redução de emissões de GEE. Em 2050 4,1 Mt CO<sub>2</sub>e deixariam de ser emitidos pelo grid, considerando o fator emissão atual do grid. Em termos energético, isso significa uma redução de 6,7 GWmédios em 2050.

Diversas das ações estão descritas com detalhes nas seções de cada um dos setores, mas destaca-se aqui o armazenamento de carbono realizado através da tecnologia de Carbon Capture and Storage (CCS), utilizado no setor elétrico e para a produção de hidrogênio. A captura esperada totalizou 3,90 Mt CO<sub>2</sub> em 2050, acumulando quase um

total de 55 Mt CO<sub>2</sub> a partir de 2025, que é quando a produção e hidrogênio com gás natural e CCS começa a operar, até 2050.

Vale ainda citar que a associação de CCS com bioenergia pode gerar emissões negativas (BECCS do inglês Bioenergy Energy with Carbon, Capture and Storage). O desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia pode fazer com que o setor energético, e especialmente o segmento de energia, possa se tornar carbono neutro ou negativo em 2050. Dentre as alternativas com melhor expectativa de aplicabilidade da captura de carbono estão a produção de etanol e de biometano. Contudo, devido à incerteza dessa aplicação, optou-se por não considerar a utilização de BECCS no cenário mitigação, e fazer os cálculos de forma exógena a esse cenário a fim de oferecer o quanto essa alternativa pode vir a contribuir para a redução das emissões de carbono.

Considerou-se o uso de CCS na produção de etanol e de biometano, no primeiro caso, tomando a produção total no ESP em 2021 como base, é possível capturar 2,4 MtCO<sub>2</sub> no caso do biometano utilizou-se o ano de 2022 como referência, o que possibilitaria uma captura de 0,067 MtCO<sub>2</sub> de carbono. Contudo, caso todo o potencial de produção de biometano do ESP fosse explorado de forma associada com captura, esse valor poderia alcançar 4 MtCO<sub>2</sub>. Tais valores não são desprezíveis. Considerando apenas a utilização no montante hoje produzido de etanol e biometano se alcança um percentual adicional de redução das emissões do cenário mitigação igual a 4% aproximadamente.

A redução das emissões de GEE alcançada só pode se concretizar caso as ações apresentadas no presente plano sejam desenvolvidas. Tal aspecto mostra a importância da implementação de políticas que possam facilitar a execução de ações e medidas na linha do que é proposto no plano a fim de que se possa mitigar a emissão. Além do mais, é notório o desafio do setor de energia tornar-se neutro em emissões líquidas de gases do efeito estufa ou apenas carbono, em um Estado como São Paulo.

Sendo assim, tal desafio pode vir a ser suplantado pelo setor energético à partir da compensação cruzada de outros setores com mais potencial, menor custo e menos desafiador para o abatimento de emissões, como o setor de uso do solo e agropecuária. Mecanismos de mercado de carbono podem vir a ser alternativas fundamentais para que essa possibilidade se torne real.

## Mecanismos de Mercado para Emissões

### Conceituação geral

Na sua forma mais geral, estes Mecanismos de Mercado (MM) se consolidam em quatro vertentes principais:

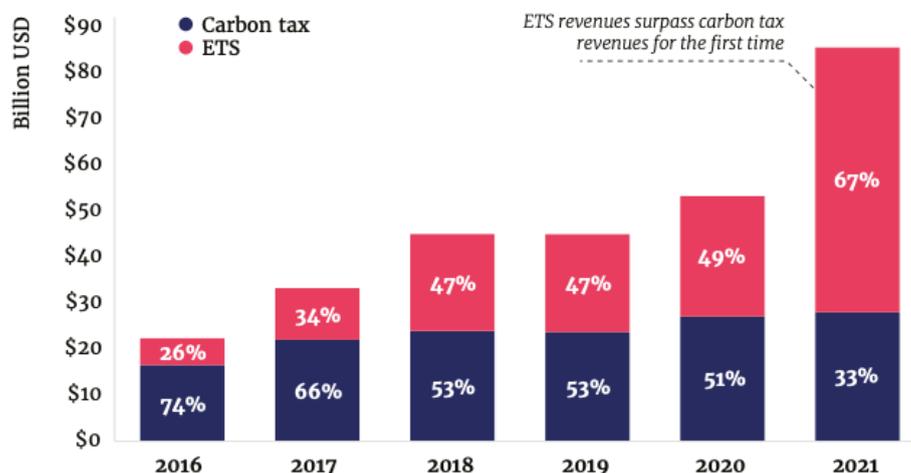
- (I) Taxações e/ou impostos sobre emissões;
- (II) Criação de mercados de permissões (cap and trade);
- (III) Iniciativas Voluntárias; e
- (IV) Mecanismos de Ajuste de Fronteira.

Todas essas alternativas implicam em tornar as emissões mais caras e, conseqüentemente, incentivar iniciativas que visem reduzi-las, por essa razão são denominadas de Mecanismos de Mercado.

A opção por taxas e impostos representam a iniciativa mais fácil de ser implementada e fiscalizada, mas possui um ônus político de difícil enfrentamento pelos agentes formadores de políticas públicas, à medida que pressupõem a criação ou aumento de alíquotas de impostas.

Por outro lado, os Mercados de permissões ("cap and trade") mesmo com maior dificuldade de implantação de seus desenhos regulatórios, usualmente complexos e de difícil fiscalização e implementação, vem crescendo como solução mais empregada. Desde 2021 os recursos financeiros envolvidos nesses mercados competitivos já suplantam os valores arrecadados por meio de taxas e impostos. Conforme se pode observar na Figura 133, em 2021, pela primeira vez, as receitas advindas dos mecanismos de permissão superaram as receitas oriundas de taxaço via impostos.

Figura 133 - Recursos financeiros envolvidos em mercados competitivos



Fonte: Banco Mundial (2022)

Fonte: (World Bank, 2022)

**Legenda da figura na língua inglesa: Carbon tax significa impostos ou taxas cobrados sobre emissões; ETS- significa mercados de permissões (cap and trade)**

Mercados voluntários de emissões reduzidas normalmente se consolidam entre as atividades que não foram enquadradas, pelo menos nas primeiras etapas do regulamento, entre aquelas com permissões reguladas e limitadas, e mesmo sem uma obrigatoriedade regulatória, decidem reduzir suas emissões através de projetos, tecnologias ou práticas sustentáveis, que possam ser verificadas e comprovadas com sofisticados Protocolos de Monitoramento e Controle.

O valor destes certificados pode inclusive depender da credibilidade da entidade certificadora. Entre aquelas que apresentam maior respeitabilidade internacionalmente estão a VERRA Certificadora e a Golden Standard. Normalmente os desenhos de mercado permitem a coexistência desses projetos voluntários com mercados de permissões, embora a participação dos primeiros seja usualmente limitada a montantes da ordem de 10 a 15% dos volumes transacionados.

Entre os principais projetos voluntários encontram-se aqueles relacionados com Florestas e Uso da Terra, atividades que vem mais recentemente sendo criticadas por suposta pouca eficácia e pela baixa confiabilidade que podem oferecer sobre as emissões efetivamente reduzidas. Alguns mercados de permissões estão sendo cada

vez mais críticos dessas iniciativas e em alguns poucos casos, nem mesmo são aceitos os seus projetos.

Os Mecanismos de Ajuste de Fronteira, embora já discutidos há bastante tempo, somente agora, em 2023 começam a ganhar corpo na Comunidade Europeia, visando evitar-se que produtos industriais, como ocorreu na primeira fase desta experiência, sejam fabricados em países com elevada leniência em suas medidas de combate a emissões e posteriormente venham a concorrer com produtos que tiveram suas emissões impactadas por Mecanismos de Mercado, e que portanto incorreram em mais elevados custos de produção e comercialização. Desta forma uma cobrança de imposto de fronteira tornaria os impactos econômicos similares, a despeito da conhecida resistência à criação de impostos e taxações.

Existem iniciativas de se produzir efeitos econômicos que antecedem mesmo a existência das Conferência das Partes (COPs), como bem exemplificam as iniciativas da Finlândia (1990) e da Suécia e Noruega (1991) quando criaram os primeiros impostos sobre emissões. Embora de aparente maior facilidade de aplicação e fiscalização, a criação de impostos sobre emissões esbarra no custo político. Entre os últimos países a criarem mecanismos desse tipo encontra-se a França em 2014.

Mecanismos de permissões tem se expandido em todo o mundo (Figura 134), mas ainda não possuem a devida formação que permita uma paridade econômica permitindo para uma precificação de equilíbrio internacional (World Bank, 2022).

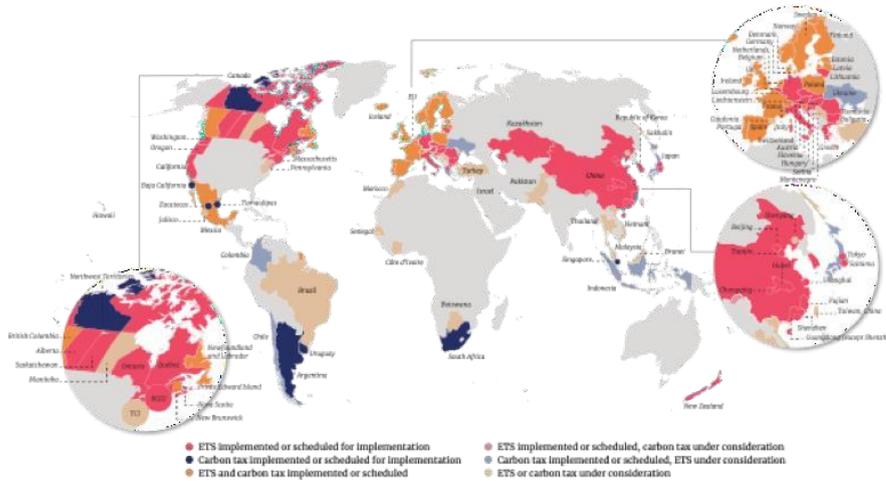
Os mercados voluntários se concentram mais em países em desenvolvimento (Chen, Marbough, Moore, & Stern, 2021), (provavelmente pela falta de regras já consolidadas nas outras tipologias de Mecanismos de Mercado), de acordo com o que se pode observar na Figura 135, embora China e EUA também tenham relevância nesse tipo de projeto.

### Preços de referência

Os valores utilizados em referência em Impostos são muito dispersos, podendo ser tão baixos como os praticados no Chile e na Colômbia (US\$ 5/ton CO<sub>2</sub>eq) ou tão expressivos como Suíça, Suécia e Uruguai (US\$130/Ton CO<sub>2</sub>eq nos 2 primeiros e US\$137/Ton CO<sub>2</sub>eq no Uruguai).

A Figura 136 evidencia a disparidade de preços e volumes cobertos em relação as emissões regionais.

Figura 134 - Mapa de mecanismos de permissões

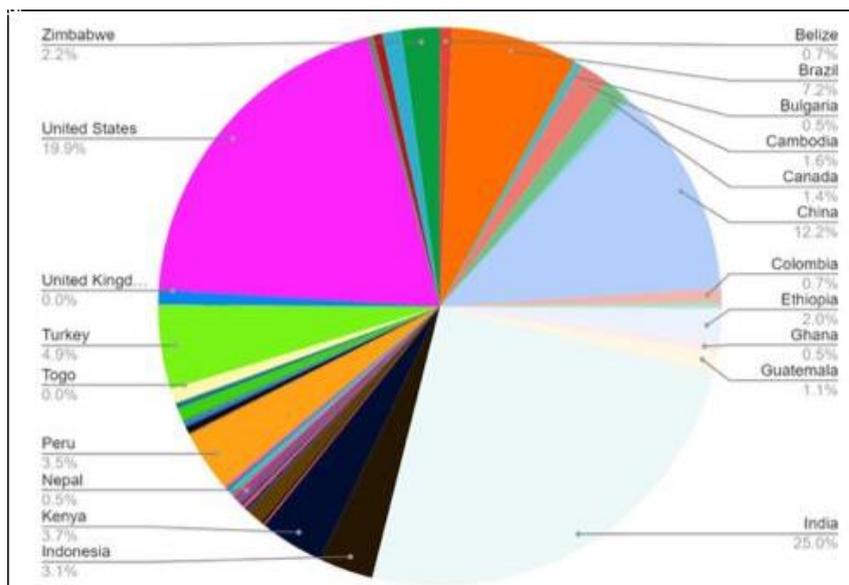


Fonte: Banco Mundial (2022)

Fonte: (World Bank, 2022)

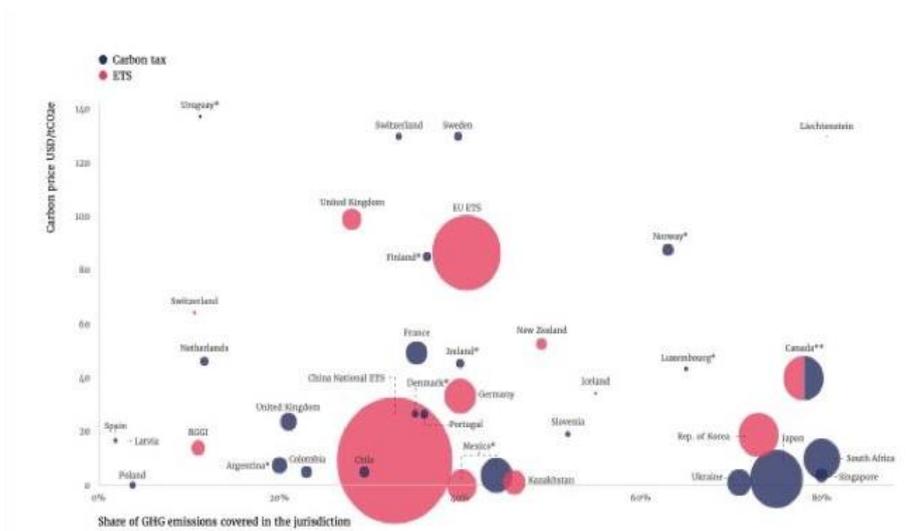
Legenda na língua inglesa: ETS Mercados de permissões (cap and trade); Carbon taxes mercados onde são cobrados impostos por emissões. A legenda ainda detalha onde essas iniciativas já se encontram em atividades, onde convivem ambas as iniciativas e onde elas se encontram em consideração para serem aplicadas pelos legisladores.

Figura 135 - Distribuição dos mercados voluntários pelo mundo



Fonte: (Chen, Marbough, Moore, & Stern, 2021)

Figura 136 - Disparidade de preços e volumes cobertos



Fonte: (World Bank, 2022)

Legenda da figura na língua inglesa. No eixo vertical o valor dos preços de carbono, quer em impostos quer em mecanismos de mercado puro, e no eixo horizontal a proporção de participação no mercado em referência.

### Modelo de mecanismo de Mercado a ser proposto no Brasil com protagonismo do Estado de São Paulo

O referencial regulatório a ser proposto no Brasil encontrava-se em discussão no Congresso Nacional há quase uma década, tendo coexistido diferentes versões em discussão. No entanto, em 21 de agosto de 2023, foi apresentado um projeto de lei substitutivo<sup>28</sup>, cuja ementa é regulamentar o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) que representa, em essência, a concepção do Poder executivo para o tema.

Uma análise mais detalhada dessa proposta de diploma legal está apresentada nos parágrafos subsequentes. No entanto, pode-se afirmar que esta iniciativa além de necessária para colocar o Brasil no mesmo patamar de mais de 70 países que já desenvolvem este tipo de providência (Mecanismos de Mercado para precificar emissões de carbono), representa importante externalidade para incentivar novas tecnologias e novas iniciativas para um cenário almejado de balanço nulo de emissões nulas em 2050.

<sup>28</sup> PL 412/2022

Qualquer análise antes que exista um documento formalmente aprovado (o substitutivo ainda precisa tramitar na Câmara dos Deputados), parece prematura, mas o Estado de São Paulo pode exercer um relevante protagonismo no momento em que as providências de implantação do modelo se estabeleçam.

Pode-se afirmar que qualquer que seja o desenho legal e regulatório que venha a prevalecer, as dificuldades de sua implantação e do seu detalhamento regulatório não serão triviais. É nessa implementação que a SEMIL, representando o Estado de SP, pode se posicionar como proponente e agente de relevância, pois essas iniciativas irão requerer ampla disponibilidade tecnológica e ajustes regulatórios.

Sabe-se que existem vantagens evidentes para que SP possa liderar este processo, uma vez que o Estado apresenta a maior relevância do setor financeiro nacional, possui a centralização de grande expertise de bancos, de corretoras, de bolsa de valores e de agentes comercializadores na área de energia elétrica e gás e ainda abriga a sede da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), entidade privada de direito público regulada e naturalmente vocacionada a exercer o papel de certificação, contabilização e liquidação financeiras de excedentes de permissões.

Um conjunto de universidades e centros de pesquisas de primeira linha também refletem essas possibilidades e potencialidade para exercer essa liderança.

Evidentemente, o papel a ser designado a cada setor necessitará de Regulação robusta por parte dos Ministério de Minas e Energia - MME, Ministério da Agricultura - MA e Ministério do Meio Ambiente - MMA. Exigirá ainda forte papel de coordenação intersetorial envolvendo agências reguladoras como a ANEEL, a ANP e a ANA. A base de implementação para a construção desse referencial pode ser liderada pelo Governo do Estado de SP.

Quando se analisam os pontos fortes dessa liderança, a existência dessa representação financeira e da competência instalada na CCEE surgem evidentemente como relevantes. A própria significância econômica que SP representa na economia brasileira o qualifica para essa liderança.

### **Substitutivo PL 412/22**

No dia 21 de agosto de 2023, conforme já mencionado, foi apresentado o projeto substitutivo, criando e estabelecendo os aspectos que necessitarão de regulação complementar do futuro Mercado Brasileiro de Reduções de Emissões (MBRE).

Depois de pelo menos cinco PLs e mais de três anos de negociações legislativas e demais stakeholders, a expectativa é que a legislação seja finalmente aprovada, inclusive na Câmara dos Deputados. O projeto espelha, em essência, as proposições do executivo, e estabelece a criação de um sistema de permissões no estilo *cap-and-trade*, semelhante ao que vigora na União Europeia desde 2005.

Grande parte deste debate e processo de negociação foi alavancado pelo programa Partnership for Market Readiness (PMR) financiado pelo Banco Mundial. O relatório final do PMR foi publicado em dezembro de 2020 e consolidou o esforço com análises técnicas que duraram de mais de três anos e contaram com contribuição direta de mais de 80 especialistas brasileiros e estrangeiros, bem como de contribuições recebidas a partir de interações periódicas com membros do governo, do setor privado, da academia e da sociedade civil ao longo de toda a análise.

Embora o referido diploma legal esteja bem concebido, há que se detalhar o funcionamento por meio de regulamentos que permitam um funcionamento adequado desse mercado de grande complexidade não só econômica, como técnica. Por exemplo, serão necessários esforços para detalhar:

- ✓ **Definição da cobertura do instrumento:** setores, atividades e fontes de emissão a serem regulados;
- ✓ **Definição do teto de emissões (cap):** volume máximo de GEE que pode ser emitido em conjunto pelos entes regulados;
- ✓ **Conversão do cap em permissões** a emitir e alocação (distribuição) dessas permissões para os entes regulados;
- ✓ **Comercialização das permissões** entre os entes regulados;
- ✓ **Entrega**, por parte de cada ente regulado, de quantidade de permissões equivalente ao seu volume de emissões em determinado período.
- ✓ **Aplicação de sanções** aos atores que não cumprirem o ponto acima.

Não obstante se possa observar que parte destas demandas estejam contempladas no PL, estima-se que seu pleno funcionamento possa demandar esforços de pelo menos 2 anos.

Como destaque dos itens mais relevantes do PL pode-se elencar:

- (I) a criação do Sistema Brasileiro do comércio de Emissões (SBCE);

- (II) a definição das competências de administração dessa iniciativa que ficam em primeira instância delegadas ao Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima e do órgão gestor do SBCE (ainda a ser criado);
- (III) a consideração dos problemas e providências das negociações dos créditos de carbono no mercado financeiro e suas consequências tributárias onde se estabelece atuação privilegiada da CVM;
- (IV) a consideração sobre a alocação de quotas permitidas gratuitas e onerosas e metodologias de verificação, monitoramento e contabilização para garantir a governança do processo;
- (V) a possibilidade de alteração dos limites estabelecidos para esses controles e a inclusão de novos atores econômicos na linha do tempo.

O projeto de lei ainda cria a possibilidade de penalizações, de fontes de custeio para a infraestrutura que virá a ser requerida, a possibilidade explícita de um mercado de créditos de carbono gerados a partir de ações voluntárias e aventa a necessidade de tratamento especial para as áreas protegidas de povos originários.

Embora seja necessário cautela sobre a real efetividade das providências propostas, inclusive porque podem ainda sofrer alterações na câmara dos deputados, o projeto substitutivo teve inicialmente boa aceitação entre os especialistas e de alguns agentes econômicos mais conectados com o tema.

As principais críticas até agora dizem respeito à incerteza sobre potenciais alterações das quotas de permissões com viés que as Contribuições Nacionalmente Determinadas do Brasil passem a considerar o conceito de Wide-economy e ao fato que tal como estabelecido, as entidades de governança sejam muito centralizadas em estruturas de governo com pouco espaço de discussão com a sociedade civil, em especial agentes econômicos.

Para seus reflexos no Estado de São Paulo, deve-se considerar as proposições de liderança e protagonismo detalhados nas seções precedentes.

## Roadmap - Consolidação dos Resultados

---

A presente seção tem como objetivo apresentar o plano de ações e *roadmap* de implementação de Políticas Públicas. Tais ferramentas foram desenhadas a partir das mudanças necessárias e desejadas na matriz energética do Estado de São Paulo, e observando a diretriz de neutralidade de emissões, com o propósito de consolidar os resultados das análises, expor as ações recomendadas e guiar sua implementação.

Nesse sentido, as ações apresentadas visam suportar as projeções realizadas para o setor Elétrico, de Transportes e de Energia Térmica e Combustíveis.

Por sua vez, o conjunto de ações está subdividido nos Eixos estruturantes e Macro Ações, propiciando maior didática e promovendo uma organização que visa facilitar implantação do mesmo. Por sua vez, a unidade de observação mais desagregada do plano são as ações, que possuem como componentes: código; título; descrição; objetivo; público-alvo; área; tipo de instrumento; cronograma de implementação (roadmap).

Como ressaltado anteriormente, o PEE e seu roadmap reflete as informações disponíveis durante o seu período de elaboração e devem ser revistos periodicamente, a partir das ferramentas de gestão e monitoramento previstos no próprio plano de ações.

### Setor Elétrico

O setor elétrico sofrerá um substancial crescimento até o ano de 2050, quando o consumo de energia elétrica no Estado de São Paulo deve passar de 14,5 10<sup>6</sup> tep para 21,6 10<sup>6</sup> tep, representando um crescimento de cerca de 47,8%.

Esse crescimento do consumo será suportado majoritariamente pela elevação da oferta de energia renovável produzida no próprio estado, de forma que a participação de energia renovável deve se manter entre 97% e 96% do consumo ao longo de todo o período de análise, como exposta na Figura 137.

Por sua vez, prevê-se que, em relação a linha de base, deve ocorrer um leve aumento das emissões até 2030, no valor de 2,2%. O qual será seguido de reduções profundas na emissão do setor elétrico até 2040 e 2050. Assim, prevê-se que, até 2050, haja uma redução de 29,7% das emissões quando comparado com a linha base.

Figura 137 - Resumo dos resultados e impactos do setor elétrico

	2023	2030	2040	2050
<b>Resultados</b>				
Consumo EE (10 <sup>6</sup> tep) Crescimento (%) (ref. 2023)	14,5 -	17,8 (22,0 %)	20,3 (39,7 %)	21,5 (47,7 %)
% Energia Renovável	98%	97%	96%	96%
Destaques	A participação de energia renovável se mantém estável, mesmo diante do substancial crescimento do consumo.			
<b>Impactos</b>				
Emissões (%) (ref. Linha de base)	-	1,8%	-24,7%	-33,9%

Fonte: Elaboração própria

Finalmente, a Figura 138 apresenta o roadmap de implementação de ações e observação de impactos sobre o setor elétrico. Destaca-se:

- A ampliação da participação da Cogeração de biomassa, do Biogás e Biometano, suportados pela elaboração do Plano Estadual de Biogás e Biometano;
- Medidas de Eletrificação da indústria e Eficiência Energética;
- Medidas de infraestrutura gasífera, fortalecendo a participação da bioenergia e Gás Natural;
- Desenvolvimento de cadeias produtivas da bioenergia;
- Instituição de modelos de emissão de permissões e certificados.

Ao final desta seção, apresenta-se o Plano de Ações completo, na Tabela 16.

Figura 138 – Roadmap para o Setor de energia elétrica

Eixo	Macro Ação	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Socioambiental	Gestão da Água	Definição de plano para implantação de reuso de água em prédios públicos.	Maioria dos prédios públicos do governo de São Paulo possuem reuso de água. Prática também é adotada em prédios dos municípios de São Paulo e empresas privadas de maior escala. Imposição de regulamentos começa a tornar o Reuso prática comum na iniciativa privada em geral e sociedade civil.	Reuso de água é prática comum em toda a sociedade, incluindo ambiente residencial, comercial e industrial. Reuso também é amplamente adotado na agricultura.
	Gestão de Resíduos			
Tecnologia	PD&I	P&D e Normatização para atingir nível TRL alto e viabilizar produção nacional de equipamentos e tecnologias. Expansão da adoção de medição inteligente, geração distribuída e eficiência energética e bioenergia. Capacitação de profissionais, incluindo os que já estão no mercado de trabalho, para atuar em novas tecnologias. Formação direcionada para novas tecnologias.	Avanços nos TRL. Atinge produção em escalas viáveis de equipamentos e tecnologias prevista para atender ao aumento do consumo, ao passo que fortalecem a redução da carga via medidas de eficiência energética. Identificação de melhorias nas soluções tecnológicas e suas respectivas padronizações. Hubs de mobilidade e bioenergia atuam na proposição de soluções para as cadeias produtivas.	Mercado concretizado buscando avanços e melhorias das tecnologias planejadas para o período. Hubs de mobilidade e bioenergia se tornam parte integrante da cadeia produtiva e são diferencial competitivo para o Estado de São Paulo.
	Capacitação			
	Normatização			
	Programas Específicos			
Infraestrutura	Recondicionar	Renovação de contratos de iluminação pública adotando tecnologias mais eficientes e de menor consumo, associados a parques de geração distribuída. Planejamento da otimização e ampliação da infraestrutura gasífera em torno das vocações regionais e	Iluminação pública utilizando tecnologias mais eficientes. Frotas de concessões e dos governos estadual e municipais amplamente renovados. Renovação de frotas de veículos urbanos particulares. Instituição de política de promoção de usinas híbridas gera efeitos e permite o aproveitamento de infraestrutura existente. Ampliação da infraestrutura gasífera viabiliza projetos de menor porte de biogás e biometano e ampliação do gás natural.	Corredores azuis de transporte de cargas, infraestrutura de recarga pública e privada e clusters energéticos são realidade no Estado de São Paulo.
	Otimizar			
	Ampliação da infraestrutura			

Eixo	Macro Ação	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Mercado	Incentivo Fiscal	Criação de incentivos fiscais tornam tecnologias estratégicas mais competitivas, incentivando o desenvolvimento tecnológico e desenvolvimento da cadeia produtiva. Novo modelo de concessão de coleta de resíduos e linhas de financiamento a concessionárias de transporte incentivam a cadeia produtiva e renovação da frota.	Cadeia produtiva para a indústria e transporte ganha competitividade na produção de equipamentos e sistemas. Incentivos fiscais continuam a fortalecer a adoção tecnológica, em especial voltados para transporte e bioenergia	Incentivado pelo desenvolvimento tecnológico dentro do Estado de São Paulo, cadeia produtiva é competitiva nacionalmente e internacionalmente, propiciando a exportação de bens finais e equipamentos.
	Cadeia Produtiva			
	Modelo de Negócio			
	Incentivo não fiscal			
Regulação	Regulação	Definição de modelo nacional para emissão de permissões e certificados, capazes de gerar ambiente de alta confiança no mercado. Definido processos para registro de projetos e emissão de certificados.	Instrumento de certificação é aceito amplamente na sociedade e é utilizado como mecanismo para a eletrificação na indústria e para adoção de processos de maior eficiência energética.	Mercado de carbono é amplamente aceito na sociedade e se consolida como importante instrumento para alavancar exportações do Estado de São Paulo.
	Alinhamento Regulatório			
Planejamento	Gestão	Definição de metas e mecanismos de acompanhamento e monitoramento. Atividades de disseminação periódica sobre tecnologias, metas, emissões, resultados alcançados e alternativas tecnológicas.	Engajamento do setor privado e sociedade incluindo consumidores baixa renda, tornando o consumo energia mais eficiente e com menor emissão. Cooperação internacional para dimensionar conteúdo de emissões de CO <sub>2</sub> são importante mecanismo para monitoramento no Estado.	Participação ativa do setor privado e sociedade na aplicação de alternativas de menor emissão e adoção de opções com menor consumo.
	Monitoramento			
	Disseminação			

Fonte: Elaboração Própria

## Setor de Transportes

A Figura 139 mostra um resumo dos resultados e impactos dados pelo no segmento de Transporte.

Figura 139 - Resumo dos resultados e impactos do setor de transportes

	2023	2030	2040	2050
<b>Resultados</b>				
Consumo Energ. (10 <sup>6</sup> tep) Crescimento (%) (ref. 2023)	21,8 -	21,9 (2,7%)	22,4 (12,7 %)	23,1 (24,3 %)
% Energia Renovável	20,89%	29,22%	41,25%	51,21%
<b>Destaques</b>				
<b>Impactos</b>				
Emissões (%) (ref. Linha de base)	-	-12,26%	-39,88%	-66,76%

Fonte: Elaboração própria.

Figura 140 – Roadmap para o setor de Transportes

Eixo	Macro Ação	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Tecnologia	PD&I	<p>P&amp;D e Normatização para atingir nível TRL alto e viabilizar produção nacional de equipamentos e tecnologias.</p> <p>Capacitação de profissionais, incluindo os que já estão no mercado de trabalho, para atuar em alternativas tecnológicas e novos combustíveis.</p> <p>Formação direcionada para novas tecnologias, em especial biometano, hidrogênio e eletrificação, além de Bio-QAV.</p>	<p>Avanços nos TRL. Atinge produção em escalas viáveis de equipamentos e tecnologias prevista para atender ao aumento do consumo de combustíveis de baixo carbono, ao passo que há redução de combustíveis fósseis.</p> <p>Identificação de melhorias nas soluções tecnológicas e suas respectivas padronizações.</p> <p>Geração distribuída ultrapassa a demanda elétrica para mobilidade.</p> <p>Resultados substanciais são vistos na produção de hidrogênio e biometano.</p>	<p>Desenvolvimento tecnológico tem efeitos sobre toda a cadeia produtiva para mobilidade.</p> <p>Consumo para de hidrogênio para mobilidade se equipara ao de Gás Natural e Biometano.</p> <p>GD e Projetos de biometano de pequena escala estão difundidos em todo o Estado e em diversos setores.</p>
	Capacitação			
	Normatização			
	Programas Específicos			
Infraestrutura	Recondicionar	<p>Renovação da frota de veículos utilizada por prestadores de serviço de transporte para o Governo de São Paulo.</p> <p>Ampliação da oferta de GN a partir do acesso aos dutos e terminais de GNL.</p> <p>Desenvolvimento de infraestrutura de recarga pública lenta e rápida dá os primeiros passos.</p> <p>Compras públicas e renovação de contratos de concessão buscando renovar frota com veículos movidos a combustíveis alternativos e de menor emissão.</p>	<p>Frotas de concessões e dos governos estadual e municipais amplamente renovados. Renovação de frotas de veículos urbanos particulares.</p> <p>Veículos de passeio movidos a combustíveis alternativos se tornam comuns e compõem maior parte dos lançamentos da indústria.</p>	<p>Frota de veículos totalmente renovada com baixa participação de combustíveis fósseis.</p>
	Otimizar			
	Ampliação da Infraestrutura			

Eixo	Macro Ação	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Mercado	Incentivo Fiscal	Criação de incentivos fiscais tornam tecnologias estratégicas alternativas mais competitivas, viabilizando o desenvolvimento tecnológico e da cadeia produtiva e substituição da frota privada. Linhas de financiamento a concessionárias de transporte incentivam a cadeia produtiva e renovação da frota. Incentivos à produção de hidrogênio e biometano são fundamentais para fomento da cadeia produtiva.	Cadeia produtiva do biogás/biometano e Hubs de bioenergia estabelecidos em todo o Estado. Cadeia produtiva para mobilidade sustentável ganha competitividade na produção de equipamentos e sistemas. Incentivos fiscais continuam a fortalecer a adoção opções tecnológicas de baixa emissão.	Incentivado pelo desenvolvimento tecnológico dentro do Estado de São Paulo, cadeia produtiva é competitiva nacionalmente e internacionalmente, propiciando a exportação de bens finais e equipamentos. Algumas cadeias produtivas já não necessitam de incentivos fiscais.
	Cadeia Produtiva			
	Modelos de Negócio			
	Incentivos não fiscais			
Regulação	Regulação	Quotas de veículos movidos a combustíveis de baixa emissão no transporte público e frota do governo. Definição de atributos ambientais na aquisição de biometano por parte das concessionárias de energia e de distribuição de gás.	Frotas de concessões, do governo estadual e municipais amplamente renovados. Harmonização regulatória permite o amplo acesso à rede de distribuição gasífera. Criação de zonas azuis limitam acesso de veículos de logística e particulares movidos a combustíveis fósseis.	Regulação estrita sobre mobilidade de estradeiros e veículos pesados movidos a combustíveis fósseis.
	Gestão	Definição de metas e mecanismos de acompanhamento e monitoramento. Atividades de disseminação periódica sobre tecnologias, metas, emissões, resultados alcançados e alternativas tecnológicas. População começa a reconhecer o papel e possibilidades associadas a bioenergia. Planejamento da infraestrutura gasífera, ampliando acesso do biometano e hidrogênio.	Profundo engajamento do setor privado e sociedade no atingimento de metas de emissão, com reflexo na substituição da frota privada por veículos movidos a combustíveis de baixa emissão. Metas de emissão e eficiência energética se tornam mais agressivas e guiam as atividades públicas e privadas em torno do tema de transporte. Substancial redução das emissões no setor de transportes.	Participação ativa do setor privado e sociedade na aplicação de alternativas de menor emissão e adoção de opções com menor consumo. Metas levam a substituição quase que completa de combustível fósseis por alternativas de baixa emissão.
Disseminação				

Fonte: Elaboração própria.

## Setor de Energia Térmica e Combustíveis

A Figura 141 mostra um resumo dos resultados e impactos dados pelo no segmento de Transporte.

Figura 141 - Resumo dos resultados e impactos do setor de Energia Térmica e Combustíveis

	2023	2030	2040	2050
<b>Resultados</b>				
Consumo Energ. (10 <sup>6</sup> tep) Crescimento (%) (ref. 2023)	30,0 -	31,0 (3,21%)	32,4 (7,93%)	32,8 (9,22%)
% Energia Renovável	62,25 %	56,03 %	50,95 %	50,34%
<b>Destaques</b>	Redução expressiva no uso de bagaço de cana de açúcar, suportado pelo crescimento do fornecimento de biometano, gás natural e diesel verde			
<b>Impactos</b>				
Emissões (%) (ref. Linha de base)	-	-2,89%	-1,97%	-17,95%

Fonte: Elaboração própria

Figura 142 – Roadmap do setor de Energia Térmica e Combustíveis

Eixo	Macro Ação	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Socioambiental	Gestão de Resíduos	Fortalecimento da captura e uso de metano gerado em aterros, incluindo efluentes líquidos urbanos e resíduos do agro. Definição de instrumentos fiscais, compras públicas e padrões.	Projetos de recuperação energética a partir de efluentes e resíduos estão difundidos em todo o estado, com grande participação da agropecuária e agroindústria.	Projetos de recuperação energética são prática comum e exigida em todos os aterros sanitários e projetos da agropecuária e agroindústria no Estado de São Paulo. Geração energética se torna fundamental fonte de receita para os respectivos setores.
Tecnologia	PD&I	P&D e Normatização para atingir nível TRL alto e viabilizar produção nacional de equipamentos e tecnologias. Capacitação de profissionais, incluindo os que já estão no mercado de trabalho, para atuar em alternativas tecnológicas e novos combustíveis. Formação direcionada para novas tecnologias, em especial biometano e diesel verde.	Avanços nos TRL. Atinge produção em escalas viáveis de equipamentos e tecnologias prevista para atender ao aumento do consumo de combustíveis de baixo carbono, ao passo que há redução de combustíveis fósseis. Identificação de melhorias nas soluções tecnológicas e suas respectivas padronizações.	Mercado consolidado absorvendo avanços e melhorias das tecnologias planejadas para o período. Aprofundamento da redução do consumo e emissões, impulsionado pela substituição do Diesel e GLP por biometano e Diesel verde, além de grande redução no uso de bagaço de cana.
	Capacitação			
	Normatização			
	Programas Específicos			
Infraestrutura	Recondicionar	Ampliação da oferta de GN a partir do acesso aos dutos e terminais de GNL. Ampliação da malha de gás proporcionando mix de gás de baixo carbono. Promoção de usinas híbridas, se beneficiando de infraestrutura de rede já existente, e fortalecendo a biomassa, gás natural e hidrogênio.	Ampliação da infraestrutura gasífera é orientada pelos potenciais de fornecimento de biometano e hidrogênio. Estrutura portuária preparada para exportação de novos combustíveis.	Infraestrutura viabiliza rápido decréscimo do consumo de óleo diesel e crescimento e fortalecimento do fornecimento de biometano, diesel verde e hidrogênio.
	Otimizar			
	Ampliação da infraestrutura			

Elaboração própria

Eixo	Macro Ação	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Mercado	Incentivo Fiscal	<p>Desenvolver mecanismos de certificação. Incentivos fiscais à produção de máquinas e equipamentos da cadeia de bioenergia e hidrogênio. Incentivos à produção de hidrogênio e biometano são fundamentais para fomento da cadeia produtiva. Desenvolver cadeia produtiva de sistemas de aquecimento de água, cogeração e refrigeração a gás. Estabelecer leilões de EE para o biogás.</p>	<p>Rápida ampliação do consumo do diesel verde e biometano e redução do bagaço de cana é suportado pelas medidas de desenvolvimento da cadeia produtiva. Digitalização da indústria promove competitividade e diagnóstico do consumo que permite ganhos de eficiência energética.</p>	<p>Incentivado pelo desenvolvimento tecnológico dentro do Estado de São Paulo, cadeia produtiva é competitiva nacionalmente e internacionalmente, propiciando a exportação de bens finais e equipamentos.</p>
	Cadeia Produtiva			
	Modelo de Negócio			
	Incentivo não fiscais			
Regulação	Alinhamento Regulatório	<p>Impor captura de carbono para novas térmicas ainda não contratadas. Definição de atributos ambientais na aquisição de biometano por parte das concessionárias de energia e de distribuição de gás.</p>	<p>Permissões e certificação de emissões tem processo bem estabelecido e confiança do setor privado e sociedade civil.</p>	<p>Mercado de carbono é amplamente aceito na sociedade e se consolida como importante instrumento para alavancar exportações do Estado de São Paulo.</p>
	Regulação			
Planejamento	Gestão	<p>Definição de metas e mecanismos de acompanhamento e monitoramento. Atividades de disseminação periódica sobre tecnologias, metas, emissões, resultados alcançados e alternativas tecnológicas. População começa a reconhecer o papel e possibilidades associadas a bioenergia. Elaboração do Plano Estadual de Hidrogênio e do Plano Estadual de biogás e biometano.</p>	<p>Elaborado o Plano de Pequenas Centrais Nucleares. Engajamento da população na cobrança por atingimento de metas de emissões.</p>	<p>Participação ativa do setor privado e sociedade na aplicação de alternativas de menor emissão e adoção de opções com menor consumo. Metas levam a substituição quase que completa de combustível fósseis por alternativas de baixa emissão.</p>
	Monitoramento			
	Disseminação			

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 16. Plano de Ações para o Eixo Socioambiental

SocioAmbiental							
MA	CD	Título	Descrição	Área	EE	T	C
Gestão da Água	A1	Armazenamento para Usinas Hidroelétricas	Adição de armazenamento às usinas hidrelétricas existentes para minimizar o efeito da variabilidade mais intensa das chuvas	Mudanças Climáticas, Hidro	✓		
	A2	Reuso de águas em prédios públicos	Criar obrigatoriedade de reuso de água em edificações no Estado.	Eficiência Energética	✓		
Gestão de Resíduos	A3	Captura de gases gerados em aterros sanitários para fins energéticos	Promover captura e uso de metano gerados em aterros e estações de tratamento de efluentes para fins energéticos, o que inclui efluentes líquidos urbanos (esgoto).	Resíduos, Biomassa, Biogás, Biometano	✓		✓
	A4	Recuperação energética de resíduos agropecuários e agroindustriais	Promover mecanismos que favoreçam a de resíduos agropecuários e agroindustriais.	Biogás, Biometano	✓		✓

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 17 Plano de Ações para o Eixo Tecnologia e Inovação

Tecnologia e Inovação							
MA	CD	Título	Descrição	Área	EE	T	C
PD&I	B5	P&D para soluções tecnológicas	Direcionar recursos de P&D do Estado de São Paulo, com apoio da FAPESP, para áreas estratégicas com foco na descarbonização do Estado, e por meio de parcerias entre setor privado e parques tecnológicos/ICTs, inclusive por meio da Embrapii.	Solar flutuante, tecnologias para viabilizar toda a cadeia (extração, produção, armazenamento, condicionamento, distribuição/ transporte e consumo) de gases de baixa pegada de carbono (H <sub>2v</sub> , NH <sub>3</sub> , Biometano, sintéticos como o bioGLP e GLP renovável, entre outros comprovadamente com menor emissão), de combustíveis para aviação (SAF/LCAF e biocombustíveis), sistemas de armazenamento, mobilidade Elétrica, eficiência energética, novas tecnologias, Eólica Offshore (Piloto de médio porte), biogás e biometano.	✓	✓	✓
	B6	Cooperação Nacional e Internacional para P&D	Acordos de cooperação nacional e internacional para pesquisa, desenvolvimento e implantação de tecnologias que contribuam para a maior adoção do biometano	GN, Biometano, Hidrogênio, Sintéticos, SAF/LCAF e biocombustíveis	✓	✓	✓

			e demais combustíveis de baixo carbono, e do GN/GNC/GNL como combustível de transição e indutor de demanda.			
	B 7	Formação de HUBS	(i) Articular junto ao sistema de inovação público e privado do Estado a formação de pessoal e de hubs de competência para a transição energética no transporte, incluídos o desenvolvimento focado em oferta e usos de biocombustíveis, combustíveis sintéticos, hidrogênio, combustíveis para aviação e setor marítimo. (ii) Promover a criação de hubs de bioenergias, com vocações regionalizadas a partir de grandes geradores de biomassa.	Mobilidade sustentável; Biomassa, Resíduos, biocombustíveis		✓
Capacitação	B 8	Capacitação para tecnologias estratégicas	Alinhar a criação de cursos técnicos e de graduação pelas instituições públicas alinhadas às demandas do setor produtivo voltada às tecnologias estratégicas. Adicionalmente incentivar cursos e treinamentos providos pelo terceiro setor.	Mobilidade sustentável; Biogás/biometano, outros biocombustíveis; Energias Renováveis; Novas Tecnologias de Geração e Armazenamento de Energia; operação e manutenção de sistemas de aquecimento de água, cogeração e refrigeração a gás.	✓	✓
	B 9	Cooperação internacional	Promover a articulação internacional do Estado de SP para as inovações disruptivas na área de combustíveis voltados a transporte e logística de baixa emissão, incluindo a produção, captura de carbono e sistemas avançados de armazenamento e transporte de energéticos.	Mobilidade sustentável	✓	✓
	B 10	Capacitação da cadeia produtiva	Divulgação de conhecimentos técnicos sobre biogás e biometano e outras rotas tecnológicas buscando evidenciar a curva de aprendizagem das diferentes tecnologias;	Biomassa, Desenvolvimento regional, socioambiental	✓	✓
Normatização	B 11	Normatização	Identificar especialistas e criar grupos técnicos, junto à ABNT, para acelerar o processo de normatização e regulamentação de novas tecnologias no Estado.	Novas tecnologias; Eletromobilidade (Sistemas de cobrança da rede de recarga de veículos elétricos, interoperabilidade)	✓	✓
as específicas	B 12	Eficientização de Prédios Públicos	Desenvolver programa de efficientização dos prédios públicos do Estado.	Eficiência energética	✓	✓

B 1 3	Programa de fomento a adoção de gás de baixa emissão nos prédios públicos	Fomento à aquisição de energia elétrica gerada a partir de GN/biogás/bioeletricidade em prédios públicos, e difusão de conhecimento sobre viabilidade e retorno de investimento dos projetos.(ii) Instalação de um sistema distritais de energia para um conjunto de prédios públicos e Política de financiamento e redução de tributos para a difusão de sistemas distritais de energia a gás natural/biometano. (iii) Adoção de cogeneradores a gás para prédios públicos com alta demanda térmica (Hospitais, UPAs e afins). (iv) Difusão de conhecimento sobre viabilidade e retorno de investimento dos projetos, através de cartilhas voltadas para pequenos e médios produtores; Designação pelo Estado de instituição de coordenação das iniciativas de geração, divulgação e disseminação de conhecimento.	GN e Biometano; Eficiência e segurança energética; desenvolvimento regional.	✓		✓
B 1 4	Programa de Substituição de Chuveiros Elétricos	Desenvolver programa para substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares com complementação elétrica por chuveiros eletronicamente controlados;	Eficiência energética	✓		
B 1 5	Programa de Medição Inteligente	Desenvolver política local específica de incentivo a implementação de programa de implantação massiva da Medição Inteligente, opções de tarifas e progressiva oferta de Resposta a Demanda.	Resposta da Demanda e tarifas inteligentes, eletromobilidade.	✓	✓	✓
B 1 6	Programa de implantação de REDs, especialmente armazenamento de energia	Atuação do ESP como <i>stakeholder</i> na elaboração de um plano estratégico para a inserção de REDs, considerando os resultados da Tomada de Subsídios (TS) nº 011/2021 da ANEEL, de forma a suprir necessidade crescente de flexibilidade sistêmica para garantir confiabilidade de suprimento	Resposta da Demanda e Recursos Energéticos Distribuídos, eletromobilidade	✓	✓	✓
B 1 7	Projetos de biogás de pequena e média escala	Estímulo a implantação de projetos de biogás em pequena e média escala, em propriedades rurais, criando soluções integradas de gestão de resíduos e aproveitamento energético.	Biomassa, Socioambiental, Desenvolvimento Regional, Mobilidade sustentável.	✓	✓	✓
B 1 8	Gestão de energia em prédios públicos	Implementar sistema de gestão de energia em prédios públicos.	Eficiência energética	✓		✓
B 1 9	Desenvolvimento tecnológico para H2 e combustíveis renováveis	Subsídio financeiro à produção de H2 ou novos combustíveis renováveis, em especial nas fases iniciais de maturidade tecnológica.	H2, combustíveis renováveis	✓	✓	✓
B 2 0	Estímulo a projetos de captura de carbono	Ampliar projetos que contribuam para o aumento da viabilidade de tecnologias de captura de carbono e mitigação das emissões de GEE em fontes estacionárias de difícil abatimento das emissões, incluindo a construção de uma rede de	GN e Biocombustíveis e Hidrogênio	✓		

			gasodutos para transporte de CO <sub>2</sub> até o local de armazenamento			
B 2 1	Plano MMGD		Atuação do ESP como <i>stakeholder</i> em definições sobre valoração dos custos e benefícios de MMGD, modernização do SEB, implementação de redes inteligentes e incorporação do papel ativo do consumidor.	Resposta da Demanda e Recursos Energéticos Distribuídos	✓	
B 2 2	Programa para a Expansão de Mini, MMGD e APE		Promover a expansão de Microgeração Distribuída (MMGD) e APE (Autoprodução de Energia) baseadas em UFVs, o uso de SAEB e a participação em RD.	Resposta da Demanda e Recursos Energéticos Distribuídos	✓	

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 18 Plano de Ações para o Eixo Infraestrutura

Infraestrutura							
MA	CD	Título	Descrição	Área	EE	T	C
Recondicionar	C23	Renovação do Parque de Iluminação Pública	Estimular a renovação do parque de iluminação pública dos municípios do Estado com linhas de financiamento incentivadas às PPPs.	Eficiência energética	✓		
	C24	Plano de Aperfeiçoamento da Infra. Portuária	Desenvolver Plano de Aperfeiçoamento da Infraestrutura Portuária contemplando atividades da Eólica Offshore e Produção de Hidrogênio Verde.	Eólica offshore, Hidrogênio	✓		
	C25	Política Estratégica para Promoção de Usinas Híbridas	Estabelecer Política Estratégica Estadual para a Promoção das Usinas Híbridas, utilizando a infraestrutura de rede já disponível, buscando minimizar conflitos oriundos dos usos múltiplos (em especial com navegação fluvial), com foco nas associações: Usinas Hidrelétricas com Usinas Solares Fotovoltaicas (fixas ou flutuantes); Usinas a Biomassa com Usinas Solares Fotovoltaicas; Usinas a Biomassa e Gás Natural; Usinas Solares Fotovoltaicas com Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE). Estabelecer mecanismos de incentivos e de contratação de energia proveniente de Usinas Híbridas (Leilões regionais).	Usinas Híbridas; Hidro; Biomassa	✓		✓
	C26	Renovação da frota do GOVSP	(i) Articular em parceria com a iniciativa privada e prestadores de serviço do GOVSP, a adoção de veículos de baixa emissão, utilizando a política pública da Cidade de São Paulo como referência.	Mobilidade sustentável	✓	✓	
Otimizar	C27	Compartilhamento de Infra. energia e telecom	Incentivar Elétricas e Operadoras de telecomunicações a aumentar o compartilhamento de infraestruturas no Estado de São Paulo	Resposta da Demanda	✓		
	C28	Facilitar acesso aos dutos de GNL	Facilitar o acesso aos dutos e/ou terminais de GNL (existentes ou em desenvolvimento) e Imposição de limites à reinjeção de GN associado nas zonas de E&P de petróleo e gás do pré-sal da Bacia de Santos para estimular a ampliação da oferta de GN;	GN	✓	✓	✓

	C29	Otimização da infraestrutura Gasífera	Otimização da infraestrutura gasífera, a partir do potencial de oferta de biometano, permitindo a criação de “clusters” energéticos, tendo os gases combustíveis como âncoras, que podem ser movimentadas através de múltiplos modais para atender consumidores de difícil acesso, como os caminhões e trens que operam no Estado e fazem uso de infraestrutura de rodagem;	GN, biometano e hidrogênio	✓		✓
	C30	Visão multimodal	Incorporação de uma visão multimodal, concebendo soluções alternativas de suprimento via gasodutos, mas também via sistemas a granel de pequena escala de GNC e GNL, alinhado com o Plano de Logística e Investimento da SEMIL.	GN e combustíveis	✓	✓	✓
	C31	Redução de vazamentos e queima de gás	Promover a redução da ocorrência de vazamentos de metano e queima do gás ( <i>flaring</i> ) para descarbonização da cadeia de distribuição de gás natural e produção de derivados de petróleo.	Combustíveis	✓		
Ampliar	C32	Expandir malha de gás incorporando um mix gás de baixo carbono para acessar novas ofertas	Fomentar a rede de distribuição de gás de baixo carbono por meio de mecanismos de incentivos diretos ou indiretos. Elaboração de mecanismos que possibilitem a maximização da inserção do biometano nos sistemas de distribuição e/ou transporte de gás existentes. Inclui abastecimento veicular de gases de baixa emissão	Biomassa, biometano, GN; Hidrogênio; sintéticos	✓		✓
	C33	Infra. de recarga elétrica pública	Incentivar o Investimento na infraestrutura de recarga pública lenta e rápida.	Eletromobilidade	✓	✓	
	C34	Implantação de Armazenamento de Energia	Desenvolver incentivos à implantação de Armazenamento (BECCS/CCS) de Energia no Estado de São Paulo;	Resposta da Demanda; Usinas Híbridas	✓		✓
	C35	Criação de corredores azuis	Instalação de corredores azuis de transporte de cargas associada a difusor da tecnologia abastecimento no setor	GN		✓	

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 19 Plano de Ações para o Eixo Mercado

Mercado								
MA	CD	Título	Descrição	Área	EE	T	C	
Incentivo Fiscal	D36	Isenção tributária de máquinas e equipamentos	Redução da carga tributária sobre máquinas e equipamentos utilizados na cadeia de produção para geração de bioenergia e Hidrogênio.	Biomassa e Hidrogênio	✓		✓	
	D37	Instituir taxa sobre geração termelétrica com elevada emissão	Adoção de taxação da geração termelétrica à diesel, óleo combustível e carvão mineral no estado, definindo metas para a substituição desta geração de energia de emergência pelo gás natural, biometano ou combustíveis de baixo carbono.	Emissões	✓		✓	

Cadeia Produtiva	D38	Digitalização da Indústria.	Instituir Programa de Digitalização da Indústria, com foco sistemas de gestão de energia e mecanismos de monitoramento e controle do consumo energético nos usos finais em diferentes setores da economia.	Novas tecnologias	✓		✓
	D39	Fomentar cadeia produtivas estratégicas	Mapear e Estimular via compras públicas, incentivos diversificados as cadeias produtivas estratégicas no âmbito do plano em consonância com os planos e programas traçados: bioenergia com destaque ao biogás/biometano; eletromobilidade; eólica; aquecimento de água, cogeração e refrigeração a gás;	Bioenergia; eletrificação; eletromobilidade; eficiência energética	✓	✓	✓
Modelo de negócio	D40	Transição da frota de comerciais leves e de logística; e caminhões urbanos e estradeiros	Articular com Municípios e iniciativa privada, a adoção progressiva de veículos de logística urbana com zero ou baixa emissão: (i) Comerciais leves e de logística; (ii) caminhões urbanos . (iii) caminhões estradeiros.	Mobilidade sustentável; GN; Biometano; eletrificação; H2	✓	✓	
	D41	Leilões de EE para o biogás	Criar produtos específicos para o biogás nos leilões de energia elétrica do mercado regulado, que considerem os atributos sistêmicos e ambientais da fonte.	Biomassa, Biogás, Biometano	✓		✓
	D42	Instituir Taxa de emissão de Carbono	Instituir Taxa de Emissão de Carbono	H2 e energias de baixo carbono, meio ambiente, mercado	✓	✓	✓
	D43	Criação de fundo de suporte ao mecanismo de créditos de carbono	Criação de fundo garantidor para aquisição de crédito de carbono proveniente da produção de gases de baixo carbono	Emissões	✓		
	D44	Incentivos para produção de H2 de baixo carbono	Otimização da produção associada a infraestrutura para conexão da oferta de H2, permitindo a criação de “clusters” energéticos.	H2 de baixo carbono	✓	✓	✓
	D45	Concessão de coleta de resíduos	Articular junto a Municípios, em especial nas Regiões Metropolitanas do Estado, o desenvolvimento e adoção de modelo de concessão e custo operacional do transporte de baixo carbono para coleta de resíduos sólidos.	Mobilidade sustentável	✓	✓	
	D46	Contratação de Usinas Híbridas	Estabelecer mecanismos de incentivos e de contratação de energia proveniente de Usinas Híbridas (Leilões regionais).	Usinas Híbridas	✓		
Incentivos não fiscais	D47	Inserção da bioenergia	Promoção de mecanismos de incentivo para a inserção da bioenergia, tais como linhas de financiamento dedicada/subsidiada	Biomassa, Biocombustíveis	✓		✓
	D48	Gás natural, biometano e H2 como matéria prima	Fomentar a utilização de gás natural e gases renováveis como matéria prima, ampliando fontes de financiamento e estabelecendo incentivos fiscais para substituição de combustíveis poluentes	GN e Biometano e H2			✓

D49	Financiamento para áreas estratégicas	Articular junto a entes financeiros nacionais e internacionais a viabilização de financiamentos para: (i) as concessionárias de transporte público, visando a renovação da frota de ônibus Municipais e metropolitanos e frota de ônibus rodoviários. (ii) produção de bioenergia.	Eletromobilidade	✓		✓
D50	Quotas de veículos movidos a combustíveis de baixa emissão no transporte público e frota do governo	Impor percentual de compras ou concessão da frota do governo	H2, biogás, eletromobilidade		✓	
D51	Quotas de veículos movidos a combustíveis de baixa emissão no transporte público e frota do governo	Impor percentual de compras ou concessão da frota do governo	H2, biogás, eletromobilidade		✓	

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 20 Plano de Ações para o Eixo Mercado

Regulação							
MA	CD	Título	Descrição	Área	EE	T	C
Regulação	E52	Atributos ambientais para biometano	Definir atributos ambientais na aquisição de biometano por parte das concessionárias de energia das concessionárias de distribuição de gás.	Biomassa, biocombustíveis, Resíduos	✓		✓
	E53	Aprimoramentos regulatórios das usinas híbridas	Promover aprimoramentos regulatórios à Resolução Normativa ANEEL Nº 954 (30 de novembro de 2021): (i) garantia física; (ii) despacho (otimização local); (iii) oferta de serviços ancilares e de capacidade; (iv) comercialização para projetos híbridos com armazenamento (atuação como carga e geração).	Usinas Híbridas	✓		
	E54	Fiscalização de permissões e certificados	Criar regulação para que o processo de permissão de acreditadores para atuar de forma regulamentada no estado para emissão de permissões e certificados de emissões evitadas seja adequadamente controlada e fiscalizada	Mecanismos de Mercado	✓	✓	✓
	E55	Instituir limites de emissões	Estabelecer limites para emissões, em especial de geradores em zonas urbanas.	Emissões	✓		✓

	E56	Cadeia de produção local de SAF/ LCAF e sintéticos	Estudos iniciais, envolvendo parceria com iniciativa privada, para a definição e construção dos parâmetros de processos produtivos dos combustíveis de aviação de baixa emissão, para futura elaboração de normas e regulação, como SAF (Sustainable Aviation Fuel) / LCAF (Lower Carbon Aviation Fuels) e sintéticos	Mobilidade sustentável		✓	
Alinhamento Regulatório	E57	Harmonização regulatória	Promover a interação do órgão regulador estadual (ARSESP) com a ANP para se evitar conflitos regulatórios desnecessários e que podem inibir a evolução da comercialização de biometano e outros insumos que se qualifiquem para movimentação nas redes de distribuição de gás.	GN	✓	✓	✓
Renovação da Frota	E58	Renovação da frota de ônibus municipais e metropolitanos e ônibus rodoviário	(i)Articular junto a Municípios, em especial nas Regiões Metropolitanas do Estado, o desenvolvimento e adoção de modelo de concessão e custo operacional do transporte coletivo urbano e metropolitano de baixo carbono, utilizando a política pública da Cidade de São Paulo como referência. (ii)Desenvolvimento e adoção de modelo de concessão e custo operacional do transporte coletivo rodoviário intermunicipal e interestadual de baixo carbono, articulando também junto ao poder concedente federal e Municípios onde cabível.	Mobilidade sustentável; GN e biometano;		✓	
	E59	Renovação da frota hidroviária	Articular em parceria com iniciativa privada, a adoção de combustíveis de baixa e zero emissão para o transporte hidroviário	Mobilidade sustentável		✓	

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 21 Plano de Ações para o Eixo Planejamento

Planejamento								
MA	CD	Título	Descrição	Área	EE	T	C	
Gestão	F60	Acreditação	Montar estrutura com cooperação nacional e internacional para dimensionar o conteúdo de emissão de CO <sub>2</sub> e outros gases de efeito estufa (sistema de credenciamento de entidades) nos vários processos da atividade econômica e social para servir de dados de mensuração do processo de descarbonização do Estado de São Paulo.	Certificação de emissões	✓	✓	✓	
	F61	Plano de Pequenas Centrais Nucleares	Desenvolver um plano de implantação de PCN buscando sinergias com as demais estruturas nucleares já concebidas no Estado. O Plano deve incluir a estratégia tática para certificar, ao longo do horizonte do PEESP 2050, pelo menos um design padrão de PCN, que poderá ser replicável para módulos padronizados do mesmo design.	Energia Nuclear	✓			
	F62	Plano estadual de energia de baixo carbono para mobilidade	(i) Desenvolver políticas locais e municipais com o intuito de incentivar a compra de veículos movidos a energias alternativas com padrões de emissões definidos pelo PROCONVE. (ii) Desenvolver a cadeia produtiva, sistemas eletroeletrônicos, infraestrutura de carregamento e serviços de automação e controle e sistemas associados voltados a zero emissão. (iii) Desenvolvimento de novos modelos de negócio, tecnologias, serviços, sistemas, plataformas, não contemplados pela cadeia nacional especialmente para a eletromobilidade;	Eletromobilidade; Combustíveis alternativos e GN		✓		
	F63	Plano Estadual de Hidrogênio	Criação do Plano Estadual de Hidrogênio com a participação da de especialistas, gestores, empresas, universidades, ICTs .	Hidrogênio	✓	✓	✓	
	F64	Divulgação de Metas operacionais	(i) Estabelecer as metas temporais da implantação dos mecanismos de mercado e as metas de indicadores de redução de emissões atribuídas a esta vertente; (ii) Estabelecer metas de emissões para contribuir com a melhoria da qualidade do ar em regiões portuárias, por meio de adoção voluntária de metas de restrição de emissões de NOx e SOx, seguindo as práticas do Anexo VI do MARPOL (iii) Estabelecer metas crescentes nos padrões de eficiência energética (iv) Articular com entes públicos a adoção integradas das políticas, metas, programas e leis voltadas para a descarbonização do setor de transportes do Estado	Mobilidade sustentável, biomassa, combustíveis de baixa emissão, eficiência energética, emissões	✓	✓	✓	

	F65	Plano estadual de biogás e biometano	(i) Elaboração de planos/diretrizes para atração da indústria com vistas a desenvolver a cadeia produtiva em nível estadual (exemplo, fabricação de biodigestores, membranas de purificação, equipamento de análise e monitoramento de gases, gaseificadores, etc.); (ii) Estímulo à compra e manutenção de ativos, ao longo da vida útil das plantas, não apenas no período de sua implantação, para desenvolvimento da cadeia produtiva biogás/ biometano, considerando a fabricação e manutenção de equipamentos necessários para a produção do recurso. (iii) Modelar novos equacionamentos econômicos para o biometano disponível tanto nas grandes plantas produtoras como nas unidades de menor escala.	Biomassa, biometano, derivados	Biocombustíveis, GN/Petróleo e	✓		✓
Monitoramento	F66	Mapeamento Eólica Offshore	(i) Promover Programa de Monitoramento de Dados e Pesquisas Técnicas para Mapeamento do Potencial Eólico Offshore no Estado. (ii) Mapear cadeia de suprimento para promover-sinergias entre a Eólica Offshore e a cadeia de suprimento da Eólica Onshore, da indústria de Óleo e Gás e de outras atividades correlatas.	Eólica offshore		✓		
	F67	Criação do Observatório	Divulgar Inventários de emissão periódicos para o ESP. Criação de grupos de acompanhamento continuado e difusão de resultados e metas, além de alternativas tecnológicas e normas.	Balço de Emissões, meio ambiente, Mobilidade sustentável, biomassa, combustíveis de baixa emissão, eficiência energética, emissões		✓	✓	✓
Disseminação	F68	Política de comunicação e percepção pública sobre tecnologias para o setor de energia prioritárias	Promover a conscientização da sociedade paulista, de forma transparente, a respeito: (i) dos benefícios do uso do gás natural e do biometano e das medidas que permitam o seu emprego de forma segura. (ii) dos benefícios do uso da captura e armazenamento de carbono e das medidas que permitam o seu emprego de forma segura. (iii) dos benefícios do uso da energia nuclear e das medidas que permitam o seu emprego de forma segura. (iv) mudanças climáticas, informando a a população sobre o que são as causas das mudanças climáticas e o impacto nas suas vidas. (v) Ação de conscientização de consumidores de todos os setores e disseminação do conceito de uso racional e eficiente de energia no Estado	GN, Petróleo e Derivados, Biometano, Hidrogênio, Sintéticos; Energia Nuclear; mudanças climáticas; Eficiência energética		✓		✓
	F69	Política de comunicação do governo sobre tecnologias para o setor de energia prioritárias	Política de comunicação e percepção dos três poderes do governo (executivo; legislativo; judiciário) e nas duas estâncias (municipal e estadual) sobre tecnologias para o setor de energia prioritárias	Tecnologias priorizadas; mudanças climáticas		✓	✓	✓

	F70	Programa de regularização de consumidores de baixa renda	Desenvolver programa de regularização e efficientização dos usos finais em consumidores de baixa renda.	Eficiência energética	✓		✓
	F71	Estimular Adoção de Tecnologias Estratégicas.	Conduzir avaliação tributária e ajustes necessários para garantir carga tributária favorável à adoção e uso de: (i) tecnologias estratégicas eficientes , em detrimento de tecnologias ineficientes. (ii) sistemas de cogeração a gás natural e biometano, para os segmentos industrial, comercial e residencial. (iii)Comercialização de H2V, H2A e novos combustíveis. (iv) Aquecimento de água a gás natural e biometano, em ambiente residencial, comercial e industrial; (v) difusão de geradores a gás natural / biometano. (vi) usinas híbridas, incluindo participação de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) em sua composição.	Eficiência energética; GN e Biometano:	✓		✓

Fonte: Elaboração Própria

MA – Macroação, CD – Código, EE– Energia Elétrica, T – Transporte, C – Combustíveis

## Mensuração, Relato e Verificação (MRV)

A mensuração, relato e verificação (MRV) é fundamental para a execução de qualquer planejamento e tem o objetivo de gerenciar resultados e impactos das ações propostas. Possibilita gerar informação ao tomador de decisões quanto ao processo da execução do PEE/SP 2050 possibilitando identificar ajustes necessários para o atingimento do objetivo central. Se divide em três etapas.

A primeira etapa, mensuração, tem como objetivo gerar informações com periodicidades definidas por meio de indicadores pré-estabelecidos.

(TCU; Tribunal de contas da União, 2011) define indicadores de desempenho como um número, porcentagem ou razão que mede um aspecto do desempenho, com o objetivo de comparar esta medida com metas preestabelecidas. Deve-se ressaltar que os indicadores de desempenho podem fornecer uma boa visão acerca do desempenho que se deseja medir, mas são aproximações do que realmente está ocorrendo, necessitando, sempre, de interpretação no contexto em que estão inseridos.

Segundo, os indicadores são conceituados em relação ao ciclo da política pública, ao seu papel e propriedade. No que se refere ao ciclo da política, os indicadores propostos no PEE/SP 2050 é parte da etapa de planejamento e priorização e devem ser detalhados na etapa operacional. Tem o papel de mensurar e descrever a projeção do cenário futuro proposto. Os indicadores precisam buscar as seguintes principais propriedades:

Utilidade/relevantes;	confiabilidade/válidos;
disponibilidade/mensuráveis;	simplicidade/clareza;
rastreabilidade/verificáveis.	economicidade;

A proposta no PEE/SP 2050 para MRV inicia com indicadores de resultados e impacto principais e finaliza com a proposta de um plano operacional de metas e criação do observatório, conforme as ações propostas na macroação “gestão” no eixo “planejamento” no capítulo anterior do roadmap.

A segunda etapa do processo de MRV, relato, visa divulgar as informações identificadas na fase anterior para o público interessado. A terceira etapa, verificação, é um processo periódico de replicação da metodologia por revisores, a exemplo de auditorias que possam ser desempenhadas por equipe independente, de modo a aferir confiabilidade ao apresentado.

## Indicadores de Resultados

Seguindo a definição do TCU (2011), os indicadores de resultados são métricas quantitativas que medem o resultado esperado, com o objetivo de comparar esta medida com metas preestabelecidas. São dois tipos de resultados que o PEE/SP 2050 precisa acompanhar: energia; e as ações estratégicas. O primeiro visa acompanhar os resultados principais cenarizados no plano. O segundo visa acompanhar os resultados estratégicos previstos para alcançar as projeções.

O primeiro grupo de indicadores, são números simples e com metodologia bem conhecida e aplicada pelo estado, visto que historicamente o governo de SP publica o balanço energético estadual. Precisam ser comparáveis, portanto, a proposta do PEE/SP 2050 é cada ano o estado faça um exercício decenal (plano decenal de energia do estado) e compare os resultados com os valores projetados no PEE/SP 2050.

Indicador resultado consumo:

- Consumo de energia total:
  - Objetivo: Este indicador visa mostrar a velocidade para atingir o resultado em 2050. Como o consumo é algo que gera emissão, se for maior que 1 mostra alerta e precisa rever as ações de forma a não interferir na meta de 2050. Fundamenta; este indicador ser analisado de forma conjunta com os indicadores de consumo desagregado, o indicador de acompanhamento das ações e o indicador de impacto dado pelas emissões.
  - Cálculo:
    - Indicador do consumo total do ano vigente:  $CV=C_t^B/C_t^P$ , onde:  
 $C_t^B$ = Consumo do ano vigente “t” publicado pelo balanço energético estadual;  
 $C_t^P$ =consumo cenarizado para o ano vigente “t” pelo /SP2050 (2023);
    - Indicador da média do consumo por quinquênio:  $CD=C_t^d/C_t^P$   
 $C_t^d$ = Média do consumo dos anos “t” cenarizado pelo Plano decenal estadual onde “t” varia por quinquênio no horizonte decenal projetado,  
 $C_t^P$  = Consumo médio cenarizado pelo PEE/SP 2050 (2023) dos anos “t” onde “t” varia quinquênios no horizonte projetado pelo plano decenal;
- Consumo de energia desagregado:

- Objetivo: Este indicador visa mostrar a velocidade para atingir o resultado em 2050 por segmento. Como o consumo é algo que gera emissão, se for maior que 1 mostra alerta e precisa rever as ações de forma a não interferir na meta de 2050. Fundamenta; este indicador ser analisado de forma conjunta com todos os indicadores propostos de forma a ter uma análise completa.
- Cálculo:
  - Indicador do consumo do ano vigente por segmento:  
 $CVD = C_{ts}^B / C_{ts}^P$  onde:  
 $C_{ts}^B$  = Consumo do ano vigente “t” publicado pelo balanço energético estadual no segmento “s”;  
 $C_{ts}^P$  = consumo cenarizado para o ano vigente “t” pelo PEE/SP 2050 (2023) no segmento “s”;  
 “t” varia de 2023 a 2050;  
 “s” = setor industrial; setor energético; setor residencial; setor comercial; setor público; setor agropecuário; setor de transporte; energia elétrica; importação
  - “Indicador do consumo da média do quinquênio por segmento:  
 $CD = C_{ts}^d / C_{ts}^P$   
 $C_{ts}^d$  = Média do consumo dos anos “t” no segmento “s” cenarizado pelo Plano decenal estadual, onde “t” varia por quinquênio no horizonte decenal projetado.  
 $C_{ts}^P$  = Média do consumo dos anos “t” no segmento “s” cenarizado pelo 2050 (2023), onde “t” varia por quinquênio no horizonte decenal projetado pelo plano decenal vigente;  
 “s” = setor industrial; setor energético; setor residencial; setor comercial; setor público; setor agropecuário; setor de transporte; energia elétrica; importação
- Intensidade energética:  
 Objetivo: Este indicador visa mostrar a eficiência do consumo energético no Estado. Como o consumo é algo que gera emissão, se for maior que 1 mostra alerta e precisa rever as ações de forma a não interferir na meta de 2050. Fundamental este indicador ser analisado de forma conjunta com todos os indicadores propostos de forma a ter uma análise completa. O PEE/SP 2050 prevê uma intensidade energética sempre abaixo de 1 em todos os anos de projeção.

- Cálculo: Razão entre consumo total de energia do Estado no ano vigente (publicado pelo Balanço energético estadual) pelo PIB do Estado no ano vigente (publicado no IBGE).

O segundo grupo visa monitorar os resultados estratégicos previstos para alcançar as projeções. A proposta são percentuais simples de atingimento. Para cada eixo e para cada resultado se avalia a quantidade de ações concluídas.

Indicador resultado ações estratégicas:

- Percentual de ações concluídas por eixo:
  - Objetivo: Este indicador simples visa mostrar a velocidade para atingir o resultado em 2050 por meio do monitoramento da quantidade de ações concluídas propostas por eixo. Fundamental que este indicador seja analisado de forma conjunta com os outros indicadores para uma análise conclusiva.
  - Cálculo:  $AC^E/AP^E$  onde:
    - $AC^E$  = Ações do eixo “e” concluídas
    - $AP^E$  = Ações do eixo “e” Planejadas no PEE/SP 2050 (2023)
    - E = Eixo Socioambiental; Eixo Tecnologia e Inovação; Eixo infraestrutura; Eixo Mercado; Eixo Regulação; Eixo Planejamento.
- Percentual de ações concluídas por eixo e por segmento:
  - Objetivo: Este indicador simples visa mostrar a velocidade para atingir o resultado em 2050 por meio do monitoramento da quantidade de ações concluídas propostas por eixo. Fundamental que este indicador seja analisado de forma conjunta com os outros indicadores para uma análise conclusiva.
  - Cálculo:  $AC_s^E/AP_s^E$  onde:
    - $AC_s^E$  = Ações do eixo “e” relacionadas ao segmento “s” concluídas
    - $AP_s^E$  = Ações do eixo “e” relacionadas ao segmento “s” Planejadas no PEE/SP 2050 (2023)
    - E = Eixo Socioambiental; Eixo Tecnologia e Inovação; Eixo infraestrutura; Eixo Mercado; Eixo Regulação; Eixo Planejamento.
    - “s”= setor industrial; setor energético; setor residencial; setor comercial; setor público; setor agropecuário; setor de transporte; energia elétrica; importação

Buscou-se indicadores relevantes para o monitoramento do atingimento dos resultados; simples e fáceis de mensurar, utilizando bases confiáveis e economicamente viáveis e passível de rastreabilidade.

A segunda etapa do processo de MRV, relato, visa divulgar as informações identificadas na fase anterior para o público interessado. O presente plano é uma ferramenta de relato do ponto de partida deste processo e o observatório proposto no *roadmap* visa dar periodicidade e transparência a este relato ao público especializado. O plano de comunicação, proposto na macroação “disseminação” no eixo “planejamento” do *roadmap* visa sensibilizar o público em geral às principais rotas e pontos propostos pelo PEE/SP 2050.

## Indicadores de Impacto

Os indicadores de impacto são métricas quantitativas que ajudam a monitorar o impacto desejado dos resultados do plano para o atingimento da diretriz principal, que é a contribuição na redução das emissões. Portanto, como indicador de impacto, o PEE/SP 2050 propõe o acompanhamento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas ao setor de energia e vinculadas as ações propostas pelo PEE/SP 2050.

A mensuração, relato e verificação (MRV) das emissões de gases de efeito estufa (GEE) desempenham um papel essencial no monitoramento e alcance eficaz dos objetivos de redução de emissões e cumprimento das propostas estabelecidas no presente plano. A fim de se verificar como as emissões estão evoluindo no horizonte do plano, deve-se fazer a contabilização dos consumos energéticos para que se assim possa ajustar políticas e medidas que não estejam surtindo os efeitos desejados e ampliar o investimento naquelas com maior índice de satisfação.

A mensuração das emissões de GEE é o ponto de partida. Ela envolve a coleta precisa de dados que identificam as fontes de emissões e a quantidade de gases liberados na atmosfera. Esses dados são cruciais para entender a linha de base das emissões, permitindo a definição de metas e a implementação de estratégias de redução eficazes, especialmente no contexto de uma transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

O relato das emissões é o próximo passo fundamental. As organizações devem comunicar de maneira transparente e responsável as informações sobre suas emissões de GEE. Isso não apenas fomenta a confiança entre as partes interessadas, mas também auxilia na responsabilização das metas de redução. Um relatório robusto e preciso proporcionar a base para a prestação de contas, demonstrando o compromisso da organização com a mitigação das mudanças climáticas e a transição energética.

A verificação é o terceiro pilar, sendo um processo crítico e independente que garante a confiabilidade dos relatórios de emissões. Auditores devem avaliar a conformidade das práticas de mensuração e relato com os padrões aceitos, assegurando que as informações divulgadas estejam em conformidade com a realidade. A verificação proporciona uma validação externa das ações de redução de emissões, garantindo que os resultados sejam confiáveis e que as metas sejam alcançadas.

A relação entre MRV e o sucesso de um plano de redução de emissões de GEE é inegável. A mensuração fornece os dados necessários para a formulação de metas realistas e o monitoramento do progresso. O relato cria a transparência necessária para ganhar a confiança das partes interessadas e obter apoio para as iniciativas de redução. A verificação assegura que a implementação das ações está ocorrendo de maneira eficaz, reduzindo o risco de "greenwashing" (práticas de marketing enganosas relacionadas à sustentabilidade).

Em resumo, o MRV é o alicerce sobre o qual repousa a eficácia de um plano de redução de emissões de GEE. Ele oferece uma estrutura sólida para a definição de metas, o monitoramento de progresso e a prestação de contas, desempenhando um papel insubstituível na consecução das metas climáticas e na condução da transição energética. O compromisso com práticas robustas de MRV é essencial para garantir que a redução de emissões seja alcançada de forma eficaz e transparente, promovendo um futuro mais sustentável e resiliente para todos.

## Indicadores de Processo e produto

Indicadores de processo e produto são métricas quantitativas que ajudam a monitorar o avanço de produtos ou processo importantes que vão compor o resultado e impacto principal desejado.

No capítulo de *Roadmap* foi proposto na macroação "gestão" no eixo "planejamento" a ação que é o plano operacional de metas dada por tema prioritário as mudanças cenarizadas pelo PEE/SP 2050. A definição das metas e da estruturação do observatório vão propor os indicadores de processo e produto

## Conclusões

Este Plano de Energia Estadual 2050 do Estado de São Paulo – Race to Zero (PEE/SP 2050), aponta soluções para o setor energético contribuir para a redução de emissões de GEE. Propõe mudanças com este objetivo tanto pelo lado do consumo, como pelo lado da oferta.

Do lado do consumo é necessário um forte investimento em eficiência, medições inteligentes, recursos integrados, GD e eletrificação. Percebe-se claramente a influência dos 4 Ds (Digitalização; Descarbonização; Descentralização; Diversificação) na visão do futuro em todas as áreas, por isto é fundamental a criação uma cultura no Estado por uma economia mais sustentável, que contemple estas 4 vertentes.

Vale ressaltar que esta mudança de visão deve abranger toda a sociedade, desde o consumidor, a cadeia produtiva, mas também o governo do Estado. Todavia, a grande mudança estrutural no consumo prevista no plano é no segmento de transporte onde há uma alteração significativa na composição da frota, o que gera um grande desafio para a gestão, especialmente que parte disto depende da decisão do consumidor, o que reforça a necessidade de uma mudança na cultura associadas a uma estratégia que envolve incentivos diretos e indiretos. Por este motivo ações vinculadas a criar um mercado para estas novas tecnologias, com segurança, e acelerar a curva de aprendizado de tecnologias ainda em desenvolvimento, requer ações em todos os eixos estratégicos, desde o P&D, normatização e capacitação de uma nova mão de obra até um marco regulatório, incentivos e compras públicas para acelerar a escalabilidade e reduzir custos no futuro.

Pelo lado da oferta, há também investimentos em eficiência e soluções inteligentes que contemple hibridização, soluções de armazenamentos, gestão de recursos distribuídos e tecnologias de mitigação como a captura de carbono associados a fontes de energia menos intensivas em carbono. Mas devido à forte influência da mudança estrutural no transporte, o processo acelerado de eletrificação previsto para o estado pelo plano gera a maior mudança também na oferta e na composição da sua matriz energética.

O Estado de SP possui um padrão de matriz de emissões mais parecido com o mundo do que com o Brasil. Isto se dá em função da forte participação da indústria e do transporte nas emissões. Como o foco foi reduzir os combustíveis emissores, o biogás e o GN com captura de CO<sub>2</sub> têm papel fundamental para reduzir emissões, sem comprometer a segurança energética do Estado. Portanto, o plano traz um foco na biomassa e no GN com soluções mitigadoras de captura e armazenamento de carbono.

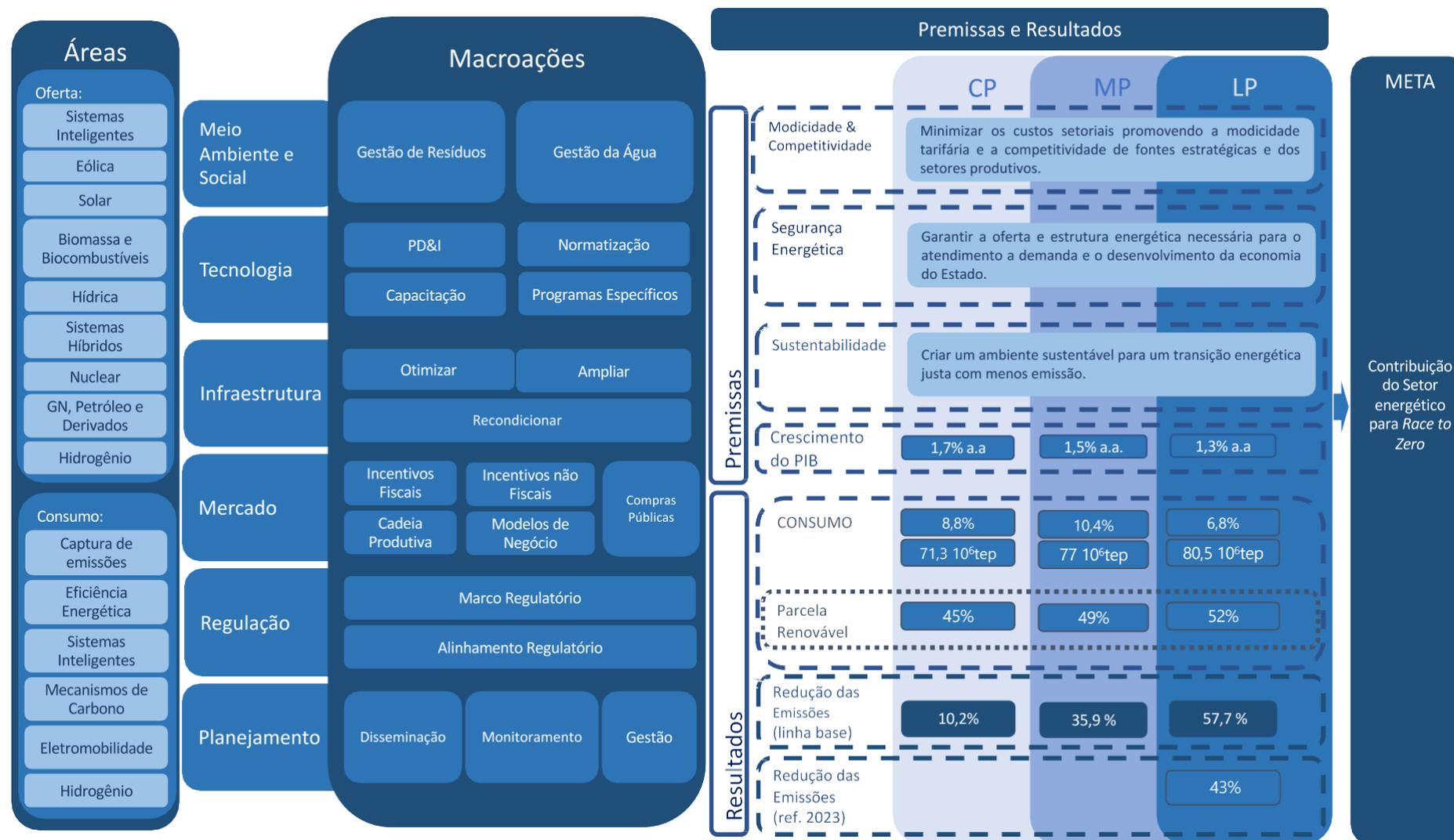
Todavia, entre as fontes energéticas, o maior destaque está para a biomassa em geral e seus derivados, biogás, biometano, entre outros. Apesar da baixa participação na matriz final, os novos combustíveis também merecem destaque, a exemplo do hidrogênio de baixo carbono e combustíveis sintéticos em geral. A Figura 143 apresenta um resumo de todo o estudo. Do lado esquerdo mostra as áreas contempladas e cenarizadas nas projeções e alinhados aos eixos estratégicos e subsequentes macroações trabalhadas no plano de ações. Do lado direito a figura apresenta as premissas gerais que direcionaram todo o estudo que formam os 3 pilares (modicidade; segurança; e sustentabilidade) e o crescimento do PIB. O texto da figura finaliza com os principais resultados centrais do trabalho:

- (a) crescimento do consumo de energia total abaixo do crescimento do PIB em todos os anos do período, que indica a redução da intensidade energética;
- (b) aumento da parcela renovável da matriz energética que sai em 2023 de 44% e atinge um patamar próximo dos 50% em 2050. Vale ressaltar que a parcela renovável da matriz elétrica que hoje é extremamente alta, se mantém aproximadamente estável nos 96% em todo o período.
- (c) Redução significativa das emissões. As ações propostas no plano geram um impacto de redução de 23% das emissões de GEE no ano 2050 em relação às atuais emissões em 2023, o que equivale à redução de 49% em 2050 em relação à evolução esperada na linha de base, ou seja, a adoção do plano de mitigação reduz em 23% as emissões atuais e reduz em 49% as emissões que se realizariam em 2050, caso o plano de mitigação não fosse implementado.

O PEE/SP 2050 foi audacioso em alguns pontos, buscando a contribuição na redução das emissões como, por exemplo, na proposta de mudança estrutural da frota de transporte de São Paulo, pois o Estado é historicamente um indutor de inovações, visto que concentra um grande número de HUBs acadêmicos, Universidades e centros de pesquisa de tecnologia, além de concentrar mais de 40% dos recursos de P&D do país seja privado ou público.

Por outro lado, teve o cuidado de ser conservador em alguns pontos de forma a garantir a modicidade tarifária e a segurança energética, portanto preservando o seu desenvolvimento econômico e social. Esta combinação propôs uma solução que atendeu ao tripé da política energética (modicidade, segurança, sustentabilidade) e a diretriz dada como desafio ao setor energético do estado de SP para 2050: contribuir para a *Race to Zero* no Estado, cuja proposta visa contribuir com quase 50% de redução das emissões em 2050.

Figura 143 – Roadmap Geral resumido



## Referências Bibliográficas

---

ABIOGÁS. (2023). *Workshop: Potencial de Biometano e Biogás no Estado de São Paulo*.  
Fonte: SEMILSP: <https://www.youtube.com/watch?v=bNQfOoJU8i8>

Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M., Rashid, I., Shahzad, K., Abid, M., . . . Sylla, M. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5. doi:10.1007/s41748-021-00233-6

Almeida, M., Schaeffer, R., & LA Rovere, E. L. (2001). The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil. *Energy*, pp. v. 26, n. 4, p. 413–429.

Ambrizzi, T., Reboita, M., Rocha, R., & Llopart, M. (2018). The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the new york academy of sciences*, 1436, 98-120. doi:10.1111/nyas.13932

ANA. (2019). *Manual de usos consuntivos da água no Brasil*. Brasília.

ANEEL. (31 de Julho de 2023). *SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL*.  
Fonte: ANEEL: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>

ANEEL. (2023). *SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL*. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>.

ANP. (2022). *ANUÁRIO ESTATÍSTICO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS 2022*. Brasília: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico>.

ANP. (2022). *Painel Dinâmico de Produtores de Biogás*. Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/>

- Bayer, D. M., & Collischonn, W. (2013). Análise de Sensibilidade do Modelo MGB-IPH a Mudanças de uso da Terra. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), pp. 165-179.
- Bevacqua, A., Chaffe, P., Chagas, V., & AghaKouchac, A. (2021). Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. *Journal of Hydrology*, 603, Part A. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126902>
- Bohl, T. S. (2018). Particulate number and NO trade-off comparisons between HVO and mineral diesel in HD applications. *Fuel*, 215, pp. pp 90–101 . <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.023>.
- Bremicker, M. (1998). *Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. Freiburg*. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität, Geowissenschaftlicher Fakultät (Dissertation).
- CEPEL. (2022). *Manual do usuário do modelo NEWAVE*. Rio de Janeiro: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.cepel.br/wp-content/uploads/2022/05/ManualUsuario.pdf>.
- CETESB. (2020). *Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo*. São Paulo: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/[https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/12/plano-resi%CC%81duos-solidos-2020\\_final.pdf](https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/12/plano-resi%CC%81duos-solidos-2020_final.pdf).
- CETESB. (2022). *Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - GOVSP*. Acesso em 29 de 09 de 2022, disponível em Relatórios e Publicações: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>
- CGEE. (2017). *Prospecção tecnológica no setor elétrico: Documento executivo*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
- Chen, s., Marbough, D., Moore, S., & Stern, K. (2021). Voluntary Carbon Offsets: An Empirical Market Study. *SSRN - Elsevier*.
- Collischonn, W. (2001). *Simulação hidrológica de grandes bacias* . Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Collischonn, W., Tucci, C. E., Clarke, R. T., Chou, S. C., Guilhon, L. G., Cataldi, M., & Allasia, D. (2007). Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. *Journal of Hydrology*, 344, 112-122.

- Costa, F. C. (2013). *Gases combustíveis como alternativas à eletrotermia em aquecimento direto e calor de processo no setor industrial brasileiro*. 211 f. Tese (Doutorado em Energia). Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, .
- Cuartas, L., Cunha, A., Alves, J., Parra, L., Karinne, D.-L., Costa, L., . . . MArengo, J. (2022). Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. *Water*, 14, 601. doi:10.3390/w14040601
- DNV. (2022). *Hydrogen Forecast to 2050*.
- Doutzauer, M. O. (2022). Empirical greenhouse gas assesment for flexible bioenergy in integration with the German power sector. *Energy*, vol.181, pp. pp. 1100-1109.
- ELETOBRAS. (2008). *Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005 - Classe Residencial*. Rio de Janeiro: Eletrobras.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2019). *Expansão da Geração: Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas - Ganhos de eficiência, energia e capacidade instalada*. Brasília.
- EPE. (2015). *Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014*. . Rio de Janeiro.
- EPE. (2016). *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica* . Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética .
- EPE. (2019). *Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018*. Rio de Janeiro: EPE.
- EPE. (16 de 12 de 2020). Eempresa de Pesquisa Energética. *Plano Nacional de Energia 2050*.
- EPE. (2020). *Roadmap Eólica Offshore Brasil - Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima*. Rio de Jenairo: EPE - Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE. (2022). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE. (31 de Julho de 2023). *Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída*. Fonte: EPE: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>
- EPE, E. d. (2022b). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*. . p. Disponível em <https://www.epe.gov.br/>.

- FBMC. (2019). *Estratégia de longo prazo para a descarbonização da economia brasileira*. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas.
- Felix, V. d., & da Paz, A. R. (2016). Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *RBRH*, 21(3), pp. 556-569. doi:10.1590/2318-0331.011616009
- Fernandes, F. (2008). *Substituição da Eleetrotermia por Gases Combustíveis no Setor Industrial. Tese, Doutorado em Energia*. Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Ferreira, G., & Reboita, M. (05 de 2022). A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. *Atmosphere*, 13, 873. doi:10.3390/atmos13060873
- Ferreira, G., Reboita, M., & Drumond, A. (2022). Evaluation of ECMWF-SEAS5 Seasonal Temperature and Precipitation Predictions over South America. *Climate*, 10, 128. doi:10.3390/cli10090128
- Freitas, A., Reboita, M., Carvalho, V., Drumond, A., Ferraz, S., Silva, B., & da Rocha, R. (2022). Atmospheric and Oceanic Patterns associated with extreme drought events over the Paraná Hydrographic Region, Brazil. (*submetido*) *Climate*.
- Gallo, A. B. (2018). *Avaliação da Inserção do Gás Natural no Setor Industrial Brasileiro – Uma Análise de Indicadores de Impactos Energético, Ambiental e Econômico*. . 148 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, USP.
- Gimenes, A. (2021). *GEPEA - Estudos internos*.
- GOV SP. (2020). *Plano Estadual de Recursos Hídricos 2020-2023*. São Paulo: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursoshidricos>.
- GOV-SP. (20 de julho de 2021). Decreto 65.881. *DECRETO Nº 65.881, DE 20 DE JULHO DE 2021 - Adesão do Estado de São Paulo às campanhas "Race to Zero" e "Race to Resilience"*.
- GOV-SP. (2022). *Balanco Energético do Estado de São Paulo 2022 - ano base 2021*.  
Fonte: SIMA:  
<https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalcev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/BalancoEnergetico.pdf>

- IAEA. (2021). <https://www.iaea.org/>. Fonte: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- IBAMA. (04 de Setembro de 2023). *Mapas de projetos em licenciamento - Complexos Eólicos Offshore*. Fonte: IBAMA: [https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20230802\\_Usinas\\_Eolicas\\_Offshore\\_compressed.pdf](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20230802_Usinas_Eolicas_Offshore_compressed.pdf)
- ICCT. (2022). *ZEBRA: Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo*. São Paulo.
- IEA. (2017). *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*.
- IEA. (2021). International Energy Agency. *World Energy Outlook 2021*.
- IEA. (2021a). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy system*, International Energy Agency, Paris.
- IEA. (2021b). International Energy Agency. *Net Zero by 2050*.
- IEA. (2022). International Energy Agency. *Global Hydrogen Review 2022*.
- IEA. (2023). International Energy Agency. *Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity*.
- IEA, I. E. (2021c). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy system*.
- INGERSOLL, D. (2009). *Deliberately small reactors and the second nuclear era*. *Progress in Nuclear Energy* <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.01.003>, pp. 51(4–5), 589–603.
- IPCC. (2021). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896
- IRENA. (2022a). *Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA. (5 de Junho de 2023). *Wind energy Data*. Fonte: International Renewable Energy Agency: <https://www.irena.org/wind>

- IRENA. (05 de Junho de 2023b). *Statistics Data*. Fonte: International Renewable Energy Agency: <https://www.irena.org/Data>
- ITF. (24 de 05 de 2023). *Transport Outlook 2023*. Fonte: ITF: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/repositories/itf-transport-outlook-2023-summary-en.pdf>
- Jannuzzi, G. M., & Schipper, L. (1991). The structure of electricity demand in the Brazilian household sector. *Energy Policy*, pp. v. 19, n. 9, p. 879–891.
- Lemes, M., Reboita, M., & Torres, R. (2019). Elementos Fisiográficos e a Precipitação no Estado de São Paulo. Em L. d. Pinheiro, & A. Gorayeb, *Geografia Física e as Mudanças Globais* (Vol. 1, pp. 1-15). Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.
- Liang, X., Lettenmaier, D., Wood, E. F., & Burge, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 99(D7), 14415-14428.
- LOCATELLI, G., G., & MIGNACCA, B. (s.d.). LOCATELLI, G., & MIGNACCA, B. (2020). Small modular nuclear reactors. In *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet* (Issue 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00008-6>.
- Lopes, M. P. (2022). Technical potential of floating photovoltaic systems on artificial water bodies in Brazil. *Renewable Energy*, pp. 1023-1033.
- Lopes, O. A. (2013). *Avaliação de métodos avançados de geração de energia elétrica na indústria de açúcar e bioenergia. 2013. 66 p. Dissertação (Mestrado na área de Agroenergia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013. São Paulo.*
- MapBiomass. (2023). <https://mapbiomas.org/>. Fonte: MapBiomass.
- Marengo, J., Nobre, C., Seluchi, M., Cuartas, A., Alves, L., Mendiondo, E., . . . Sampaio, G. (2015). A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, 106, 31-44. doi:<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>
- McKinsey. (2009). *Caminho para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil*. São Paulo: McKinsey & Company.
- MCTIC. (2017). *Trajatória de mitigação e instrumentos de políticas públicas para alcançar as metas brasileiras*. Brasília: Ministério de Ciências, Tecnologia, Inovação e Comunicações.

- MMA. (2016). *Plano nacional de adaptação à mudança do clima*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- MME/EPE. (2020). *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética - EPE.
- MME/FDTE. (2005). *Balanzo de Energia Útil 2005*. Brasília: MME.
- Moriasi, D. N. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, pp. vol. 50, nº 3, 885-900.
- MPOG Ministério do planejamento, desenvolvimento e gestão. (2018). *Guia Metodológico para Indicadores*. Brasília: MPOG.
- Município SP, Lei no 16.802 (17 de janeiro de 2018). Fonte: <http://documentacao.camara.sp.gov.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>
- Neto, J., & Gallo, W. (2021). Potential impacts of vinasse biogas replacing fossil oil for power generation, natural gas, and increasing sugarcane energy in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.135.
- Nogueira, L. F. (s.d.). Uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes associados à usinas hidrelétricas como alternativa de preservação dos níveis de armazenamento nos reservatórios – estudo de caso para a UHE Três Irmãos.
- PAC2050/SEEG. (2022). *Plano de Ação Climática 2050*. Fonte: Governo do Estado de São Paulo - SEMIL: [https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2022/11/pac-sp-2050-\\_coorigidoformato\\_23\\_1\\_12.pdf](https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2022/11/pac-sp-2050-_coorigidoformato_23_1_12.pdf)
- Pavan, M., Ramos, D., Soares, M.Y., Carvalho, & M.M. (2021). Circular business models for bioelectricity: A value perspective for sugarcane energy sector in Brazil. *Journal of Cleaner Production*.
- Pereira JR, A. (2018). *Matriz energética do Estado do Rio de Janeiro: 2017-2031*. Rio de Janeiro: Synergia.
- Reboita, M., Kuki, c., Marrafon, V., Souza, C., Ferreira, G., Teodoro, T., & Lima, J. (2022). South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Climate Dynamics*, 58. doi:10.1007/s00382-021-05918-2

- Reboita, M., Rocha, R., Souza, C., Baldoni, T., Silva, P., & Ferreira, G. (2022). Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble. *Atmosphere*, 13, 1463. doi:10.3390/atmos13091463
- Schneider, T., Muller, D., & Karl, J. (2020). A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 134, p. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.1>.
- SEEG. (2022). <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Fonte: Plataforma SEEG: <https://plataforma.seeg.eco.br/>)
- SEEG. (2023). Análise das emissões de e suas implicações para as metas climáticas do brasil 1970-2021. Observatório do Clima, 2023.
- SEEG, S. d. (2023b). *Análise das emissões de e suas implicações para as metas climáticas do brasil 1970-2021*.
- SIMA. (16 de 07 de 2022). *Projeto Trajetórias de Descarbonização. Desenvolvimento e Avaliação da Trajetória de Descarbonização de São Paulo. Relatório Final*. Acesso em 16 de 07 de 2022, disponível em [https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2021/09/trajetoria-sao-paulo\\_final-report.pdf](https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2021/09/trajetoria-sao-paulo_final-report.pdf)
- SIMA, S. d. (2020). *Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo*.
- TCU; Tribunal de contas da União. (2011). *Técnica de indicadores de desempenho para auditorias*. Brasília: Secretaria de fiscalização e avaliação de programas de governo - SEPROG.
- Teodoro, T., Reboita, M., Llopart, M., Rocha, R., & Ashfaq, M. (27 de 10 de 2021). Climate change impacts on the South American monsoon system and its surface-atmosphere processes through RegCM4 CORDEX-CORE projections. *Earth Systems and Environment*, 5. doi:10.1007/s41748-021-00265-y
- UNICA. (2020). *União da Indústria de Cana de Açúcar. Bioeletricidade em números. Setembro. 2020*.
- Valeika, G. M. (2022). *Research of the impact of EGR rate on energy and environmental parameters of compression ignition internal combustion engine fuelled by hydrogenated vegetable oil (HVO) and biobutanol – Castor oil fuel mix*.

- Vasconcellos, F., & Reboita, M. (2021). Clima da Região Sudeste. In: (Org.). Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática. 1ed. SÃO PAULO: Oficina de Textos. Em N. J. Iracema Cavalcanti, *Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática* (Vol. 1, pp. 51-63). São Paulo: Oficina de Textos.
- WEC. (2021). World Energy Council. *Hydrogen Demand and Cost Dynamics Working Paper*.
- WEF. (2021). *Financing the transition to a Net Zero future*. World Economic Forum.
- WNA. (2015). *Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors Produced by: Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (Vol. 0)*. Londres: WNA. . Londres: Produced by: Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (Vol. 0). Fonte: WNA. (2015). Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors Produced by: Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (Vol. 0). Londres: WNA. : [https://world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working\\_Group\\_Reports/REPORT\\_Facilitating\\_Intl\\_Licensing\\_of\\_SMRs.pdf](https://world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/REPORT_Facilitating_Intl_Licensing_of_SMRs.pdf)
- World Bank. (2022). *State and Trends of Carbon Pricing 2022*. Fonte: <https://openknowledge.worldbank.org/>: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/a1abead2-de91-5992-bb7a-73d8aaaf767f>

# VERSÃO DE CONSULTA PÚBLICA