Plano de Logística e Investimentos do Estado de São Paulo | PLI-SP 2050

ANÁLISE DE FATORES QUE INFLUENCIAM CENÁRIOS FUTUROS

Produto D-11

CONCREMAT | transplan | BID | DER

Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística

Produto D-11: Análise de Fatores que Influenciam Cenários Futuros

CÓDIGO DO DOCUMENTO

D-11

TÍTULO

Análise de fatores que influenciam cenários futuros

ELABORAÇÃO

Consórcio Concremat-Transplan

CONTRATO

Contrato Nº 22.607-5

Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística – SEMIL
Departamento de Estradas de Rodagem – DER
Governo do Estado de São Paulo

FINANCIAMENTO

Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID)

OBSERVAÇÕES

Este documento técnico, denominado Análise de Fatores que influenciam cenários futuros, corresponde ao Produto 11 do "Desenvolvimento e elaboração do Plano de Logística e Investimentos do Estado de São Paulo (PLI-SP 2050)" (Contrato Nº 22.607-5).

O produto é um dos entregáveis da Etapa 03 – Simulação e Análise de Alternativas.

VERSÃO	DATA	CONTEÚDO DAS MODIFICAÇÕES
R03	21/09/2026	Versão revisada
R02	03/06/2026	Versão revisada
R01	08/05/2026	Versão completa
R00	10/04/2026	Versão inicial

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0-1: Fluxograma de predecessoras e produtos dependentes em relação do Produto D-11 10

Figura 1-1: Evolução das emissões de CO2eq 2015-2050 20

Figura 1-2: Visão Geral do Processo de Produção e Consumo do SAF 33

Figura 1-3: Processo de Produção pela rota HEFA 34

Figura 2-1: Balsa Rheinfähre Mondorf, perto de Bonn, alimentada por motores elétricos. 57

Figura 2-2: Barco Solar Indígena 58

Figura 2-3: Barco movido 100% a hidrogênio verde, construído pela Itaipu Binacional 61

Figura 2-4: Embarcação JAQ H1, da JAQ Apoio Marítimo 61

Figura 2-5: Adoção de Combustível Alternativo na Frota Mundial de Navios, 2022 - Número de embarcações 66

Figura 2-6: Adoção de Combustível Alternativo na Frota Mundial de Navios, 2022 - Toneladas Brutas 67

Figura 2-7: Mapa de localização do hub São Carlos/SP 76

Figura 2-8: Função de winglet para redução de arrasto 80

Figura 2-9: Digital Twin para Gestão do Ciclo de Vida de Aeronaves 81

Figura 2-10: Modelo de eVtol. 85

Figura 2-11: Drones para Carga 86

Figura 2-12: Catenária Aérea no transporte ferroviário 91

Figura 2-13: Elementos da comunicação em C-ITS 111

Figura 2-14: Evolução das Emissões por Cenário de Renovação de Frota 125

Figura 3-1: Curvas de aprendizado de custo direto de manufatura para reduções de custo de tecnologia ao longo do tempo 138

Figura 3-2: Intensidade de Emissões de CO2 por Modal — Transporte de Cargas 147

Figura 5-1: Distribuição de Gasodutos no Estado de São Paulo. 164

Figura 5-2: Distribuição de Gasodutos no Estado de São Paulo e Usinas Sucroenergéticas 165

Figura 6-1: Sistemas portuários e áreas de influência consideradas 171

Figura 6-2: Intervenções programadas ou comprometidas no sistema de Santos até 2030. 173

Figura 6-3: Projetos e condicionantes do sistema portuário de São Sebastião. 175

Figura 6-4: Alternativas de localização e acessos para um novo porto no litoral sul. 177

Figura 6-5: Sistemas TIC e VLT considerados na análise. 187

Figura 6-6: Áreas de desenvolvimento associadas ao TIC Eixo Norte. 190

Figura 6-7: Evolução da demanda no transporte rodoviário coletivo no Estado de São Paulo — 2015–2024. 195

Figura 6-8: Projetos para corredores de passageiros. 200
Figura 6-9: Projetos para corredores de carga. 201
Figura 7-1: Pontos críticos em áreas rurais 246
Figura 7-2: Pontos críticos em áreas urbanas 247
Figura 8-1: Evolução do setor aeroviário no Estado de São Paulo. 264
Figura 8-2: Projeção de Demanda – Passageiros – GRU. 267
Figura 8-3: Projeção de Demanda – Carga – GRU. 268
Figura 8-4: Projeção de Demanda – Passageiros – Congonhas. 269
Figura 8-5: Projeção de Demanda – Cargas – Congonhas. 270
Figura 8-6: Projeção de Demanda – Passageiros – Campinas 271
Figura 8-7: Projeção de Demanda – Cargas – Campinas. 272

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-1: Metas de eletrificação por categoria de veículo no Estado de São Paulo (PAC 2050 / PEE 2050) 19

Tabela 1-2: Capacidade atual de produção de Biometano por empresa 30

Tabela 1-3: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros 53

Tabela 2-1: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modo hidroviário 63

Tabela 2-2: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modo marítimo e portuário 73

Tabela 2-3: Impactos prospectivos por dimensão operacional 83

Tabela 2-4 - Avaliação qualitativa dos cenários futuros dos aeroportos (2026–2050) 88

Tabela 2-5: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modal aeroviário..... 89

Tabela 2-6: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modal ferroviário 97

Tabela 2-7: Níveis de automação veicular (escala SAE J3016).....113

Tabela 2-8: Frotas e indicadores-chave 121

Tabela 2-9: Simulação de redução de emissão de CO2 com substituição de frota por idade .124

Tabela 2-10: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modal rodoviário.....134

Tabela 3-1: Resumo do cálculo dos fatores de emissão de combustão dos Veículos-Tipo considerados nos cenários do PLI-SP 2050 143

Tabela 5-1: Principais programas internacionais de incentivo tarifário para caminhões de baixo impacto ambiental. 156

Tabela 5-2: Alternativas de infraestrutura dutoviária para movimentação de biometano.....161

Tabela 6-1: Intervenções programadas ou comprometidas relacionadas às conexões com o transporte marítimo.....172

Tabela 6-2: Sistemas ferroviários considerados na análise das áreas de desenvolvimento. ..187

Tabela 6-3: Exemplos de plataformas digitais atuantes no mercado brasileiro. 219

Tabela 6-4: Efeitos potenciais das plataformas e possíveis efeitos ambientais. 221

Tabela 8-1: Movimentação aeroviária no Estado de São Paulo (2025). 265

Tabela 8-2: Custo estimado da Renúncia Fiscal com redução de ICMS sobre QAV. 274

Tabela 9-1: Síntese do potencial de desenvolvimento associado às novas infraestruturas. ...282

Tabela 10-1: Alternativas de instrumento para políticas fiscais no setor de transporte.....296

Tabela 12-1: Formas de tratamento dos fatores analisados nas etapas subsequentes. 304

SUMÁRIO

Apresentação 9

Sumário Executivo 12

PARTE I – NOVAS FONTES DE ENERGIA E TECNOLOGIAS NOS TRANSPORTES 16

1 Transição energética, descarbonização e novas tecnologias nos transportes 17

1.1 Eletrificação de frota 17

1.2 Biocombustíveis 21

1.3 Gás Natural Liquefeito (GNL) 37

1.4 Hidrogênio de baixo carbono 39

1.5 Sistemas híbridos de motorização 45

1.6 Uso de inteligência artificial em sistemas logísticos 47

1.7 Requisitos de infraestrutura para combustíveis de baixo carbono 49

1.8 Síntese das tecnologias nos transportes 52

2 APLICAÇÃO DAS NOVAS TECNOLOGIAS OU COMBUSTÍVEIS POR MODO 56

2.1 Hidroviário 56

2.2 Marítimo e portuário 63

2.3 Dutoviário 73

2.4 Aeroviário 77

2.5 Ferroviário 89

2.6 Rodoviário 97

3 IMPACTOS DA ADOÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA 137

3.1 Impactos econômicos 137

3.2 Impactos em emissões de GEE 141

4 SÍNTESE NOVAS FONTES DE ENERGIA E TECNOLOGIAS NOS TRANSPORTES 148

PARTE II – ANÁLISE DOS CONTATOS SETORIAIS 150

5 Transição Energética e combustíveis 153

5.1 Incentivos para uso de combustíveis com baixo impacto ambiental no transporte de cargas 153

5.2 Fomento ao desenvolvimento de dutovias para transporte de biocombustíveis 159

6 Integração modal e nOVOS sERVIÇOS 168

6.1 Conexões com transporte marítimo 168

6.2 Transporte de cargas em vias segregadas do TIC 180

6.3 Áreas de desenvolvimento ao Longo de ferrovias 185

6.4 Estratégias para manutenção do serviço de transporte inter-regional de passageiros diante da redução da demanda 194

6.5 Sistemas intermodais para transporte de passageiros e cargas no interior do Estado de São Paulo 198

6.6 Expansão da capacidade do transporte de cargas na hidrovia Tietê-Paraná 207
6.7 Desenvolvimento de novos portos, serviços e regulamentos para o transporte aquaviário de passageiros 212
6.8 Estratégias junto às plataformas digitais, visando à otimização do transporte de cargas 218
7 INFRAESTRUTURA E GESTÃO RODOVIÁRIA 224
7.1 Programa de novas rodovias 224
7.2 Programa de ampliação e modernização da capacidade rodoviária 233
7.3 Segurança viária 243
7.4 Regulação e priorização de demandas rodoviárias 250
7.5 Pavimentação, recuperação ou estadualização de rodovias em áreas rurais 256
8 MOBILIDADE E DESENVOLVIMENTO DO SETOR AÉREO 259
8.1 Apoio ao plano cicloviário do ESP, rotas ciclo turísticas e religiosas 259
8.2 Estratégias para o desenvolvimento do setor aéreo no ESP 263
9 Planejamento territorial e desenvolvimento regional 277
9.1 Planejamento territorial, ambiental e logístico para retroáreas e bases de apoio offshore 277
9.2 Geração de polos de desenvolvimento regional associados ás novas ofertas de infraestrutura logística 280
10 Segurança, Tecnologia, Governança, RESILIÊNCIA e financiamento 284
10.1 Segurança e conectividade nos sistemas de transporte de cargas 284
10.2 Estratégias para adoção de novas tecnologias em licitações do ESP 286
10.3 Rearranjo institucional - Expansão da área de logística e transportes 289
10.4 Estratégias para adaptação e resiliência às mudanças climáticas 291
10.5 Avaliação de incentivos fiscais e criação de fundos ligados ao setor de transportes 294
11 SÍNTESE DOS CONTATOS SETORIAIS 298
PARTE III – IMPLICAÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS 300
12 IMPLICAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO, SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS 301
12.1 Princípios para incorporação dos fatores aos cenários futuros 301
12.2 Temporalidade, maturidade e incerteza das transformações analisadas 302
12.3 Infraestrutura habilitadora e implicações sobre a configuração de oferta 302
12.4 Tradução em parâmetros econômicos e operacionais 303
12.5 Digitalização e representação de efeitos indiretos 303
12.6 Condicionantes institucionais e regulatórios 303
12.7 Parâmetros ambientais e emissões 304
12.8 Diretrizes para incorporação nos Produtos D-12 e D-13 304
12.9 Processo iterativo e encaminhamentos 305

13 CONSIDERAÇÕES FINAIS 306
APÊNDICE 309
A. Metodologia de Cálculo de Emissões.....310
A.1. RODOVIÁRIO 311
A.2. FERROVIÁRIO 314
A.3. HIDROVIÁRIO 316
A.4. AEROVIÁRIO 317
A.5. DUTOVIAS 318

APRESENTAÇÃO

O presente relatório, denominado **Produto D-11 – Análise de Fatores que Influenciam Cenários Futuros**, integra a Etapa 3 – Simulação e Análise de Alternativas do Plano de Logística e Investimentos do Estado de São Paulo – PLI-SP 2050. Corresponde ao Relatório do Produto D-11, dentre os 19 produtos previstos para a elaboração do Plano.

A Etapa 3 tem por finalidade apoiar a análise das demandas futuras por infraestrutura e serviços logísticos no Estado de São Paulo e avaliar alternativas para atendimento dessas demandas ao longo do horizonte do PLI-SP 2050. Essa etapa articula as projeções de demanda, a caracterização da oferta futura, a simulação de cenários, a identificação de pontos de atenção e, nas etapas seguintes, a seleção de intervenções e a estruturação da carteira de investimentos.

Nesse encadeamento, o Produto D-11 tem a função de identificar, organizar e analisar fatores que podem influenciar a configuração futura do sistema de logística e transportes paulista, para além dos projetos de infraestrutura considerados na caracterização da oferta futura. O relatório trata de elementos que podem afetar padrões de demanda, condições de oferta, custos operacionais, emissões, desempenho dos modais, requisitos de infraestrutura, formas de prestação dos serviços de transporte e condicionantes institucionais associados à evolução do sistema.

A relação entre oferta e demanda por infraestrutura logística ocorre em um ambiente sujeito a mudanças econômicas, produtivas, tecnológicas, energéticas, institucionais e regulatórias. No horizonte do PLI-SP 2050, a geração e a atração de cargas e passageiros poderão ser influenciadas por alterações nos padrões de produção e consumo, mudanças na competitividade regional, transição energética, novas tecnologias, novos serviços de transporte e contribuições apresentadas por agentes setoriais.

O Produto D-11 organiza esses fatores de modo compatível com a construção dos cenários futuros do Plano. Para isso, não se restringe ao registro de tendências, propostas ou demandas setoriais, mas busca qualificá-las segundo sua relevância, maturidade, aplicabilidade ao contexto paulista, condicionantes de implantação e possibilidade de consideração nas etapas posteriores de modelagem e simulação.

O relatório está estruturado em três partes principais:

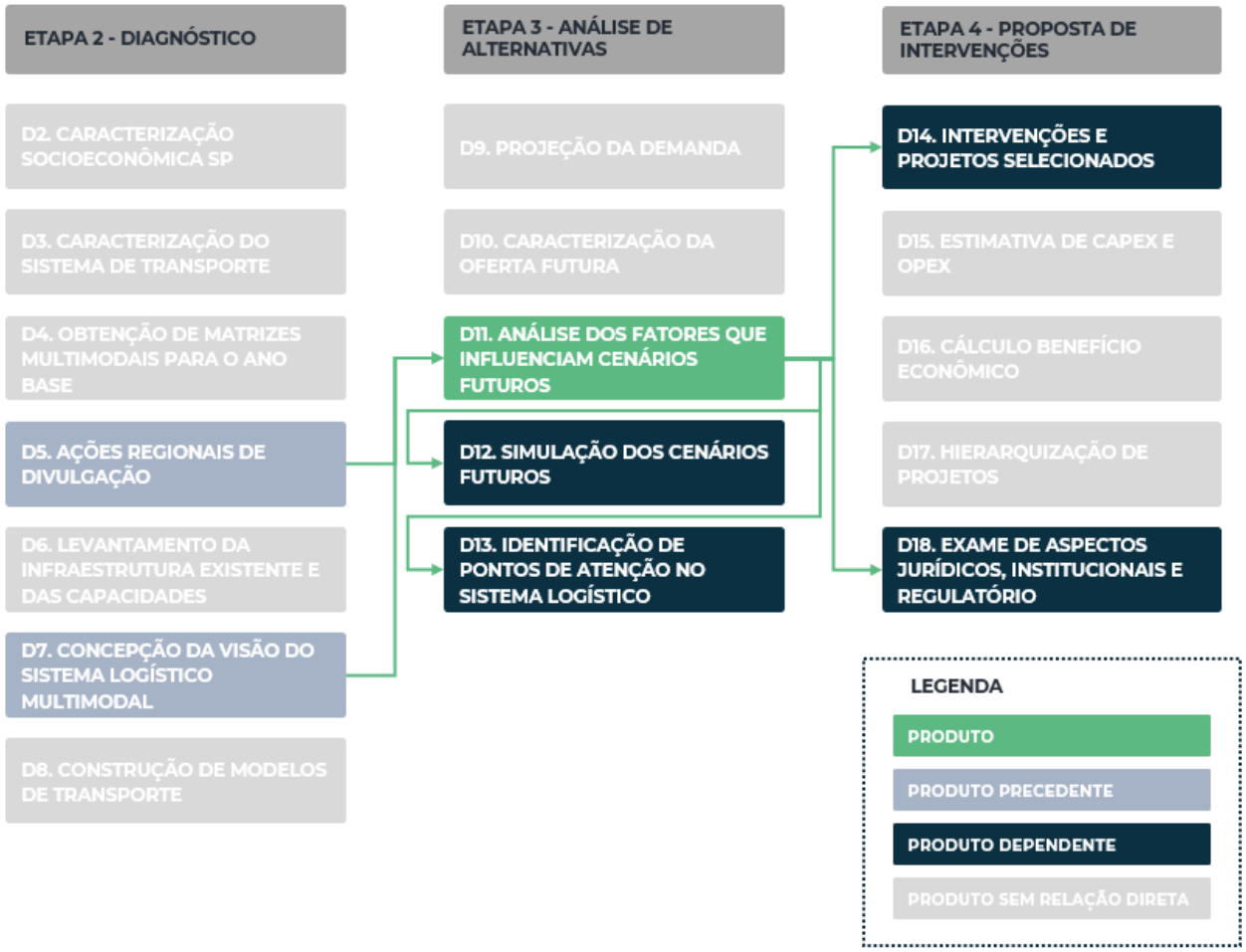
A **Parte I – Novas Fontes de Energia e Tecnologias nos Transportes** apresenta a análise das principais transformações associadas à transição energética, à descarbonização e à incorporação de novas tecnologias nos transportes. São examinadas fontes e soluções como eletrificação de frotas, biocombustíveis, hidrogênio de baixo carbono, combustíveis sintéticos, sistemas híbridos de motorização, inteligência artificial aplicada à logística e requisitos de infraestrutura para combustíveis de baixo carbono. Na sequência, essas tecnologias são analisadas segundo sua aplicação potencial aos diferentes modais: hidroviário, marítimo-portuário, dutoviário, aeroviário, ferroviário e rodoviário. A Parte I também aborda impactos econômicos e impactos sobre emissões de gases de efeito estufa.

A **Parte II – Análise dos Contatos Setoriais** sistematiza e analisa temas levantados nas interações com agentes públicos, operadores, associações setoriais, empresas e instituições técnicas. Os assuntos são organizados em seis eixos: transição energética e combustíveis; integração modal e novos serviços; infraestrutura e gestão rodoviária; mobilidade e desenvolvimento do setor aéreo; planejamento territorial e desenvolvimento regional; e segurança, tecnologia, governança, resiliência e financiamento. Em cada tema, são caracterizados os problemas identificados, examinadas as alternativas de solução e definidos os encaminhamentos pertinentes aos produtos subsequentes, conforme as condições de viabilidade e a forma de avaliação requerida.

A **Parte III – Implicações para a Definição de Cenários Futuros** consolida as relações entre os fatores analisados e as etapas subsequentes do Plano. Essa parte distingue os elementos passíveis de representação nas configurações de oferta e nos parâmetros de simulação daqueles que exigem análises de sensibilidade ou avaliações complementares. Estabelece, assim, as bases para sua consideração na simulação dos cenários do Produto D-12 Simulação de Cenários Futuros, na identificação dos pontos de atenção do Produto D-13 Identificação de Pontos de Atenção no Sistema Logístico e no aprofundamento de propostas e intervenções no Produto D-14 Intervenções e Projetos Selecionados, em articulação com os aspectos jurídicos, institucionais e regulatórios tratados no Produto D-18 Exame de Aspectos Jurídicos, Institucionais e Regulatórios.

Por fim, o relatório apresenta um Apêndice com a metodologia de cálculo de emissões, organizada por modal, abrangendo os sistemas rodoviário, ferroviário, hidroviário, aeroviário e dutoviário.

Figura 0-1: Fluxograma de predecessoras e produtos dependentes em relação do Produto D-11



Fonte: Elaboração Consórcio Concremat-Transplan.

Como evidenciado na Figura acima, este relatório tem como principais antecedentes diretos os Produtos D5 – Ações Regionais de Divulgação e D7 – Concepção da Visão do Sistema Logístico Multimodal. O Produto D-5 forneceu subsídios a partir das contribuições e percepções dos atores setoriais consultados ao longo do processo participativo, enquanto o Produto D-7 estabeleceu a visão de futuro do Plano e os objetivos estratégicos que orientam a construção e a avaliação dos cenários prospectivos.

No âmbito da Etapa 3, o Produto D-10 – Caracterização da Oferta Futura concentra-se na oferta associada a obras, empreendimentos e projetos de infraestrutura com informações suficientes para representação nas análises do Plano. O Produto D-11 complementa essa leitura ao tratar de fatores adicionais capazes de influenciar os cenários futuros, incluindo transição energética, novas tecnologias, novos serviços, contribuições setoriais e condicionantes institucionais. Os aspectos jurídicos, institucionais e regulatórios que demandem análise específica serão aprofundados no Produto D-18 – Exame de Aspectos Jurídicos, Institucionais e Regulatórios, sem prejuízo de sua identificação preliminar neste relatório quando constituírem condicionantes relevantes para os cenários.

Nesse contexto, o Produto D-11 desempenha papel intermediário entre a caracterização da oferta futura e a simulação dos cenários do PLI-SP 2050 (Produto D-12). Sua principal contribuição consiste em identificar e qualificar tendências, incertezas e vetores de transformação que poderão influenciar a dinâmica futura do sistema logístico paulista, fornecendo subsídios para as etapas subsequentes de simulação, identificação de pontos de atenção, seleção de intervenções e estruturação da carteira de investimentos.

Cabe destacar que os resultados das simulações a serem desenvolvidas no Produto D-12 e posteriormente analisados no Produto D-13 – Identificação de Pontos de Atenção no Sistema Logístico deverão ser interpretados em conjunto com os fatores discutidos neste relatório. Dessa forma, os impactos observados nos diferentes cenários poderão ser avaliados não apenas à luz da evolução da demanda e da oferta de infraestrutura, mas também considerando aspectos como transição energética, desempenho ambiental dos diferentes modos de transporte, fatores de emissão dos veículos, avanços tecnológicos e demais elementos que influenciam o desempenho futuro do sistema logístico.

SUMÁRIO EXECUTIVO

O Produto D-11 – Análise de Fatores que Influenciam Cenários Futuros consolida a análise de tecnologias, fontes de energia, novos serviços, contribuições setoriais e condicionantes institucionais que podem influenciar a evolução do sistema de logística e transportes do Estado de São Paulo no horizonte do PLI-SP 2050.

O relatório parte do entendimento de que a configuração futura do sistema logístico paulista não será determinada apenas pelo crescimento da demanda ou pela implantação de novos projetos de infraestrutura. A evolução dos custos operacionais, a renovação de frotas, a difusão de novas tecnologias, a transição energética, a digitalização das operações, os requisitos ambientais e os arranjos institucionais também tendem a alterar o desempenho dos modais, a competitividade das cadeias logísticas e as necessidades de investimento.

Nesse contexto, o Produto D-11 tem como finalidade qualificar os fatores que poderão ser considerados na construção dos cenários futuros do Plano. O produto não antecipa a carteira de investimentos, mas organiza elementos capazes de subsidiar hipóteses de cenário, parâmetros de modelagem, variáveis de sensibilidade e condicionantes de implantação a serem considerados nas etapas posteriores do PLI-SP 2050.

O relatório está estruturado em três partes. A Parte I examina novas fontes de energia e tecnologias aplicáveis aos transportes, com atenção à transição energética, à descarbonização e à aplicação dessas soluções por modal. A Parte II sistematiza os temas levantados nos contatos setoriais, incluindo contribuições de agentes públicos, operadores, associações, empresas e instituições técnicas, contextualiza os problemas relatados, analisa e encaminha com soluções projetos ou soluções já existentes dentro da esfera pública. A Parte III consolida as implicações desses elementos para a definição dos cenários futuros, indicando como os fatores analisados podem ser traduzidos em premissas e parâmetros para simulação.

Na Parte I, a transição energética é analisada a partir de rotas tecnológicas com diferentes graus de maturidade e aplicabilidade. A eletrificação apresenta maior aderência em segmentos de operação previsível, como veículos leves, ônibus, frotas urbanas e determinados serviços regionais. Sua adoção em larga escala, entretanto, depende da infraestrutura de recarga, da capacidade da rede elétrica, dos prazos de conexão e da coordenação entre operadores, concessionárias de energia e gestores da infraestrutura de transporte.

Os biocombustíveis possuem forte aderência ao contexto brasileiro e paulista, especialmente em razão da base agroindustrial, da maturidade das cadeias produtivas e da compatibilidade com parte dos ativos existentes. O relatório considera etanol, biodiesel, diesel verde ou HVO, biogás, biometano e combustível sustentável de aviação. Essas alternativas podem contribuir para a redução das emissões em segmentos de difícil eletrificação, como o transporte rodoviário pesado, as ferrovias não eletrificadas, a navegação e a aviação.

O biometano recebe atenção específica por sua relação com o setor sucroenergético e com o aproveitamento de resíduos agroindustriais. Sua compatibilidade com veículos e infraestruturas de gás natural permite sua incorporação progressiva ao transporte pesado, particularmente em corredores com produção, abastecimento e demanda suficientes. Sua difusão, contudo, dependerá da expansão da oferta, da infraestrutura de distribuição, da certificação dos atributos ambientais e das condições econômicas e regulatórias.

O relatório também examina hidrogênio de baixo carbono, amônia verde, combustíveis sintéticos e sistemas híbridos. Essas rotas podem assumir importância em setores de difícil descarbonização, mas ainda dependem de redução de custos, desenvolvimento de infraestrutura específica, definição regulatória, requisitos de segurança e maior maturidade comercial. Por essa razão, possuem maior aderência a hipóteses de longo prazo, cenários de adoção acelerada ou análises de sensibilidade.

Outro vetor analisado é a digitalização dos sistemas logísticos. Inteligência artificial, sistemas inteligentes de transportes, automação, monitoramento, plataformas de gestão e integração de dados podem gerar ganhos de produtividade, confiabilidade, segurança e aproveitamento da capacidade instalada. A ampliação da conectividade também exige interoperabilidade, governança de dados e cibersegurança, especialmente em infraestruturas críticas e centros de controle operacional.

A aplicação das tecnologias por modal demonstra que a transição não deverá ocorrer de maneira uniforme. Na navegação, biocombustíveis e soluções híbridas podem apresentar maior aderência no curto e médio prazo, enquanto a eletrificação tende a ser mais aplicável a travessias e serviços de curta distância. No sistema marítimo-portuário, a agenda combina combustíveis de menor emissão, eletrificação de equipamentos, fornecimento de energia em terra, automação e gestão portuária. No modo dutoviário, a infraestrutura pode apoiar a integração entre áreas produtoras, redes de gás, terminais e polos consumidores.

No transporte aéreo, o SAF constitui a principal rota de descarbonização para operações de médio e longo alcance. No transporte ferroviário, eletrificação, biocombustíveis, baterias, sistemas híbridos e hidrogênio apresentam aplicações distintas conforme a operação e a infraestrutura disponível. No transporte rodoviário, veículos leves, ônibus, caminhões urbanos e transporte pesado de longa distância possuem ciclos de renovação e possibilidades tecnológicas diferentes, exigindo hipóteses específicas para cada segmento.

A Parte I também avalia os efeitos econômicos e ambientais da adoção tecnológica. Soluções emergentes podem exigir investimentos iniciais elevados, mas apresentar redução de custos operacionais conforme ocorram ganhos de escala e amadurecimento das cadeias de suprimento. Para as emissões, o relatório estrutura uma metodologia por modal, associando frota, intensidade de uso, consumo energético e fatores de emissão. Essa abordagem permite representar a transição como processo gradual, condicionado pela vida útil dos ativos e pela velocidade de renovação.

Na Parte II, as contribuições dos contatos setoriais foram consolidadas em seis eixos: transição energética e combustíveis; integração modal e novos serviços; infraestrutura e gestão rodoviária; mobilidade e desenvolvimento do setor aéreo; planejamento territorial e desenvolvimento regional; e segurança, tecnologia, governança, resiliência e financiamento. Essa organização substitui os agrupamentos preliminares e reúne assuntos complementares, reduzindo sobreposições entre projetos de infraestrutura, modelos de serviço, instrumentos regulatórios e políticas públicas.

No eixo de transição energética e combustíveis, foram analisados os incentivos ao uso de combustíveis de baixo impacto ambiental no transporte de cargas e o fomento às dutovias para biocombustíveis. Os temas abrangem instrumentos fiscais e tarifários, certificação, infraestrutura de abastecimento e possíveis conexões entre áreas produtoras, redes de gás, terminais e centros consumidores.

O eixo de integração modal e novos serviços reúne as conexões com o transporte marítimo, o transporte de cargas em vias segregadas do TIC, o desenvolvimento das áreas próximas às ferrovias, a manutenção do transporte inter-regional de passageiros, os sistemas intermodais no interior, a expansão da Hidrovia Tietê–Paraná, o transporte aquaviário de passageiros e as plataformas digitais de cargas. As análises destacam a necessidade de combinar infraestrutura, operação, serviços, regulação e ordenamento territorial.

No transporte inter-regional de passageiros, os dados indicam recuperação incompleta da demanda após a pandemia, especialmente nas ligações intermunicipais. Essa situação reforça a necessidade de adaptar a oferta nos mercados de menor escala, considerando veículos menores, integração regional e serviços flexíveis ou sob demanda. Plataformas digitais podem ser

utilizadas para organizar reservas, horários e itinerários, desde que existam canais alternativos de acesso e obrigações mínimas de atendimento.

No eixo de infraestrutura e gestão rodoviária, os temas foram consolidados nos programas de novas rodovias, ampliação e modernização da capacidade, segurança viária, regulação e priorização de demandas e pavimentação, recuperação ou estadualização de rodovias rurais. A carteira inclui novas ligações, prolongamentos, contornos, duplicações, dispositivos, acessos e adequações físicas. Também foram considerados o Programa de Estadualização de Rodovias Municipais e o Programa de Logística Rural, voltado a pontes e estradas municipais.

A segurança viária foi tratada como dimensão transversal. Projetos de duplicação, ampliação, contornos, dispositivos e correção de interseções podem aumentar a capacidade e, simultaneamente, reduzir conflitos e acidentes. Da mesma forma, acessos portuários, ferroviários e aeroportuários podem melhorar a conectividade, ampliar a integração modal e apoiar o desenvolvimento regional. Os produtos subsequentes deverão considerar esses efeitos combinados, evitando duplicar projetos ou contabilizar repetidamente seus benefícios.

O eixo de mobilidade e desenvolvimento do setor aéreo reúne o apoio ao Plano Cicloviário do Estado, às rotas cicloturísticas e religiosas e as estratégias para o setor aéreo paulista. No transporte aéreo, foram consideradas a concentração da demanda em Guarulhos e Congonhas, a capacidade disponível em Viracopos, a subutilização de aeroportos do interior, os acessos terrestres e os instrumentos fiscais utilizados para apoiar a conectividade regional. A reforma tributária cria a necessidade adicional de reavaliar os mecanismos baseados no ICMS

O eixo de planejamento territorial e desenvolvimento regional inclui o planejamento de retroáreas e bases *offshore* do pré-sal, a articulação com os municípios e a formação de polos associados às novas infraestruturas logísticas. As análises mostram que os benefícios territoriais não decorrem automaticamente da implantação de uma obra. Planos diretores, zoneamento, disponibilidade de áreas, acessos, licenciamento e infraestrutura urbana devem ser coordenados para que terminais, estações, portos e corredores apoiem atividades econômicas sem ampliar conflitos ambientais, urbanos ou fundiários.

O último eixo abrange segurança e conectividade dos sistemas de cargas, adoção de novas tecnologias em licitações, rearranjo institucional, adaptação às mudanças climáticas e instrumentos de financiamento. Foram consideradas possibilidades de integração de informações entre centros de controle, ampliação da conectividade dos corredores, contratação experimental de tecnologias, fortalecimento da capacidade institucional, incorporação do risco climático e substituição progressiva dos incentivos vinculados ao ICMS por fundos ou programas financeiros.

Os temas apresentam diferentes níveis de maturidade, escala, viabilidade e disponibilidade de dados. Alguns correspondem a projetos físicos com efeitos diretamente representáveis na rede de transportes. Outros envolvem serviços, regulação, incentivos, planejamento territorial, governança ou soluções operacionais que exigem métodos distintos de avaliação. Por essa razão, os encaminhamentos foram definidos conforme a natureza de cada proposta.

As intervenções capazes de alterar a configuração, a capacidade, os tempos, os custos ou a distribuição dos fluxos da rede serão estruturadas e simuladas no Produto D-12. Esse grupo inclui projetos adicionais de conexão portuária, novas rodovias, prolongamentos, contornos, duplicações, ampliações de capacidade e acessos terrestres representáveis no modelo. O D-12 deverá comparar projetos e combinações, estimando seus efeitos sobre os fluxos, os níveis de serviço, a acessibilidade e o desempenho do sistema.

Políticas tarifárias e fiscais, novos modelos de serviço, programas territoriais, soluções institucionais, instrumentos regulatórios e projetos que não possam ser adequadamente avaliados pela macrossimulação serão aprofundados fora da rede no Produto D-14. Alguns temas exigirão tratamento combinado: os resultados do D-12 serão utilizados como insumos para

avaliações econômicas, operacionais, territoriais, ambientais ou institucionais desenvolvidas no D-14.

Algumas propostas foram concluídas no próprio D-11. Para as plataformas digitais de cargas, verificou-se que os modelos de aproximação entre oferta e demanda já são oferecidos pelo mercado privado, não sendo necessária a criação de uma plataforma pública. A necessidade de estruturar fundos ou programas financeiros em substituição aos incentivos baseados no ICMS também foi registrada como diretriz do D-11 diante da transição tributária.

Na Parte III, o relatório estabelece que os fatores tecnológicos, energéticos e operacionais deverão ser traduzidos em hipóteses rastreáveis, relacionadas a custos, desempenho, consumo energético, emissões, renovação das frotas, infraestrutura habilitadora e ritmo de adoção. A construção dos cenários deverá distinguir a participação das tecnologias nas vendas de sua participação efetiva na frota circulante, uma vez que os resultados dependem da vida útil, do sucateamento e da permanência dos ativos existentes.

Também deverá existir coerência entre as curvas de adoção e a capacidade de implantação da infraestrutura necessária. Hipóteses de expansão da eletrificação, do biometano, dos combustíveis sustentáveis ou de outras soluções de menor emissão deverá ser acompanhadas da disponibilidade de redes elétricas, corredores e postos de abastecimento, hubs energéticos, terminais, oficinas, sistemas de controle e instalações de apoio. Tecnologias com maior maturidade e aderência ao contexto paulista poderão ser incorporadas mais diretamente aos cenários. Soluções de maior incerteza deverão ser tratadas como sensibilidades, condicionantes de longo prazo ou temas de monitoramento.

Em síntese, o Produto D-11 fornece ao PLI-SP 2050 uma base para transformar tendências tecnológicas, energéticas, operacionais, territoriais e institucionais em elementos úteis à formulação e à avaliação dos cenários futuros. O relatório preserva a relação entre os fatores analisados, os problemas identificados, os projetos propostos e seus encaminhamentos ao D-12, ao D-14 ou à conclusão no próprio D-11, contribuindo para que as etapas seguintes considerem de forma integrada a capacidade, a eficiência, a segurança, a sustentabilidade, a resiliência e os efeitos territoriais do sistema logístico paulista.

PARTE I – NOVAS FONTES DE ENERGIA E TECNOLOGIAS NOS TRANSPORTES

A Parte I tem como objetivo apresentar e sistematizar as principais tendências tecnológicas e os novos serviços com potencial de transformar o sistema de transportes e logística no horizonte do PLI-SP 2050. Esta seção estabelece a base prospectiva do Plano ao identificar, a partir da literatura especializada, de experiências internacionais e de análises setoriais, o conjunto de inovações que podem alterar padrões operacionais, estruturas de custo, requisitos de infraestrutura e a organização dos fluxos logísticos ao longo do tempo.

A abordagem adotada parte do reconhecimento de que o sistema logístico está inserido em um contexto mais amplo de transformação tecnológica e energética, marcado pela digitalização de processos, pela transição para fontes de energia de menor emissão e pela crescente integração entre diferentes modais e serviços. Nesse ambiente, tecnologias emergentes — como eletrificação, automação, sistemas inteligentes de transporte e novas soluções de mobilidade — passam a desempenhar papel central na redefinição da eficiência, da sustentabilidade e da competitividade logística.

Mais do que descrever tecnologias de forma isolada, esta Parte I busca organizá-las em vetores estruturais de transformação, considerando suas aplicações nos diferentes modais de transporte, seus níveis de maturidade e seus potenciais impactos sobre o sistema logístico. Essa sistematização permite compreender não apenas o funcionamento de cada tecnologia, mas também suas interações, complementaridades e possíveis trajetórias de difusão.

Adicionalmente, a análise considera que a incorporação dessas inovações depende de fatores que extrapolam a dimensão tecnológica, incluindo custos de implantação, disponibilidade de infraestrutura de suporte, marcos regulatórios e incentivos econômicos. Assim, embora o foco desta seção esteja na identificação do potencial transformador das tecnologias, também se reconhece que sua adoção efetiva está sujeita a condicionantes institucionais e de mercado, que serão aprofundados nas partes subsequentes do Plano.

Ao estruturar esse panorama, a Parte I fornece os insumos necessários para as análises integradas desenvolvidas nas Partes II e III, nas quais as tecnologias aqui apresentadas serão avaliadas à luz das demandas setoriais, das restrições observadas no território e das trajetórias plausíveis de adoção. Dessa forma, esta seção cumpre o papel de delimitar o espaço de possibilidades tecnológicas que fundamenta a construção dos cenários futuros do PLI-SP 2050.

1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, DESCARBONIZAÇÃO E NOVAS TECNOLOGIAS NOS TRANSPORTES

A transição energética e a incorporação de novas tecnologias constituem vetores centrais de transformação dos sistemas de logística e transportes no horizonte do PLI-SP 2050. As mudanças em curso na matriz energética, associadas ao avanço de tecnologias de propulsão, à digitalização das operações e ao fortalecimento das agendas de descarbonização, tendem a alterar de forma estrutural os custos operacionais, os padrões de oferta de serviços, a demanda por infraestrutura e os impactos ambientais do transporte de cargas e passageiros no Estado de São Paulo.

Nesse contexto, esta seção tem por objetivo analisar, de forma integrada, as principais trajetórias tecnológicas associadas à descarbonização dos transportes, considerando suas implicações técnicas, econômicas e operacionais por modo. São examinadas, em particular, as perspectivas de eletrificação, a ampliação do uso de biocombustíveis e o desenvolvimento de outras soluções tecnológicas emergentes, como o hidrogênio de baixo carbono, sistemas híbridos e ganhos de eficiência associados à digitalização e à automação. Cada uma dessas alternativas apresenta diferentes graus de maturidade tecnológica, requisitos de infraestrutura, custos de implantação e operação, bem como distintos potenciais de redução de emissões, o que exige uma avaliação criteriosa de sua aplicabilidade ao longo do horizonte do plano.

A análise parte do reconhecimento de que a adoção dessas tecnologias não ocorre de forma homogênea entre modais, regiões ou períodos do tempo, sendo condicionada por fatores como ciclos de renovação de ativos, disponibilidade energética, marcos regulatórios, capacidade institucional e viabilidade econômica. Assim, a seção não busca identificar uma solução tecnológica única ou dominante, mas mapear um conjunto de trajetórias plausíveis que, combinadas, podem influenciar a configuração futura do sistema de transportes paulista.

Além dos aspectos tecnológicos e energéticos, a seção considera as implicações dessas transformações em termos de investimentos em infraestrutura, necessidade de adaptação dos sistemas existentes e articulação com políticas públicas setoriais. Em particular, dialoga com as diretrizes estabelecidas em instrumentos de planejamento estadual e nacional, como o Plano Estadual de Energia, de modo a assegurar coerência entre os cenários do PLI-SP 2050 e as metas de descarbonização e desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, a seção estabelece o arcabouço analítico para as subseções seguintes, nas quais as tecnologias são examinadas de maneira mais detalhada por modo, culminando na avaliação de seus impactos econômicos e ambientais e em suas implicações para a definição dos cenários futuros do PLI-SP 2050.

1.1 Eletrificação de frota

A eletrificação dos transportes constitui um dos vetores centrais da transição energética no setor de transportes, ao oferecer não apenas oportunidades relevantes de redução de custos operacionais ao longo do ciclo de vida dos veículos, mas, sobretudo, ao desempenhar papel estratégico na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e na redução da dependência de combustíveis fósseis. No contexto de um horizonte de planejamento de longo prazo, como o do PLI-SP 2050, a eletrificação tende a assumir importância crescente na conformação dos cenários futuros de transporte urbano de cargas e passageiros no Estado de São Paulo.

Do ponto de vista econômico, a eletrificação apresenta potencial de redução de custos variáveis, em especial aqueles associados ao consumo energético e à manutenção, ainda que envolva custos iniciais mais elevados de aquisição de veículos e de adaptação da infraestrutura. À medida

que se observa o avanço tecnológico, ganhos de escala na produção de veículos elétricos e a expansão da infraestrutura de recarga, espera-se uma trajetória de redução desses custos iniciais, ampliando a competitividade relativa da eletrificação frente às tecnologias convencionais. Esses fatores são particularmente relevantes para serviços com elevada intensidade de uso, previsibilidade de rotas e operação concentrada em corredores urbanos e regionais.

A adoção crescente da eletrificação dialoga diretamente com as diretrizes e cenários previstos no Plano Estadual de Energia 2050 (PEE)[1], que projeta uma matriz energética progressivamente mais limpa e maior participação de fontes renováveis na geração de eletricidade. No cenário de mitigação do PEE, a eletrificação é tratada como uma das três rotas centrais de descarbonização do setor de transportes (ao lado de biocombustíveis/hidrogênio/sintéticos e do gás metano), com impactos relevantes sobre a substituição de gasolina C e a redução do diesel fóssil, especialmente no modo rodoviário.

As projeções do PEE indicam que o consumo de eletricidade associado ao transporte rodoviário, ainda incipiente atualmente, deverá crescer de forma acelerada nas próximas décadas, alcançando aproximadamente 5,4 TWh em 2030, 19 TWh em 2040 e 33,8 TWh em 2050. Cerca de 40% desse consumo projetado em 2050 está associado à frota de automóveis de passeio. Essas projeções evidenciam que a eletrificação se tornará um elemento relevante para o planejamento do sistema elétrico e da infraestrutura de recarga no horizonte do PLI-SP 2050. O modo rodoviário deverá concentrar a maior parte dessa demanda elétrica, respondendo por cerca de 79% do consumo do setor de transportes em 2030 e 91% em 2050.

Do ponto de vista da difusão tecnológica, o PEE projeta trajetórias coerentes com a lógica de adoção inicial da eletrificação em segmentos onde sua viabilidade econômica e operacional é maior. No transporte urbano coletivo, estima-se que os ônibus elétricos possam alcançar aproximadamente 60% da frota em 2050. Em caminhões urbanos (VUCs), a participação de veículos elétricos evolui de cerca de 4% em 2030 para 16,2% em 2040 e aproximadamente 35% em 2050, impulsionada pela possibilidade de recarga em centros de distribuição e garagens. Já no transporte rodoviário de longa distância, a eletrificação tende a avançar de forma mais gradual, com participação estimada de 4% em 2030, 11% em 2040 e 17% em 2050, refletindo limitações relacionadas à autonomia das baterias, à logística de recarga e às exigências operacionais do transporte de longa distância.

Nos demais modais, o PEE também projeta expansão da eletrificação, ainda que em menor escala. No transporte ferroviário de carga, o consumo elétrico pode alcançar cerca de 1 TWh em 2050, enquanto no transporte ferroviário de passageiros, associado à expansão do metrô e de projetos como os Trens Intercidades (TICs), o consumo pode atingir aproximadamente 1,6 TWh. No transporte aéreo, a eletrificação tende a se restringir a aplicações em aeronaves de pequeno porte e rotas de curta distância, com consumo estimado em torno de 0,8 TWh em 2050. Já no transporte hidroviário, o consumo projetado é da ordem de 12 GWh, associado principalmente a embarcações de pequeno porte, balsas e empurradores.

O Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo[2] (PAC 2050) estabelece metas específicas para a expansão da eletromobilidade nos diferentes segmentos da frota, em articulação com a

[1] São Paulo (2024). Plano Estadual de Energia 2050. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL).
[2] São Paulo (2022). Plano de Ação Climática 2050. São Paulo: São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL).

trajetória projetada pelo PEE 2050 para o mesmo horizonte. Entre as principais diretrizes destacam-se:

(i) Eletrificação progressiva de automóveis de passeio, com participação estimada de 55% da frota em 2050;

(ii) Eletrificação de veículos comerciais leves, com cerca de 57% da frota eletrificada no mesmo horizonte;

(iii) Expansão da participação de ônibus urbanos elétricos para aproximadamente 60% da frota; e

(iv) Aumento gradual da participação de caminhões elétricos, sobretudo em operações urbanas e regionais.

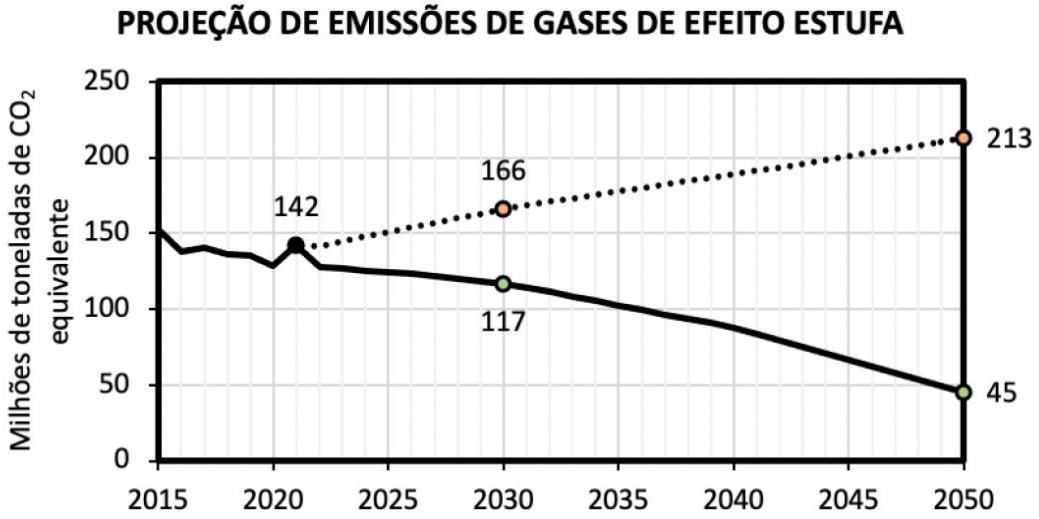
Tabela 1-1: Metas de eletrificação por categoria de veículo no Estado de São Paulo (PAC 2050 / PEE 2050)

Categoria	Metas de eletrificação (2050)
Automóveis de passeio	55% da frota
Veículos comerciais leves	57% da frota
Ônibus urbanos	60% da frota
Caminhões urbanos	35% da frota
Caminhões pesados (carga)	17% da frota
Outros modais (ferroviário, aéreo e hidroviário)	Eletrificação parcial

Fonte: PAC 2050 (2022) e PEE 2050 (2024). Fonte: Elaboração Consórcio Concremat-Transplan.

A expansão da eletromobilidade implica também aumento significativo da demanda por eletricidade no setor de transportes, que deverá crescer de cerca de 1,1 TWh em 2021 para aproximadamente 37 TWh em 2050. Para atender a essa demanda adicional sem comprometer as metas climáticas, o planejamento energético estadual prevê expansão de fontes renováveis e de baixo carbono, incluindo energia solar fotovoltaica, energia eólica offshore, bioeletricidade proveniente de biomassa e biogás, além de soluções híbridas de geração e sistemas de armazenamento. O esforço de eletrificação é fundamental para que o Estado atinja o balanço líquido zero (Net Zero) até 2050, reduzindo as emissões globais projetadas de 213 MtCO2e para apenas 45 MtCO2e no cenário de mitigação.

Figura 1-1: Evolução das emissões de CO2eq 2015-2050



Fonte: PAC 2050 (2022).

Apesar de seu potencial, a difusão da eletrificação enfrenta desafios relevantes. Entre os principais obstáculos destacam-se os custos elevados de renovação das frotas, a necessidade de investimentos significativos em infraestrutura de recarga e modernização da rede elétrica, a dependência tecnológica de componentes e materiais críticos para baterias, bem como limitações técnicas relacionadas à autonomia dos veículos em operações de longa distância. Além disso, a velocidade de adoção dessas tecnologias depende também da aceitação dos usuários e da evolução do ambiente regulatório.

Nesse contexto, políticas públicas e instrumentos regulatórios desempenham papel fundamental para viabilizar a transição. Entre as medidas discutidas no âmbito do PEE e do PAC destacam-se o desenvolvimento de marcos regulatórios para a infraestrutura de recarga, incentivos fiscais para equipamentos da cadeia de eletromobilidade, programas de compras públicas para renovação de frotas, integração com mercados de carbono e modernização da rede elétrica por meio da implantação de redes inteligentes.

Do ponto de vista ambiental, os benefícios da eletrificação dependem não apenas da substituição tecnológica no nível dos veículos, mas também da composição da matriz elétrica utilizada para gerar a energia consumida. No caso do Estado de São Paulo, a elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica amplia o potencial de redução líquida de emissões ao longo do ciclo energético, reforçando a relevância da eletromobilidade como estratégia de mitigação climática.

Além desses benefícios, a eletrificação também apresenta desafios ambientais e operacionais que devem ser considerados na avaliação de cenários futuros. A maior massa dos veículos elétricos, decorrente principalmente do peso das baterias, pode intensificar o desgaste de pneus, componentes de frenagem e do pavimento, contribuindo para a emissão de material particulado não proveniente do escapamento, incluindo microplásticos e partículas metálicas resultantes do atrito. Embora sistemas de frenagem regenerativa reduzam parte do desgaste das pastilhas de freio, tais efeitos variam conforme o tipo de veículo, o perfil operacional e as condições de utilização.

No transporte rodoviário, especialmente em operações de carga e longa distância, outro aspecto relevante é o maior tempo necessário para recarga quando comparado ao abastecimento convencional, o que pode demandar adequações operacionais, ampliação da infraestrutura de recarga e, em determinados casos, aumento do tamanho da frota para manutenção dos níveis

de serviço. Esses fatores reforçam que os benefícios da eletromobilidade devem ser analisados de forma integrada, considerando não apenas as emissões de gases de efeito estufa, mas também os impactos sobre a infraestrutura, a operação dos sistemas logísticos e o ciclo de vida dos ativos.

As aplicações da eletrificação variam significativamente entre os diferentes modais de transporte. No transporte rodoviário, observa-se maior maturidade tecnológica em veículos leves, ônibus urbanos e frotas cativas de distribuição regional, em função das menores exigências de autonomia e da maior facilidade de implantação de infraestrutura de recarga. Já no transporte rodoviário pesado de longa distância, a eletrificação tende a avançar de forma mais gradual, coexistindo com outras rotas tecnológicas de descarbonização.

No transporte ferroviário, a eletrificação já se apresenta como tecnologia consolidada em diversos contextos, oferecendo ganhos de eficiência energética, redução de emissões locais e maior confiabilidade operacional. A ampliação de trechos eletrificados pode desempenhar papel relevante na expansão de serviços ferroviários de passageiros e cargas, dependendo das características da malha existente e do modelo institucional de operação.

Em modais como o portuário e o hidroviário, a eletrificação tende a ocorrer inicialmente na forma de eletrificação de equipamentos operacionais, embarcações de pequeno porte e sistemas auxiliares, contribuindo para a redução de emissões locais e melhoria da qualidade ambiental em áreas portuárias. No transporte aéreo, por sua vez, as aplicações tendem a permanecer restritas a aeronaves de pequeno porte ou soluções híbridas no horizonte de médio prazo. Dessa forma, **a eletrificação da frota deve ser compreendida como um vetor estruturante de transformação do sistema de transportes**, com impactos diferenciados entre modais e condicionados por fatores tecnológicos, econômicos e institucionais.

No âmbito do PLI-SP 2050, a eletrificação constitui uma hipótese tecnológica relevante para a construção de cenários prospectivos. Nos exercícios de simulação desenvolvidos no Produto D12, essa trajetória será incorporada por meio de hipóteses de penetração diferenciadas por modo e tipo de operação, consistentes com as projeções do PEE 2050 e do PAC 2050. Essas hipóteses permitirão avaliar os impactos da eletrificação sobre a demanda energética do sistema de transportes, os custos logísticos, a infraestrutura necessária e as emissões associadas às diferentes trajetórias de desenvolvimento do setor até 2050.

1.2 Biocombustíveis

Os biocombustíveis desempenham papel estratégico na descarbonização do setor de transportes, sobretudo em contextos nos quais a eletrificação plena enfrenta restrições tecnológicas, operacionais ou econômicas. No caso brasileiro, e, em particular, paulista, esses combustíveis assumem relevância ainda maior em razão da ampla disponibilidade de biomassa, da maturidade da cadeia produtiva e da experiência histórica de incorporação de fontes renováveis à matriz energética dos transportes.

A vocação brasileira para a produção e o uso de biocombustíveis é amplamente reconhecida em escala internacional e se ancora em vantagens estruturais de longo prazo. O país construiu, ao longo de décadas, um dos mais robustos complexos agro energéticos do mundo, baseado sobretudo na cana-de-açúcar, com integração entre produção agrícola, processamento industrial, logística e distribuição de combustíveis. Essa trajetória permitiu o desenvolvimento de tecnologias consolidadas de produção de etanol hidratado e anidro, bem como de biodiesel a partir de diversas oleaginosas, além de criar bases técnicas e institucionais para a expansão de biocombustíveis avançados, como o etanol de segunda geração, o biometano e os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF).

No Estado de São Paulo, essa vocação se manifesta de forma particularmente intensa. O estado concentra parcela expressiva da produção nacional de cana-de-açúcar, etanol e bioeletricidade, além de dispor de infraestrutura logística, capacidade industrial instalada e centros de pesquisa e inovação que favorecem ganhos de produtividade e diversificação tecnológica[3]. O setor sucroenergético paulista, em especial, desempenha papel central tanto na oferta de biocombustíveis quanto na geração de externalidades positivas, como a cogeração de eletricidade a partir do bagaço e da palha da cana, contribuindo para a segurança energética e para a redução da intensidade de carbono da matriz elétrica estadual.

Essas características estruturais são explicitamente reconhecidas nos cenários e diretrizes do PEE, que atribui aos biocombustíveis um papel complementar e, em determinados segmentos, central na trajetória de descarbonização do setor de transportes. O PEE projeta que, mesmo com a expansão acelerada da eletrificação, os combustíveis líquidos renováveis permanecerão relevantes ao longo de todo o horizonte até 2050, sobretudo nos modais rodoviários pesado, ferroviário, hidroviário e aeroviário. Nesse contexto, o plano destaca a expansão do uso de etanol (inclusive em motores híbridos flex), biodiesel em misturas crescentes, diesel renovável, biometano e combustíveis avançados como elementos-chave para a redução das emissões associadas ao consumo de gasolina, diesel fóssil e querosene de aviação.

De forma convergente, o PAC incorpora os biocombustíveis como um dos pilares das estratégias de mitigação no setor de transportes, em articulação com a eletrificação e com ganhos de eficiência energética. O PAC reconhece que, em diversos segmentos, a substituição direta do combustível fóssil por alternativas renováveis apresenta maior viabilidade econômica e operacional no curto e médio prazo do que a troca integral da tecnologia veicular. Assim, o plano estabelece metas graduais de ampliação do uso de biocombustíveis ao longo das próximas décadas, com destaque para:

(v) O aumento da participação de biocombustíveis e combustíveis renováveis no transporte rodoviário de cargas;

(vi) A expansão do uso de etanol e soluções híbridas no transporte leve;

(vii) O aproveitamento do biometano no transporte urbano e regional; e

(viii) A introdução progressiva de saf no transporte aéreo, alinhada às diretrizes nacionais e internacionais de redução de emissões.

Uma das principais vantagens dos biocombustíveis reside em sua compatibilidade com frotas e infraestruturas existentes, o que permite uma transição gradual para padrões energéticos mais limpos, sem a necessidade de substituição imediata e integral dos ativos atualmente em operação. Essa característica é especialmente relevante em modais intensivos em capital, como o ferroviário, o rodoviário pesado, o hidroviário e o aeroviário, nos quais o tempo de renovação da frota é longo e os custos de substituição tecnológica são elevados.

No horizonte do PLI-SP 2050, os biocombustíveis se configuram, portanto, como soluções de transição e, em alguns casos, como alternativas estruturais de longo prazo, capazes de contribuir simultaneamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), a diversificação da matriz energética e o fortalecimento de cadeias produtivas regionais. A seguir, são analisados

[3] São Paulo é o maior produtor de etanol do Brasil. Em 2020, o Estado produziu 14,7 milhões de m³, o equivalente a 45,0% da produção nacional. O protagonismo paulista também se verifica na produção de cana-de-açúcar, principal insumo do etanol: no mesmo período, o Estado concentrou mais da metade da área plantada no país, com 5,5 milhões de hectares, e da quantidade colhida, com 425,6 milhões de toneladas. Fonte: SEADE (2021). São Paulo lidera produção de etanol no país. Disponível em: https://informa.seade.gov.br/sao-paulo-lidera-producao-de-etanol-no-pais/. Acesso em: 01/07/2026.

os principais tipos de biocombustíveis e combustíveis renováveis com potencial de aplicação nos sistemas de transporte do Estado de São Paulo.

1.2.1 Etanol Segunda Geração (E2G)

O Etanol de Segunda Geração (E2G) é um biocombustível produzido a partir de biomassa lignocelulósica, como palha, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos agrícolas e outros subprodutos vegetais[4]. Diferentemente do etanol de primeira geração, que utiliza açúcares ou amidos facilmente fermentáveis, o E2G resulta da conversão de materiais fibrosos por meio de processos mais complexos, envolvendo pré-tratamento da biomassa, hidrólise enzimática e fermentação. Essa rota tecnológica permite ampliar significativamente o aproveitamento energético da biomassa existente, aumentando a produção de etanol sem a necessidade proporcional de expansão de área cultivada.

Uma das principais vantagens do E2G reside em seu balanço ambiental mais favorável. Ao utilizar resíduos agrícolas, o combustível apresenta menor intensidade de emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida quando comparado tanto aos combustíveis fósseis quanto, em muitos casos, ao etanol convencional. Além disso, o E2G contribui para a redução de resíduos agrícolas, melhora a eficiência do uso da terra e fortalece cadeias produtivas já consolidadas, especialmente no contexto brasileiro, onde a produção de cana-de-açúcar é altamente integrada.

Outra vantagem relevante do E2G é sua compatibilidade com tecnologias existentes. O etanol de segunda geração pode ser utilizado de forma semelhante ao etanol convencional, seja puro ou em misturas, permitindo sua incorporação gradual às frotas e infraestruturas atuais. Essa característica torna o E2G particularmente atrativo como combustível de transição, sobretudo em setores nos quais a substituição completa de motores ou sistemas de propulsão é economicamente ou tecnicamente inviável no curto e médio prazo.

Apesar de seus benefícios, o E2G também apresenta desvantagens e desafios importantes. Do ponto de vista tecnológico, os processos de produção são mais complexos e intensivos em capital do que os do etanol de primeira geração, o que ainda se reflete em custos de produção mais elevados: a EPE estima um custo operacional de R$ 1,96/litro para o E2G (base dez/2024), ante um fator de investimento de R$ 16,92/litro, valores muito superiores aos do etanol 1G, cuja produção já está amortizada em escala industrial consolidada[5].

A escala industrial do E2G, embora em expansão, permanece limitada quando comparada às rotas tradicionais, e sua viabilidade econômica depende de ganhos de eficiência tecnológica, economias de escala e, em muitos casos, de políticas públicas de incentivo. Além disso, a logística de coleta, transporte e armazenamento da biomassa residual pode representar um desafio adicional, especialmente em regiões com menor densidade produtiva.

No que se refere às aplicações nos modais de transporte, o E2G apresenta o mesmo potencial do etanol convencional, dada sua equivalência química, variando sua aplicação conforme o tipo de serviço e as características operacionais. No transporte rodoviário, especialmente em veículos leves e comerciais, o E2G pode ser utilizado diretamente, aproveitando a ampla base de motores *flex* e a infraestrutura já existente de distribuição de etanol no país. No transporte ferroviário, o combustível surge como uma alternativa potencial para redução de emissões em trechos não

[4] Fapesp (2017). Etanol de segunda geração poderá ser economicamente viável a partir de 2025. Disponível em: https://agencia.fapesp.br/etanol-de-segunda-geracao-podera-ser-economicamente-viavel-a-partir-de-2025/26272. Acesso em: 02/03/2026.
[5] EPE (2025). Nota Técnica - Investimentos e custos operacionais de manutenção no setor de biocombustíveis: 2026-2035.

eletrificados, por meio da substituição parcial do diesel em locomotivas adaptadas. No transporte hidroviário, seu uso pode ocorrer em embarcações de menor porte ou em sistemas híbridos, contribuindo para a redução de emissões em hidrovias interiores e áreas portuárias. Já no transporte aeroviário, embora o uso direto do etanol seja limitado, o E2G pode servir como insumo para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), ampliando seu papel indireto na descarbonização do setor.

A produção comercial de E2G permanece restrita a poucas unidades industriais. Com o apoio de financiamentos como os do BNDES, a capacidade nacional deve atingir cerca de 440 milhões de litros por ano até 2028, o que ainda representa menos de 1% da produção total de etanol no país, 34,2 bilhões de litros em 2024[6]. Nos últimos anos, iniciativas de investimento têm sido impulsionadas principalmente por grandes grupos do setor sucroenergético e por instituições de financiamento público, com destaque para linhas de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) destinadas à expansão da capacidade produtiva e à consolidação tecnológica dessa rota[7].

Entretanto, mesmo considerando os projetos em expansão e o apoio institucional existente, a difusão do E2G tende a ocorrer de forma gradual ao longo das próximas décadas. A combinação de elevados custos de investimento, desafios tecnológicos e necessidade de ganhos de escala sugere que sua participação no mercado de biocombustíveis continuará relativamente limitada no curto e médio prazo.

Em síntese, o Etanol de Segunda Geração deve ser interpretado principalmente como uma tecnologia emergente com potencial de expansão futura, mas ainda com impacto relativamente modesto em termos de volumes energéticos e redução agregada de emissões no sistema de transportes. Assim, embora represente uma inovação relevante para o aumento da eficiência do setor sucroenergético e para a diversificação das rotas de descarbonização, **sua contribuição quantitativa para os cenários energéticos e de emissões considerados no PLI-SP 2050 tende a permanecer limitada quando comparada a outras estratégias de maior escala**, como a eletrificação da frota ou a expansão de biocombustíveis convencionais.

1.2.2 Diesel verde ou Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO)

O Diesel Verde, também conhecido como Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO – *Hydrotreated Vegetable Oil*), é um biocombustível avançado produzido por meio do processo de hidrogenação de óleos vegetais, gorduras animais e resíduos lipídicos, como óleos de cozinha usados. Diferentemente do biodiesel convencional, que resulta de processos de transesterificação e apresenta propriedades químicas distintas do diesel fóssil, o HVO possui composição e características físico-químicas muito semelhantes às do diesel mineral. Essa particularidade faz com que o HVO seja classificado como um combustível do tipo drop-in, capaz de substituir total ou parcialmente o diesel convencional sem necessidade de adaptações nos motores ou na infraestrutura existente[8].

Nesse sentido, o diesel verde não deve ser confundido com o biodiesel convencional. Enquanto o biodiesel é utilizado principalmente em misturas obrigatórias ao diesel fóssil, o HVO pode ser

[6] Canal Rural (2025). BNDES aprova R$ 1 bilhão para produção de etanol de segunda geração. Disponível em: https://www.canalrural.com.br/economia/bndes-aprova-r-1-bilhao-para-producao-de-etanol-de-segunda-geracao/. Acesso em: 01/07/2026.
[7] CNN Brasil (2025). BNDES aprova R$ 1 bilhão para Raízen produzir etanol de segunda geração. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/agro/bndes-aprova-r1-bi-para-projeto-de-etanol-2g-da-raizen . Acesso em: 07/03/2026.
[8] Centro de Conhecimento em Bioenergia - UFV (2020). HVO – O diesel verde renovável. Disponível em: https://ccbioenergia.ufv.br/hvo-o-diesel-verde-renovavel/. Acesso em: 10/03/2026.

empregado em proporções mais elevadas ou mesmo em substituição integral ao combustível mineral. Nos cenários energéticos considerados, o biodiesel permanece associado às misturas obrigatórias existentes, enquanto o HVO surge como um combustível adicional de origem totalmente renovável.

Uma das principais vantagens do HVO reside em seu desempenho ambiental. Quando produzido a partir de matérias-primas sustentáveis ou resíduos, o combustível pode proporcionar reduções significativas das emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, além de contribuir para a redução de emissões locais de material particulado e outros poluentes atmosféricos. Do ponto de vista operacional, o HVO também apresenta elevada estabilidade química, bom desempenho em baixas temperaturas e maior vida útil de armazenamento quando comparado ao biodiesel convencional, características que ampliam sua atratividade para aplicações logísticas e de transporte intensivo.

Apesar de seus benefícios, o HVO também apresenta desvantagens e desafios importantes. O principal deles refere-se ao custo de produção, que tende a ser superior ao do diesel convencional e, em muitos contextos, ao do biodiesel, especialmente quando o combustível é produzido a partir de matérias-primas sustentáveis certificadas ou de resíduos. No mercado internacional, referência mais consolidada para o produto, o HVO é negociado acerca do dobro do preço do diesel fóssil, patamar que já chegou a ser o triplo e e vem se reduzindo à medida que a produção global amadurece[9].

Além disso, a disponibilidade de insumos pode representar uma restrição à expansão em larga escala, uma vez que a oferta de óleos residuais e gorduras é limitada e pode gerar competição com outros usos industriais e energéticos. A sustentabilidade da cadeia produtiva depende, portanto, de critérios rigorosos de rastreabilidade e de políticas públicas que evitem impactos indiretos, como mudanças no uso da terra.

No Brasil, o marco regulatório para o diesel verde foi estabelecido pela Resolução ANP nº 842/2021[10], que autorizou sua produção e comercialização no país. Posteriormente, a Lei do Combustível do Futuro instituiu o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV), com o objetivo de incentivar a pesquisa, produção e comercialização desse combustível. A legislação prevê que o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) poderá estabelecer uma participação volumétrica mínima obrigatória de até 3% de diesel verde no diesel comercializado no país, dependendo das condições de oferta, preço e competitividade internacional do combustível.

No Estado de São Paulo, a presença de importantes ativos industriais e logísticos do setor de refino confere potencial relevante para o desenvolvimento dessa rota tecnológica. Destaca-se, por exemplo, a Refinaria de Paulínia (REPLAN), a maior do país, responsável por cerca de 20% da capacidade nacional de refino[11], e que poderia, em princípio, integrar rotas de produção de combustíveis renováveis por meio de adaptações tecnológicas ou coprocessamento de biomassa.

Nos últimos anos, diversas iniciativas empresariais têm impulsionado o desenvolvimento de plantas de diesel verde no país, em grande parte como desdobramento de projetos voltados à produção de SAF, tecnologicamente próxima e frequentemente coproduzida na mesma planta, como detalhado na seção de SAF deste relatório.

---

[9] BrasilAgro (2026). Corrida pelo biodiesel: preço cai abaixo do diesel comum pela primeira vez. Disponível em: https://www.brasilagro.com.br/conteudo/corrida-pelo-biodiesel-preco-cai-abaixo-do-diesel-comum-pela-primeira-vez.html. Acesso em: 01/07/2026.

[10] Brasil (2021). RESOLUÇÃO ANP Nº 842/2021. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616. Acesso em: 01/03/2026.

[11] Petrobras (2026). Refinaria de Paulínia (Replan): Principais Operações. Disponível em: https://petrobras.com.br/quem-somos/refinaria-de-paulinia. Acesso em: 01/07/2026.

Apesar dessas iniciativas, a maioria dos projetos ainda se encontra em fase de planejamento, avaliação ou implementação, e poucos apresentam cronogramas de operação no curto prazo. Dessa forma, a produção doméstica de diesel verde permanece incipiente, e sua participação na matriz energética brasileira é atualmente praticamente nula. Mesmo considerando os investimentos anunciados, a difusão dessa tecnologia tende a ocorrer de forma gradual ao longo das próximas décadas, condicionada a fatores como disponibilidade de matérias-primas, competitividade econômica em relação ao diesel fóssil e evolução do marco regulatório. No que se refere às aplicações nos modais de transporte, o HVO apresenta potencial particularmente relevante em setores nos quais a eletrificação plena enfrenta restrições técnicas ou econômicas.

No transporte rodoviário pesado, por exemplo, o diesel verde pode ser utilizado de forma imediata em caminhões de longa distância, frotas de distribuição e transporte coletivo, permitindo reduções de emissões sem alterações significativas na operação das frotas. De forma semelhante, no transporte ferroviário o combustível pode contribuir para a descarbonização de trechos não eletrificados, permitindo a substituição parcial ou total do diesel fóssil em locomotivas diesel-elétricas. No transporte hidroviário e marítimo, o HVO também pode ser empregado em embarcações movidas a diesel, contribuindo para a redução de emissões em hidrovias interiores e áreas portuárias.

Em síntese, o diesel verde configura-se como um biocombustível avançado, tecnologicamente consolidado em nível internacional, com grande potencial de aplicação em diferentes modais de transporte. Entretanto, apesar das vantagens ambientais e operacionais, a produção e o uso desse combustível ainda se encontram em estágio inicial no Brasil, em razão do custo elevado. Assim, no horizonte de planejamento do PLI-SP 2050, o HVO deve ser interpretado principalmente como uma tecnologia emergente no país, com potencial de expansão no longo prazo, particularmente relevante para segmentos do transporte mais difíceis de eletrificar, como o transporte rodoviário pesado e o transporte marítimo. **No curto e médio prazo, contudo, sua contribuição efetiva para a redução de emissões e para o volume total de biocombustíveis no sistema de transportes tende a permanecer limitada**.

1.2.3 Biodiesel

O biodiesel é um biocombustível produzido a partir de óleos vegetais, gorduras animais ou resíduos lipídicos, como óleos de cozinha usados, por meio de processos químicos, principalmente a transesterificação. No Brasil, o biodiesel está amplamente integrado à matriz energética dos transportes, sendo utilizado de forma obrigatória em misturas ao diesel fóssil, o que confere ao país uma das maiores experiências internacionais na produção, regulação e uso desse biocombustível em larga escala.

Diferentemente de tecnologias no Brasil emergentes, como o diesel verde (HVO) ou os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), o biodiesel já possui cadeia produtiva estruturada, marco regulatório consolidado e participação significativa na matriz energética do transporte. Atualmente, o biodiesel é o principal biocombustível utilizado na substituição parcial do diesel mineral no Brasil, com produção em 2025 próxima de 9,8 milhões de m³, o que coloca o país entre os maiores produtores mundiais[12].

Uma das principais vantagens do biodiesel reside em sua compatibilidade com motores diesel convencionais, especialmente em misturas moderadas, sem necessidade de adaptações

[12] BiodieselBR (2026). Produção de biodiesel do Brasil bate recorde em 2025. Disponível em: https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/producao/producao-de-biodiesel-do-brasil-bate-recorde-de-producao-de-m-em-2025-030226. Acesso: 04/03/2026.

significativas na frota ou na infraestrutura de abastecimento. Essa característica permite sua incorporação imediata às operações existentes, constituindo uma solução de transição de baixo risco tecnológico para a redução de emissões no setor de transportes. Do ponto de vista ambiental, o biodiesel apresenta potencial relevante de redução das emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, sobretudo quando produzido a partir de matérias-primas sustentáveis ou resíduos, além de contribuir para a diminuição de emissões locais de material particulado e outros poluentes atmosféricos.

Outro aspecto importante refere-se aos impactos econômicos e estruturais associados à produção do biodiesel. A expansão desse combustível contribui para o fortalecimento de cadeias agroindustriais, diversificação da matriz energética e aumento da segurança energética nacional. No Brasil, a ampla disponibilidade de insumos agrícolas, especialmente derivados da soja e de gorduras animais, combinada com políticas públicas de incentivo, tornou o biodiesel uma alternativa madura e escalável para a descarbonização parcial do setor de transportes.

Apesar dessas vantagens, o biodiesel apresenta algumas limitações técnicas e estruturais que devem ser consideradas em cenários de longo prazo. Em misturas elevadas, podem surgir restrições relacionadas à estabilidade do combustível, à compatibilidade com determinados materiais e ao desempenho em baixas temperaturas. Por essa razão, os fabricantes de motores geralmente recomendam limites técnicos para o uso do biodiesel[13]. O PEE 2050, por exemplo, destaca que o biodiesel do tipo FAME pode ser utilizado com segurança em misturas de até aproximadamente 15%, enquanto concentrações superiores podem demandar ajustes tecnológicos ou monitoramento adicional.

Do ponto de vista econômico, o biodiesel tende a apresentar custos de produção superiores ao diesel fóssil, em 2024, o preço médio do produtor do biodiesel variou de R$ 4,29 em janeiro para R$ 6,38 em dezembro de 2024, um aumento de 48,7%, enquanto o diesel A variou de R$ 3,90 para R$ 3,92, alta de apenas 0,5%, ou seja, o biodiesel estava R$ 2,46/L (63%) mais caro que o diesel A no preço de produtor[14]. No entanto, a política de mistura obrigatória garante estabilidade de demanda e previsibilidade para o setor produtivo. Além disso, instrumentos de política pública contribuem para a competitividade do biocombustível, com destaque para o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e para a política RenovaBio, que reconhece o biodiesel como combustível estratégico e estabelece mecanismos de mercado para a redução de emissões por meio da emissão de créditos de descarbonização (CBIOs).

As projeções energéticas de longo prazo indicam que o biodiesel continuará desempenhando papel relevante na matriz energética do transporte. O PEE 2050 projeta que, no cenário de mitigação, a participação combinada de combustíveis não fósseis no ciclo diesel, incluindo biodiesel e diesel verde, pode aumentar significativamente ao longo das próximas décadas, elevando a parcela renovável do mix de aproximadamente 11% em 2021 para cerca de 60% em 2050. Nesse contexto, estima-se que a demanda combinada por biodiesel e diesel verde possa crescer de cerca de 1,2 bilhão de litros em 2021 para aproximadamente 4 bilhões de litros em 2050 no estado de São Paulo.

No que se refere às aplicações nos modais de transporte, o biodiesel apresenta maior relevância no transporte rodoviário, especialmente no segmento de cargas e no transporte coletivo. Nesse setor, o combustível já atua como substituto parcial do diesel fóssil, permitindo reduções imediatas de emissões sem alterações significativas nos padrões operacionais das frotas. Essa

[13] EPE (2020). Plano Nacional de Energia – PNE 2050.
[14] ANP (2025). Análise de Conjuntura – Boletim Trimestral do Mercado de Combustíveis – 1° Trimestre/ 2025.

característica tende a manter o transporte rodoviário como o principal vetor de difusão do biodiesel no curto e médio prazo.

No modo ferroviário, o **biodiesel** também pode contribuir para a redução de emissões em trechos não eletrificados, sobretudo no transporte de cargas. Testes operacionais realizados no Brasil indicam a viabilidade do uso de misturas mais elevadas em locomotivas diesel-elétricas: em 2025, a Vale fechou acordo com a Wabtec para 50 novas locomotivas da série Evolution (36 na Estrada de Ferro Vitória a Minas e 14 na Estrada de Ferro Carajás), capazes de operar com até 25% de biodiesel; testes de laboratório na Carajás já indicam viabilidade técnica de misturas de até 50%, sem impactos relevantes no desempenho operacional (Vale/Wabtec, 2025).

Em configurações híbridas, a Rumo iniciou testes com locomotivas diesel-elétricas equipadas com banco de baterias (modelo GT38H, Progress Rail) na malha do Paraná[15]. Essa alternativa torna-se particularmente relevante em corredores ferroviários de longa extensão, nos quais a eletrificação plena envolve investimentos elevados. No transporte hidroviário, o **biodiesel** pode ser utilizado em embarcações movidas a motores diesel, contribuindo para a redução de emissões em hidrovias interiores e áreas portuárias, onde os impactos ambientais locais são mais sensíveis.

Em síntese, o biodiesel configura-se como um biocombustível de elevada maturidade tecnológica e institucional, com ampla experiência de uso no Brasil e papel relevante na redução gradual das emissões no setor de transportes. Embora apresente limitações relacionadas a misturas elevadas e desafios associados à sustentabilidade da cadeia produtiva, o biodiesel tende a permanecer como uma das principais alternativas de descarbonização no ciclo diesel, especialmente no transporte rodoviário de cargas. Nesse sentido, o combustível desempenha papel estratégico nos cenários futuros do sistema de transportes, atuando como solução de transição e complementando rotas tecnológicas de longo prazo, como a eletrificação da frota e o desenvolvimento de combustíveis avançados de baixo carbono.

1.2.4 Biogás e Biometano

O biogás é um combustível renovável produzido a partir da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos, como resíduos agrícolas, dejetos animais, efluentes agroindustriais e resíduos sólidos urbanos. Esse processo gera uma mistura gasosa composta majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Quando o biogás passa por processos de purificação e remoção de impurezas, obtém-se o biometano, combustível com as mesmas características físico-químicas do gás natural fóssil, podendo ser utilizado de forma direta em motores a gás ou injetado em redes de distribuição existentes.

Uma das principais vantagens do biogás e do biometano reside em seu elevado desempenho ambiental, especialmente quando analisado ao longo do ciclo de vida. Por serem produzidos a partir de resíduos orgânicos, esses combustíveis apresentam potencial significativo de redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa, incluindo a mitigação de emissões de metano

[15] Vale (2025). Vale e Wabtec fecham acordo para a compra de locomotivas para a EFVM e EFC. Disponível em: https://vale.com/w/vale-e-wabtec-fecham-acordo-para-a-compra-de-locomotivas-para-a-efvm-e-efc-1. Acesso: 01/07/2026.
BiodieselBR (2025). Vale inicia testes para trocar diesel por etanol em locomotivas. Disponível em: https://www.biodieselbr.com/noticias/qualidade/motor/vale-inicia-testes-para-trocar-diesel-por-etanol-em-locomotivas-131025. Acesso: 01/07/2026.
Portos e Navios (2023). Rumo investe em locomotivas híbridas para operação de carga com menor impacto ambiental. Disponível em: https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/rumo-investe-em-locomotivas-hibridas-para-operacao-de-carga-com-menor-impacto-ambiental. Acesso: 01/07/2026.

que, de outra forma, seriam liberadas na decomposição dos resíduos. Além disso, sua produção contribui para a gestão ambientalmente adequada de resíduos, reforçando estratégias de economia circular e integração entre os setores de saneamento, agropecuária, indústria e transportes.

Outra vantagem relevante é a compatibilidade tecnológica do biometano com sistemas energéticos baseados em gás natural. Motores, tanques, sistemas de compressão e parte da infraestrutura de distribuição podem ser utilizados sem adaptações, reduzindo as barreiras à adoção e permitindo uma transição gradual a partir do uso do biometano. Essa característica torna o biometano particularmente atrativo como combustível de transição em contextos nos quais a eletrificação plena ou outras soluções de baixo carbono enfrentam restrições técnicas ou econômicas, especialmente em aplicações de transporte pesado e operações de longa distância.

Apesar de seus benefícios ambientais e energéticos, o biogás e o biometano também enfrentam desafios estruturais que podem limitar sua expansão. A produção desses combustíveis depende diretamente da disponibilidade de resíduos orgânicos e da eficiência dos sistemas de coleta, transporte e processamento desses materiais, o que pode restringir a escala de produção em determinadas regiões.

Além disso, os investimentos iniciais necessários para implantação de plantas de biodigestão, sistemas de purificação do biogás e infraestrutura de compressão ou liquefação podem ser elevados, sobretudo em projetos de menor porte. Como resultado, a viabilidade econômica desses empreendimentos frequentemente depende de políticas públicas de incentivo, mecanismos de precificação de carbono e da valorização dos benefícios ambientais associados à redução de emissões de gases de efeito estufa e ao tratamento adequado de resíduos.

Adicionalmente, a expansão do mercado de biometano enfrenta desafios relacionados à infraestrutura de distribuição e ao modelo de comercialização do gás. Diferentemente de combustíveis líquidos, o transporte de gás exige infraestrutura específica, como gasodutos, unidades de compressão ou sistemas de transporte em forma comprimida ou liquefeita, o que pode elevar custos logísticos e limitar a expansão do mercado em determinadas localidades. Outro aspecto relevante refere-se à certificação ambiental do combustível. Parte da atratividade econômica do biometano está associada ao chamado atributo ambiental, que permite comprovar sua origem renovável e possibilita sua integração a mecanismos de mercado, como sistemas de certificação ambiental ou mercados de créditos de carbono.

Entretanto, quando o biometano é injetado diretamente na rede convencional de gás natural, pode ocorrer a perda de rastreabilidade do combustível renovável, dificultando a comprovação de sua origem e, consequentemente, a captura do valor econômico associado a seus atributos ambientais. Essa limitação evidencia a importância do desenvolvimento de mecanismos de certificação e rastreamento que permitam preservar o valor ambiental do gás renovável mesmo quando transportado por infraestruturas compartilhadas.

No contexto das políticas públicas de descarbonização, tanto o PAC 2050 quanto o PEE 2050 destacam o biogás e o biometano como vetores relevantes da transição energética. No setor de transportes, o PAC prevê a expansão gradual da participação do biometano no mix de gás veicular (GNV + biometano), com metas indicativas de 5% em 2030, 25% em 2040 e 50% em 2050, com foco na substituição de diesel e gás natural fóssil em veículos pesados.

No setor de resíduos, o plano enfatiza a captura e o aproveitamento energético do biogás proveniente de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto, contribuindo para a redução das emissões de metano e para a geração de energia renovável. Também são destacadas sinergias com o setor agropecuário, por meio da adoção de sistemas de biodigestão capazes de produzir simultaneamente biometano e fertilizantes orgânicos (biodigestato), além da possibilidade de integração com tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

O Plano Estadual de Energia aprofunda a análise do potencial produtivo e das aplicações do biogás em São Paulo. O documento projeta aumento da participação do biogás na geração de bioeletricidade e prevê expansão do uso de biometano na matriz térmica industrial e nas redes de gás canalizado. O estado apresenta elevado potencial de produção, estimado em cerca de 6,4 milhões de Nm³ de biogás por dia, oriundo principalmente do setor sucroenergético, da agropecuária e do saneamento[16]. Regiões como Araçatuba, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto concentram parte significativa desse potencial devido à elevada densidade de usinas sucroenergéticas e à forte presença de atividades agroindustriais.

As estimativas mais recentes indicam que o potencial técnico de produção de biogás no Brasil situa-se na ordem de 80 a 85 bilhões de Nm³ por ano[17] [18]. Esse volume corresponde a aproximadamente 44,5 bilhões de Nm³ anuais de biometano após os processos de purificação. Esse potencial está fortemente associado ao aproveitamento de resíduos agropecuários, agroindustriais e urbanos, refletindo a estrutura produtiva brasileira e a elevada disponibilidade de substratos orgânicos.

No que se refere à oferta atual, dados da ANP indicam a existência de um conjunto ainda limitado, porém crescente, de empreendimentos autorizados a produzir biometano no Brasil, com predominância de projetos associados a aterros sanitários e ao setor sucroenergético. A Tabela abaixo apresenta a capacidade instalada por empresa.

Tabela 1-2: Capacidade atual de produção de Biometano por empresa

Nº	Empresa	Município	UF	Matéria-prima (Feedstock)	Capacidade de Produção (Nm³/dia)
1	Cocal Energia S.A.	Narandiba	SP	Produtos orgânicos e resíduos da agroindústria e atividades comerciais	27.112,8
2	Engep Ambiental Ltda.	Jambeiro	SP	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	30.000
3	Essencis Biometano S.A.	Caieiras	SP	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	67.200
4	Gás Verde S.A.	Seropédica	RJ	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	204.000
5	GNR Dois Arcos Valorização de Biogás Ltda.	São Pedro da Aldeia	RJ	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	16.000
6	GNR Fortaleza Valorização de Biogás Ltda.	Caucaia	CE	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	110.000
7	Metagás Biogás e Energia S.A.	São Paulo	SP	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	30.000
8	Raízen-Geo Biogás Costa Pinto Ltda.	Piracicaba	SP	Produtos orgânicos e resíduos da agroindústria e atividades comerciais	130.368
9	Adecoagro Vale do Ivinhema S.A.	Ivinhema	MS	Cana-de-açúcar e resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	8.000
10	CRI Geo Biogás S.A.	Elias Fausto	SP	Produtos orgânicos e resíduos da agroindústria e atividades comerciais	23.694

[16] FIESP (2026). Biometano pode substituir até 32% do gás natural em São Paulo. Disponível em: https://www.fiesp.com.br/mobile/noticias/?id=305094. Acesso em: 27/07/2026.
[17] ABiogas. O Potencial Brasileiro de Biogás; Technical Note; Associação Brasileira Do Biogás: São Paulo, Brasil, 2019.
[18] Nm³ corresponde ao volume que o gás ocupa a 0 Graus e 1 ATM.

Nº	Empresa	Município	UF	Matéria-prima (Feedstock)	Capacidade de Produção (Nm³/dia)
11	Geo Elétrica Tamboara Bioenergia Ltda.	Tamboara	PR	Produtos orgânicos e resíduos da agroindústria e atividades comerciais	31.200
12	ZEG Biogás Aroeira SPE Ltda.	Tupaciguara	MG	Produtos orgânicos e resíduos da agroindústria e atividades comerciais	16.912
13	Biometano Sul S.A.	Minas do Leão	RS	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	64.848
14	Bioenergia Santa Cruz Ltda.	Fazenda Santa Cruz	SP	Produtos orgânicos e resíduos da agroindústria e atividades comerciais	82.575
15	Orizon Biometano Jaboatão dos Guararapes Ltda.	Guararapes	PE	Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	108.931
16	SPE Central de Tratamento Integrado Resíduo Zero Ltda.	Triunfo	RS	Produtos orgânicos e resíduos da agroindústria e atividades comerciais	36.000

Fonte: ANP (2026)[19].

No que se refere às aplicações nos modais de transporte, o biometano apresenta potencial diferenciado conforme o perfil das operações logísticas. No transporte rodoviário, especialmente em frotas cativas de ônibus urbanos, caminhões de coleta de resíduos e transporte regional de cargas, o combustível já se mostra tecnicamente viável e ambientalmente eficiente, permitindo reduções significativas de emissões locais e de ruído.

No transporte ferroviário, embora o uso ainda seja incipiente, o biometano pode representar uma alternativa para trechos não eletrificados, seja por meio de locomotivas adaptadas ou de sistemas híbridos que utilizem o gás para geração elétrica embarcada. No transporte hidroviário, o biometano pode ser empregado em embarcações equipadas com motores a gás, contribuindo para a redução de emissões em hidrovias interiores e em áreas portuárias. Já no modo aeroviário, embora não seja utilizado diretamente como combustível, o biogás pode atuar como insumo energético em cadeias produtivas associadas à produção de combustíveis sustentáveis de aviação ou no suprimento energético de aeroportos.

De forma geral, o principal uso emergente do biometano no Brasil concentra-se no transporte rodoviário pesado, onde o combustível pode substituir o diesel em caminhões de carga, ônibus urbanos, veículos de coleta de resíduos e frotas agrícolas. Como apresenta propriedades semelhantes às do gás natural, o biometano pode ser utilizado nos mesmos motores e na mesma infraestrutura de abastecimento destinada ao GNV, reduzindo custos de adaptação tecnológica e facilitando sua adoção em larga escala.

Apesar desse potencial de substituição, a ampliação da frota rodoviária pesada movida a GNV ou biometano no Brasil ainda enfrenta obstáculos estruturais relevantes, especialmente relacionados à disponibilidade de infraestrutura de abastecimento. Embora o país conte atualmente com cerca de 1.700 postos de GNV, a maior parte está concentrada em áreas urbanas e não dispõe de estrutura adequada para o atendimento de veículos pesados. Estima-

[19] ANP (2026). Painel Dinâmico de Produtores de Biometano. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biometano. Acesso em: 01/07/2026.

se que apenas cerca de 45 postos estejam localizados em rodovias, o que limita a utilização desses veículos em corredores logísticos de média e longa distância.

Soma-se a esse entrave o elevado investimento inicial necessário para a aquisição dos caminhões, contribuindo para que os veículos movidos a gás ainda representem uma parcela marginal da frota pesada nacional[20]. Nesse contexto, uma alternativa a ser considerada seria a inclusão, nos contratos de novas concessões rodoviárias, de obrigações ou incentivos à instalação de postos de abastecimento de gás ao longo dos trechos concedidos, de modo a ampliar a cobertura da rede e criar condições mais favoráveis à expansão gradual da frota pesada movida a biometano.

Dessa forma, no contexto da transição energética e da descarbonização do setor de transportes, o biogás e o biometano configuram-se como alternativas estratégicas para os cenários energéticos futuros. Sua elevada disponibilidade no Brasil, associada à capacidade de transformar passivos ambientais em energia renovável, confere ao país vantagens comparativas relevantes no desenvolvimento dessa cadeia produtiva. Em particular, o uso do biometano no transporte rodoviário de cargas apresenta elevado potencial de expansão, uma vez que permite reduzir emissões em um segmento no qual a eletrificação ainda enfrenta desafios técnicos, operacionais e econômicos. Assim, **o biometano tende a desempenhar papel importante na diversificação da matriz energética do transporte pesado e na construção de sistemas logísticos mais sustentáveis nas próximas décadas**.

1.2.5 Sustainable Aviation Fuel (SAF)

O *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) é um combustível líquido para aviação produzido a partir de matérias-primas renováveis ou de baixo carbono, projetado para ser quimicamente compatível com o querosene de aviação convencional (Jet A/Jet A-1). Essa compatibilidade permite seu uso como combustível *drop*-in, ou seja, sem necessidade de modificações estruturais em aeronaves, motores ou sistemas de abastecimento, dentro dos limites de mistura certificados. Essa característica confere ao SAF um papel singular na transição energética do modo aéreo, uma vez que viabiliza reduções significativas de emissões sem exigir a substituição imediata da frota existente.

[20] ABEGÁS (2026). Citado em: Caminhões a gás avançam no Brasil, mas ainda representam 0,1% da frota pesada. Disponível em: https://www.terra.com.br/noticias/caminhoes-a-gas-avancam-no-brasil-mas-ainda-representam-01-da-frota-pesada,f5f96402d5d98c4743976971e77aac8fmcpycq3g.html. Acesso em: 01/07/2026.

Figura 1-2: Visão Geral do Processo de Produção e Consumo do SAF[21]



Fonte: FlightRadar24 (2023) — Traduzido e adaptado pelo Consórcio Concremat-Transplan (2026).

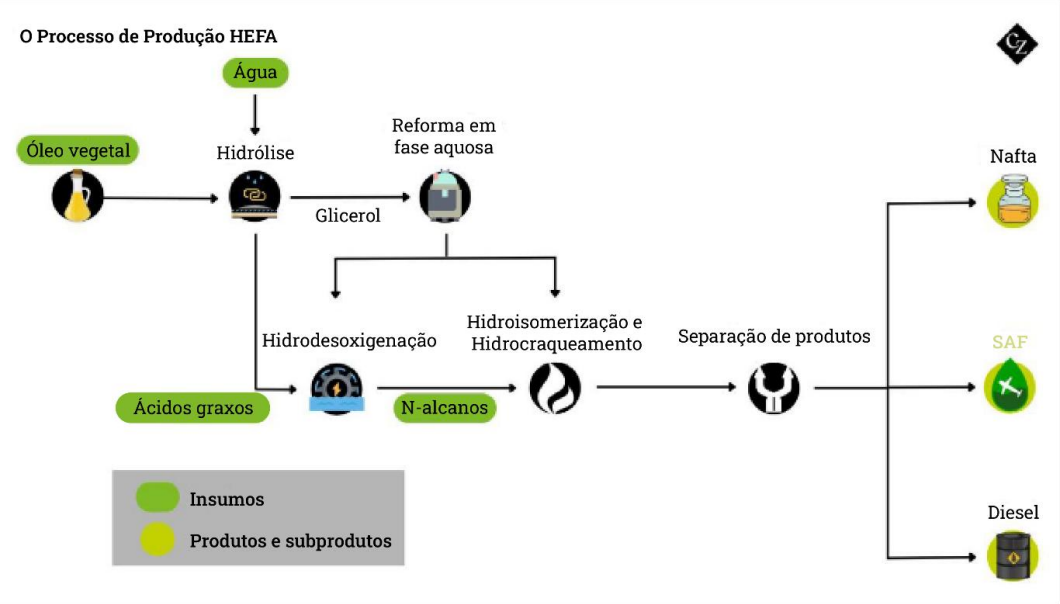
O desempenho ambiental e econômico do SAF está fortemente associado às matérias-primas (*feedstocks*) utilizadas em sua produção. Entre as principais fontes atualmente consideradas destacam-se óleos vegetais e gorduras residuais, etanol (rota *Alcohol-to-Jet* – AtJ), resíduos orgânicos e urbanos, biomassa lignocelulósica e rotas baseadas em dióxido de carbono capturado combinado com hidrogênio de baixo carbono. A escolha do *feedstock* influencia diretamente a intensidade de emissões ao longo do ciclo de vida, a escalabilidade do processo produtivo e o grau de competição com outros usos energéticos ou alimentares, sendo, portanto, elemento central na avaliação de sustentabilidade do combustível.

As rotas tecnológicas de produção do SAF apresentam diferentes níveis de maturidade, custos e potencial de redução de emissões. As principais rotas incluem processos baseados em óleos e gorduras, como a rota HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), rota *Alcohol-to-Jet* (AtJ), que converte etanol em SAF, tem particular relevância para o Brasil dada a escala da produção nacional de etanol, a conversão de resíduos sólidos urbanos, a gaseificação de biomassa lignocelulósica e as rotas sintéticas conhecidas como *Power-to-Liquid* (PtL), nas quais hidrogênio de baixo carbono é combinado com CO_2 capturado para a produção de hidrocarbonetos líquidos. Cada uma dessas rotas envolve trade-*offs* específicos entre disponibilidade de insumos, custo de produção e desempenho ambiental.

A rota HEFA é atualmente a mais madura tecnologicamente e a mais difundida em escala comercial. Nesse processo, óleos vegetais e gorduras residuais passam por hidrorrefino, resultando em combustíveis com propriedades físicas e químicas equivalentes às do querosene de aviação. Apesar de sua elevada maturidade e confiabilidade operacional, a expansão dessa rota é limitada pela disponibilidade sustentável de matérias-primas, o que impõe restrições à sua escalabilidade no longo prazo.

[21] https://www.flightradar24.com/blog/aviation-explainer-series/what-is-saf/

Figura 1-3: Processo de Produção pela rota HEFA[22]



Fonte: CZApp (2024) — Traduzido e adaptado pelo Consórcio Concremat-Transplan (2026).

Rotas mais avançadas, como aquelas baseadas na conversão de resíduos sólidos urbanos, na gaseificação de biomassa e nas tecnologias *Power-to-Liquid*, apresentam potencial de escala e de redução de emissões ao longo do ciclo de vida. No entanto, essas rotas ainda enfrentam desafios tecnológicos relevantes, elevados custos de capital e menor maturidade industrial, o que tende a restringir sua adoção no curto prazo, situando sua relevância principalmente em horizontes de médio e longo prazo.

Do ponto de vista ambiental, o principal benefício do SAF reside na redução das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida, avaliada por meio de análises de *Life Cycle Assessment* (LCA). Dependendo da rota tecnológica e da matéria-prima utilizada, as reduções de emissões podem variar de aproximadamente 60% a mais de 90% em comparação com o combustível fóssil convencional, mantendo desempenho energético equivalente durante a operação em voo.

A análise de ciclo de vida considera todas as etapas do processo, incluindo a produção da matéria-prima, o processamento industrial, o transporte e a distribuição, bem como o uso final na aeronave. Adicionalmente, o SAF contribui para a redução de emissões locais de material particulado e enxofre, com efeitos positivos sobre a qualidade do ar em áreas aeroportuárias.

A integração do SAF à aviação existente, viabilizada pelo conceito *drop-in*, constitui um dos principais fatores de sua atratividade. Ao permitir a mistura com o querosene fóssil em proporções certificadas, o SAF evita investimentos imediatos em nova frota, reduz riscos operacionais e regulatórios e possibilita uma transição gradual da matriz energética da aviação, compatível com a longa vida útil dos ativos do setor.

No Brasil, diversas iniciativas empresariais têm sido anunciadas com o objetivo de desenvolver plantas industriais voltadas à produção de diesel verde e SAF no país. A Petrobras, por exemplo, indicou em seu Plano Estratégico 2025–2029 a intenção de investir em projetos de produção de biocombustíveis avançados, incluindo unidades dedicadas à produção de HVO e SAF. Entre os

[22] https://www.czapp.com/analyst-insights/the-pros-and-cons-of-the-hefa-pathway-for-saf

projetos em carteira destaca-se a implantação de uma planta baseada na rota HEFA na Refinaria Presidente Bernardes (RPBC), em Cubatão (SP), com início de operação previsto para o final da década e capacidade estimada de cerca de 15 mil barris por dia. Outros projetos em avaliação incluem unidades no Complexo Boaventura (RJ) e na Refinaria de Paulínia (SP), envolvendo rotas tecnológicas como HEFA e ATJ[23].

Outras iniciativas privados também têm sido anunciadas. A Refinaria de Petróleo Riograndense (RPR), em parceria com a empresa dinamarquesa Topsoe, planeja converter sua estrutura em uma biorrefinaria voltada à produção de SAF e HVO, com previsão de início das operações em 2028 e capacidade estimada de aproximadamente 15 mil barris por dia.

De forma semelhante, a Acelen Renováveis anunciou investimentos superiores a R$ 12 bilhões para a conversão da Refinaria de Mataripe, na Bahia, em uma biorrefinaria destinada à produção de combustíveis renováveis, com capacidade estimada de cerca de 1 bilhão de litros por ano de SAF e diesel verde até 2035. Projetos adicionais também vêm sendo anunciados por outras empresas, incluindo iniciativas voltadas à produção consorciada de combustíveis renováveis e coprocessamento de biomassa em refinarias existentes[24].

No contexto brasileiro, a agenda de SAF avançou desde a promulgação da Lei nº 14.993/2024, que instituiu o ProBioQAV no âmbito do Programa Combustível do Futuro. Pela nova política, os operadores aéreos domésticos passam a cumprir metas graduais de redução de emissões associadas ao combustível, com obrigação inicial de 1% a partir de 2027 e crescimento até 10% em 2037. Paralelamente, o cumprimento das metas internacionais no âmbito do CORSIA reforça a tendência de expansão da demanda por combustíveis sustentáveis também nos voos internacionais. A EPE destaca que, nesse contexto, o SAF tende a assumir papel central na descarbonização da aviação brasileira, embora a regulamentação operacional do programa e a consolidação das regras de certificação, rastreabilidade e contabilização de emissões ainda sejam etapas decisivas para a formação desse mercado[25].

Do ponto de vista da oferta, o país já deixou a fase exclusivamente conceitual e passou a registrar produção e projetos comerciais concretos. Em dezembro de 2025, a Petrobras anunciou as primeiras entregas do primeiro SAF produzido integralmente no Brasil, com volume de 3 mil m³ comercializado para distribuidoras que operam no Aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro. Além disso, levantamentos recentes da EPE e da ANAC indicam uma carteira crescente de projetos anunciados no país, envolvendo diferentes rotas e matérias-primas.

Entre os projetos mais citados estão a Acelen, com previsão de produção via HEFA a partir de 2027; a Petrobras, com produção prevista também na Refinaria de Paulínia (REPLAN) ainda em 2026[26], e iniciativas adicionais associadas à Refinaria Riograndense. Destaca-se ainda o projeto da *Geo bio gas&carbon* em parceria com a cooperação técnica alemã (GIZ), que instalará no interior de São Paulo a primeira planta brasileira de SAF a partir de biogás, com produção estimada de 750 mil litros/dia até 2026[27]. Em sua edição mais recente sobre SAF, a EPE estima que os projetos anunciados em escala comercial possam totalizar cerca de 2,1 bilhões de litros

[23] EPE (2025). NOTA TÉCNICA - Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2024.
[24] Brasil Energia (2025). HVO: pouco conhecido, mas com excelentes credenciais. Disponível em: https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/acoes-em-transicao-energetica/hvo-pouco-conhecido-mas-com-excelentes-credenciais. Acesso em: 11/03/2026.
[25] EPE (2025). NOTA DE ESCLARECIMENTO - NE-EPE-DPG-SDB-2024-81 – Lei Combustível do Futuro.
[26] Petrobras (2026). SAF: veja como investimos em tecnologia rumo ao futuro dos combustíveis sustentáveis. Disponível em: https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/saf-veja-como-investimos-em-tecnologia-rumo-ao-futuro-dos-combustiveis-sustentaveis. Acesso em: 14/07/2026.
[27] Semil-SP (2024). São Paulo terá primeira planta industrial de combustível sustentável de aviação (SAF) a partir de resíduos do Brasil. Disponível em: https://semil.sp.gov.br/2024/10/sao-paulo-tera-primeira-planta-industrial-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao-saf-a-partir-de-residuos-do-brasil/. Acesso em: 11/07/2026.

por ano em 2030 e 3,6 bilhões de litros por ano em 2035, volume significativamente superior ao mapeado no levantamento anterior[28].

Essa evolução confirma que o Brasil reúne condições particularmente favoráveis para o desenvolvimento de uma indústria competitiva de SAF. Segundo a EPE, o país pode se destacar nessa cadeia em razão de sua experiência acumulada em biocombustíveis, da ampla disponibilidade de biomassa, resíduos e outras fontes renováveis de energia, bem como da existência de infraestrutura industrial e logística já articulada com cadeias como etanol, óleos vegetais, açúcar e biocombustíveis avançados.

Estudo recente do MIT[29] para a América Latina reforça esse diagnóstico ao indicar que o Brasil apresenta uma das estruturas de custo mais competitivas da região para produção de SAF, com faixas estimadas entre US$ 1,11 e US$ 1,77 por litro, inferiores às observadas em diversos outros países latino-americanos. O mesmo estudo aponta que, em um cenário de integração regional do mercado de SAF, o Brasil tende a se tornar exportador líquido, ao lado de alguns poucos países com maior disponibilidade de *feedstocks* e custos relativamente menores[30].

No médio e longo prazo, a perspectiva internacional reforça ainda mais esse potencial. A ICAO mantém como objetivo de longo prazo a neutralidade líquida de carbono na aviação internacional até 2050 e reconhece o SAF como a principal alavanca para reduzir as emissões do setor. Na mesma direção, o regulamento europeu *ReFuelEU Aviation* estabeleceu participação mínima de 2% de SAF nos aeroportos da União Europeia a partir de 2025, com aumento para 70% em 2050, incluindo submeta específica para combustíveis sintéticos. No Reino Unido, o mandato começou em 2025 com 2% do combustível de aviação, devendo atingir 10% em 2030 e 22% em 2040. Esses marcos regulatórios indicam que a demanda por SAF tenderá a crescer de forma estrutural nas próximas décadas, não apenas para abastecimento doméstico, mas também para atender mercados externos cujas regras de descarbonização passarão a exigir volumes crescentes de combustível sustentável[31].

As projeções globais mostram, contudo, que o desafio de escala será expressivo. A IATA estima que seriam necessários cerca de 500 milhões de toneladas de SAF em 2050 para compatibilizar o setor aéreo com a meta de net zero, enquanto seu cenário-base projeta potencial global de produção pouco acima de 400 milhões de toneladas, revelando uma lacuna relevante entre oferta potencial e demanda esperada. O mesmo estudo identifica Estados Unidos, Brasil, Europa e Índia como alguns dos principais polos de disponibilidade de biomassa para produção futura de SAF. Para a América Latina, projeta que, em um cenário ambicioso com participação de 65% de SAF no consumo de combustível de aviação em 2050, seria possível reduzir aproximadamente 60% das emissões do setor, embora a neutralidade total ainda dependa de ganhos adicionais de eficiência, renovação de frota, melhorias operacionais e outros instrumentos complementares[32].

Nesse sentido, o Brasil apresenta potencial não apenas para suprir parte relevante de sua própria demanda doméstica, mas também para ocupar posição estratégica como exportador de SAF e

[28] Agência Petrobras (2025). Petrobras lança combustível sustentável de aviação produzido totalmente no Brasil. Disponível em: https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-lança-combustível-sustentável-de-aviação-produzido-totalmente-no-brasil. Acesso em: 11/03/2026.
[29] Paltsev, S., Gurgel, A., Morris, J., Chen, H., Allroggen, F. & Keogh, N. (2024). Sustainable Decarbonization of Aviation in Latin America. MIT Center for Sustainability Science and Strategy (CS3) Special Report, Cambridge, MA. Disponível em: https://cs3.mit.edu/publication/118414. Acesso em: 01/07/2026.
[30] EPE (2025). Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil e sinergia com o diesel verde.
[31] European Commision (2024). ReFuelEU Aviation. Disponível em: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en. Acesso em: 10/03/2026.
[32] IATA (2025). Global Feedstock Assessment for SAF Production.

de outros combustíveis sustentáveis de aviação. A combinação entre disponibilidade de biomassa, expertise regulatória em biocombustíveis, capacidade agroindustrial e localização logística favorável cria condições para que o país participe de forma competitiva de um mercado internacional em rápida expansão. Esse potencial tende a ganhar importância à medida que se intensificam as exigências de redução de emissões no transporte aéreo e, de forma correlata, em cadeias energéticas conectadas ao transporte marítimo e à exportação de combustíveis de baixo carbono.

Em síntese, o SAF configura-se como a principal alternativa de descarbonização da aviação no horizonte até 2050, dadas sua compatibilidade técnica com a frota existente, sua aderência às exigências regulatórias internacionais e seu elevado potencial de redução de emissões ao longo do ciclo de vida. No caso brasileiro, os avanços regulatórios recentes e a carteira de projetos anunciados indicam que o país já entrou na fase inicial de estruturação de uma oferta doméstica relevante. Ao mesmo tempo, a expansão desse mercado dependerá da consolidação regulatória, da redução de custos, da ampliação da oferta de matérias-primas sustentáveis e da coordenação entre política industrial, energética e ambiental. Caso essas condições se materializem, o Brasil poderá não apenas abastecer parcialmente seu mercado interno, mas também consolidar-se como um dos principais produtores e exportadores de SAF nas próximas décadas.

1.3 Gás Natural Liquefeito (GNL)

O Gás Natural Liquefeito (GNL) é o gás natural resfriado a temperaturas extremamente baixas (aproximadamente –162 °C), processo que reduz significativamente seu volume e permite o armazenamento e o transporte em forma líquida. Essa característica amplia a viabilidade logística do uso do gás natural em aplicações de transporte de média e longa distância, especialmente em contextos nos quais a infraestrutura de gasodutos é limitada ou inexistente. No setor de transportes, o GNL é utilizado principalmente em motores adaptados a gás ou em sistemas híbridos, podendo substituir parcial ou totalmente o diesel fóssil[33].

Uma das principais vantagens do GNL reside em seu desempenho ambiental superior ao do diesel convencional, sobretudo em termos de emissões locais. A combustão do gás natural resulta em menores emissões de material particulado, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, além de uma redução moderada das emissões de dióxido de carbono por unidade de energia consumida. Essas características tornam o GNL uma alternativa atrativa para aplicações em corredores logísticos intensivos e em áreas ambientalmente sensíveis, como zonas urbanas, portos e regiões com restrições ambientais mais rigorosas.

Outro aspecto positivo do GNL é sua maturidade tecnológica. Motores a gás natural para aplicações veiculares, ferroviárias e marítimas já se encontram amplamente disponíveis no mercado internacional, com experiência operacional consolidada em diversos países. Além disso, o GNL apresenta maior densidade energética volumétrica do que o gás natural comprimido (GNC), o que amplia sua autonomia e viabiliza aplicações de longa distância, reduzindo a frequência de abastecimento.

Apesar dessas vantagens, o GNL apresenta limitações importantes do ponto de vista da transição energética de longo prazo. Nos casos em que o GNL é de origem fóssil, ele permanece um

[33] Brasil (2010). O Gás Natural Liquefeito no Brasil – Experiência da ANP na implantação dos projetos de importação de GNL / Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Superintendência de Comercialização e Movimentação de Petróleo, seus Derivados e Gás Natural. – Rio de Janeiro: ANP, 2010.

combustível fóssil e, portanto, não elimina as emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, a cadeia de produção, liquefação, transporte e armazenamento do gás natural pode estar associada a vazamentos de metano, gás com elevado potencial de aquecimento global, o que pode reduzir significativamente os ganhos ambientais líquidos quando não adequadamente controlados. Os custos de implantação da infraestrutura de liquefação, armazenamento criogênico e abastecimento também são elevados, exigindo escala e planejamento de longo prazo para viabilização econômica.

No que se refere às aplicações nos modais de transporte, o GNL apresenta potencial diferenciado conforme o perfil operacional. No transporte rodoviário pesado, o GNL vem sendo utilizado em caminhões de longa distância, oferecendo redução de emissões locais e maior previsibilidade de custos energéticos em relação ao diesel, ainda que exija investimentos específicos em veículos e infraestrutura de abastecimento.

No modo ferroviário, o GNL surge como alternativa para a descarbonização parcial de trechos não eletrificados, especialmente em combinação com outras soluções de transição. Estudos e testes operacionais indicam que a utilização de GNL em locomotivas diesel-elétricas adaptadas ou em sistemas híbridos pode resultar em ganhos de eficiência energética e reduções relevantes de emissões locais[34]. Em alguns contextos, a combinação de GNL com biocombustíveis, como biodiesel, tem demonstrado desempenho ambiental e econômico superior ao do diesel puro, configurando uma solução intermediária para a transição energética do setor ferroviário.

No transporte hidroviário e marítimo, o GNL tem se consolidado como uma das principais alternativas ao óleo combustível pesado, especialmente em regiões sujeitas a normas ambientais mais restritivas. Sua adoção contribui para a redução de emissões atmosféricas em áreas portuárias e hidrovias interiores, embora permaneça sujeito às mesmas limitações associadas ao uso de combustíveis fósseis.

No modo aeroviário, o GNL não é utilizado diretamente como combustível, mas pode desempenhar papel indireto no suprimento energético de aeroportos ou como insumo energético em cadeias produtivas associadas à transição do setor, sem impacto direto sobre a propulsão das aeronaves.

Uma alternativa mais sustentável dentro dessa mesma cadeia energética é o biometano, que pode ser utilizado nos mesmos motores e na mesma infraestrutura destinada ao gás natural, seja na forma comprimida ou liquefeita. Isso permite substituir progressivamente combustíveis fósseis por um gás renovável de menor intensidade de carbono, ampliando os benefícios ambientais associados ao uso do gás no setor de transportes.

Nesse contexto, é importante distinguir as duas principais formas de utilização do gás natural como combustível veicular. O Gás Natural Veicular (GNV) corresponde ao gás natural comprimido e armazenado em alta pressão, sendo mais comum em veículos leves, frotas urbanas e aplicações de curta e média distância, devido à menor densidade energética e autonomia.

Já o Gás Natural Liquefeito (GNL), por ser armazenado na forma líquida em temperaturas criogênicas, apresenta densidade energética significativamente maior, o que o torna mais adequado para aplicações de longa distância e transporte pesado, como caminhões de carga,

[34] CARVALHAES, Bernardo Bicalho (2016). Desenvolvimento de um método para medir e avaliar a eco-eficiência da operação de locomotivas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/handle/10/9459. Acesso: 01/07/2026.

embarcações e locomotivas. O biometano pode ser utilizado em ambas as formas, originando o chamado bio-GNV ou bio-GNL, ampliando o potencial de descarbonização do setor.

No horizonte de longo prazo, especialmente até 2050, espera-se que o gás natural e suas variantes renováveis desempenhem papel relevante como combustíveis de transição na descarbonização do transporte pesado. Embora a eletrificação e o hidrogênio despontem como soluções estruturais para alguns segmentos, a elevada densidade energética, a maturidade tecnológica e a compatibilidade com infraestruturas existentes fazem do GNL uma alternativa importante para substituir o diesel em corredores logísticos e operações de longa distância. Paralelamente, a expansão do biometano tende a ampliar o conteúdo renovável dessa matriz energética, permitindo que parte significativa do consumo de gás no transporte seja gradualmente substituída por fontes de baixo carbono.

Em síntese, o Gás Natural Liquefeito configura-se como uma tecnologia de transição capaz de reduzir emissões e melhorar o desempenho ambiental do transporte pesado no curto e médio prazo. Contudo, sua contribuição para metas climáticas mais ambiciosas dependerá crescentemente da incorporação de gases renováveis, como o biometano, que apresentam maior potencial de redução de emissões e podem desempenhar papel relevante na descarbonização do setor de transportes até meados do século.

1.4 Hidrogênio de baixo carbono

O hidrogênio de baixo carbono emerge como um vetor energético estratégico para a descarbonização de setores nos quais a eletrificação direta apresenta limitações técnicas, operacionais ou econômicas. No setor de transportes, seu potencial é particularmente relevante em aplicações de média e longa distância e em modais de elevada intensidade energética, nos quais o peso, a autonomia e o tempo de reabastecimento constituem restrições significativas à adoção de sistemas puramente elétricos baseados em baterias.

Do ponto de vista ambiental, o principal benefício do hidrogênio de baixo carbono reside na redução substancial das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida, especialmente quando produzido a partir de fontes renováveis (hidrogênio verde) ou de processos com captura e armazenamento de carbono. Quando utilizado em células a combustível ou em motores adaptados, o hidrogênio não gera emissões de CO_2 no ponto de uso, contribuindo também para a redução de poluentes locais, como material particulado e óxidos de nitrogênio, com impactos positivos sobre a qualidade do ar em áreas urbanas e corredores logísticos intensivos.

No PEE 2050, hidrogênio de baixo carbono é tratado como elemento relevante para a diversificação da matriz energética e para a integração entre os setores de energia, indústria e transportes. Seu papel potencial vai além do uso direto como combustível, abrangendo também a produção de derivados energéticos de maior densidade e maior facilidade de armazenamento e transporte, como amônia verde, e-metanol e combustíveis sintéticos para os modais marítimo e aeroviário.

As possibilidades de uso do hidrogênio variam conforme o modo. No transporte rodoviário pesado e em parte do setor ferroviário, o hidrogênio pode surgir como alternativa à eletrificação direta em operações intensivas em energia ou em trechos não eletrificados. Nos modais hidroviário, marítimo e aeroviário, por sua vez, sua relevância tende a ocorrer sobretudo de forma indireta, por meio da produção de derivados e combustíveis sintéticos mais compatíveis com os requisitos operacionais desses segmentos.

Apesar de seu potencial estratégico, a difusão do hidrogênio de baixo carbono ainda enfrenta obstáculos significativos. Entre os principais desafios destacam-se o elevado custo de produção,

a necessidade de infraestrutura dedicada para armazenamento, transporte e abastecimento, a baixa maturidade de parte das aplicações em transportes e a dependência de marcos regulatórios e instrumentos de incentivo capazes de reduzir riscos e viabilizar investimentos de longo prazo.

Dessa forma, no âmbito do PLI-SP 2050, **o hidrogênio de baixo carbono deve ser compreendido como uma alternativa complementar de longo prazo, com potencial relevante sobretudo em nichos de difícil descarbonização e em cadeias produtivas voltadas à produção de combustíveis derivados.** Sua incorporação aos cenários prospectivos deve, portanto, observar trajetórias realistas de maturação tecnológica, expansão da infraestrutura e articulação com outras rotas de transição energética, como eletrificação direta, biocombustíveis avançados e combustíveis sintéticos.

1.4.1 Hidrogênio verde

O hidrogênio verde é um vetor energético produzido a partir da eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidráulica. Nesse processo, a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio sem a emissão direta de gases de efeito estufa, o que confere ao hidrogênio verde um perfil ambiental significativamente mais favorável em comparação ao hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis, como o hidrogênio cinza obtido por reforma do gás natural. Em razão dessas características, o hidrogênio verde é amplamente reconhecido como uma das principais alternativas tecnológicas para a descarbonização profunda de setores intensivos em energia e de difícil eletrificação direta.

Uma das principais vantagens do hidrogênio verde reside em seu potencial de reduzir quase totalmente as emissões de carbono no ponto de uso. Quando utilizado em células a combustível, o hidrogênio gera eletricidade tendo a água como único subproduto, eliminando emissões locais de dióxido de carbono e reduzindo significativamente poluentes atmosféricos como material particulado e óxidos de nitrogênio. Além disso, o hidrogênio apresenta elevada densidade energética em base gravimétrica, o que o torna particularmente atrativo para aplicações que demandam grande autonomia energética com menor peso relativo, como determinados modais de transporte e processos industriais intensivos.

Outro aspecto relevante do hidrogênio verde é sua elevada flexibilidade de uso. O hidrogênio pode ser utilizado diretamente como combustível em células a combustível ou motores adaptados, ou ainda atuar como insumo energético para a produção de outros vetores de baixo carbono, como amônia verde, e-metanol e combustíveis sintéticos (*e-fuels*). Dessa forma, o hidrogênio desempenha papel potencialmente estratégico na integração entre sistemas de energia, indústria e transportes, além de viabilizar o armazenamento e o transporte de energia renovável em larga escala.

No âmbito do planejamento energético estadual, o PEE 2050 destaca o hidrogênio verde como um componente central das estratégias de descarbonização de setores classificados como de "difícil abatimento" (*hard-to-abate*), nos quais a eletrificação direta por baterias apresenta limitações técnicas ou econômicas relevantes. Nesse contexto, o hidrogênio pode desempenhar papel importante em transportes pesados de longa distância, na substituição de combustíveis fósseis em processos industriais e na produção de combustíveis sintéticos para os modais aéreo e marítimo.

O PEE também identifica diferentes rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio de baixo carbono no estado. A principal rota considerada é a eletrólise da água utilizando eletricidade renovável, proveniente de fontes como energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e eólica. O PAC 2050 apresenta como metas para os modais de transportes a utilização de hidrogênio em 10% da frota de caminhões, 5% dos ônibus urbanos e 60% da atividade hidroviária.

No que se refere à demanda futura, o planejamento energético projeto crescimento significativo do consumo de hidrogênio até 2050. Estimativas indicam que a produção de hidrogênio de baixo carbono poderá demandar mais de 20 TWh anuais de eletricidade no estado até meados do século. No setor de transportes, as projeções indicam a introdução gradual de tecnologias baseadas em hidrogênio, incluindo participação estimada em parte da frota de caminhões de longa distância, ônibus rodoviários e embarcações. Essas projeções refletem a expectativa de que o hidrogênio possa contribuir para a descarbonização progressiva do transporte pesado e de longa distância.

Atualmente, entretanto, o uso do hidrogênio permanece concentrado predominantemente em aplicações industriais. Globalmente, o hidrogênio é utilizado principalmente como insumo na indústria de refino de petróleo, na produção de amônia para fertilizantes, na produção de metanol e em diversos processos da indústria química e petroquímica. O uso energético direto do hidrogênio ainda é relativamente limitado e ocorre principalmente em projetos piloto ou demonstrações tecnológicas, incluindo ônibus e veículos a célula combustível, locomotivas experimentais, embarcações em teste e sistemas de geração elétrica ou armazenamento de energia.

No que se refere às aplicações nos modais de transporte, o hidrogênio verde apresenta potencial diferenciado conforme o perfil operacional de cada modo. No transporte rodoviário pesado, especialmente em caminhões de longa distância e ônibus intermunicipais, veículos movidos a células a combustível apresentam vantagens em termos de autonomia e tempo de reabastecimento quando comparados aos veículos elétricos a bateria. Essas características tornam o hidrogênio uma alternativa promissora para rotas de transporte intensivas em energia. Contudo, sua adoção em larga escala depende da redução dos custos tecnológicos e da expansão da infraestrutura de abastecimento.

No modo ferroviário, o hidrogênio verde surge como uma possível alternativa para a descarbonização de trechos não eletrificados, permitindo substituir locomotivas a diesel sem a necessidade de investimentos elevados em eletrificação por catenária. Trens movidos a hidrogênio já operam ou estão em fase de conversão em alguns países: no Chile, a CRRC inaugurou, no Ferrocarril Antofagasta a Bolívia (FCAB), uma locomotiva a hidrogênio destinada ao transporte de carga nas proximidades dos portos de Antofagasta; já a operadora estatal EFE conduz a conversão de uma composição de passageiros da antiga Série 2100 para tração a hidrogênio, ainda em fase de testes. Isso indica que, embora a maior parte das aplicações comerciais globais permaneça concentrada em linhas regionais de passageiros, já existem iniciativas em curso também no transporte de carga, ainda que em estágio inicial e de escala limitada[35].

No transporte hidroviário e marítimo, o hidrogênio tende a desempenhar papel principalmente indireto, sendo utilizado como insumo para a produção de combustíveis sintéticos como amônia verde ou e-metanol, que apresentam maior densidade energética volumétrica e maior adequação operacional para embarcações de grande porte. De forma semelhante, no modo aeroviário, o uso direto do hidrogênio como combustível enfrenta desafios tecnológicos significativos relacionados ao armazenamento criogênico e à adaptação estrutural das aeronaves. Nesse setor, o hidrogênio é considerado mais promissor como insumo para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) e e-querosene.

[35] CRRC (2025). A locomotiva a hidrogênio exportada para o Chile pela CRRC foi revelada. Disponível em: https://www.crrcgc.cc/pt/2025-01/03/article_2025010313550720136.html. Acesso em: 01/07/2026.
Metrô CPTM (2024). Trem "Série 2100" chileno será convertido para usar hidrogênio. Disponível em: https://www.metrocptm.com.br/trem-serie-2100-chileno-sera-convertido-para-usar-hidrogenio/. Acesso em: 01/07/2026.

Nesse contexto, o hidrogênio verde também apresenta potencial relevante para o posicionamento estratégico do Brasil no mercado internacional de energia de baixo carbono. A combinação de abundância de recursos renováveis, disponibilidade de áreas para expansão da geração solar e eólica e infraestrutura portuária estratégica posiciona o país como potencial produtor e exportador de hidrogênio verde e de seus derivados, como amônia verde e combustíveis sintéticos. Esse potencial ganha relevância diante do fortalecimento de políticas internacionais de neutralidade de carbono, especialmente nos setores de transporte marítimo e aviação, que demandarão combustíveis de baixo carbono nas próximas décadas.

Diversos projetos de desenvolvimento de hubs de hidrogênio e derivados energéticos já vêm sendo anunciados em portos brasileiros, incluindo iniciativas voltadas à produção e exportação de hidrogênio verde e amônia verde. Esses projetos refletem a expectativa de crescimento da demanda internacional por combustíveis sintéticos de baixo carbono, impulsionada por metas climáticas cada vez mais rigorosas em diferentes regiões do mundo.

Em síntese, o hidrogênio verde configura-se como um vetor energético estratégico para a transição energética de longo prazo, com elevado potencial para viabilizar a descarbonização profunda de setores intensivos em energia e de difícil eletrificação direta. No entanto, sua aplicação em larga escala ainda enfrenta desafios tecnológicos, econômicos e de infraestrutura relevantes. Dessa forma, embora o hidrogênio verde apresente potencial significativo para transformar determinados segmentos do sistema energético nas próximas décadas, sua contribuição quantitativa para os cenários energéticos e de emissões considerados no horizonte do PLI-SP 2050 tende a permanecer limitada, concentrando-se em aplicações específicas e em estágios ainda predominantemente experimentais ou iniciais de desenvolvimento.

1.4.2 Amônia verde

A amônia verde é um vetor energético produzido a partir de hidrogênio verde, obtido por eletrólise da água com eletricidade proveniente de fontes renováveis, combinado ao nitrogênio extraído do ar por meio do processo de síntese de amônia. Diferentemente da amônia convencional, cuja produção é intensiva em emissões de gases de efeito estufa, a amônia verde apresenta um perfil de emissões significativamente mais baixo ao longo do ciclo de vida, configurando-se como uma alternativa de baixo carbono para aplicações energéticas em setores de elevada intensidade energética[36].

Uma das principais vantagens da amônia verde reside em sua elevada densidade energética volumétrica quando comparada ao hidrogênio gasoso, além de sua maior facilidade de armazenamento e transporte. A amônia pode ser armazenada na forma líquida sob condições de temperatura e pressão significativamente menos exigentes do que aquelas necessárias para o hidrogênio liquefeito, utilizando tecnologias já consolidadas na indústria química e de fertilizantes. Adicionalmente, a cadeia logística global de produção, transporte e armazenamento de amônia já se encontra relativamente estabelecida, o que pode facilitar sua integração futura em sistemas energéticos de baixa emissão de carbono.

Outra característica relevante da amônia verde é sua capacidade de atuar como vetor de armazenamento e transporte de energia renovável em larga escala. Ao converter eletricidade renovável em moléculas químicas transportáveis, a amônia pode viabilizar o armazenamento de energia por períodos prolongados e o transporte de energia entre regiões produtoras e

[36] Caneppele (2025). Hidrogênio Verde na Indústria Brasileira: Desvendando o Business Case Real e Estratégias de Implementação Setoriais para Além do Hype. *CanalEnergia*.

consumidoras. Nesse contexto, a amônia é frequentemente considerada um derivado do hidrogênio renovável, podendo desempenhar papel importante na integração entre os setores de energia, indústria e transportes em sistemas energéticos de longo prazo, especialmente em cenários com elevada participação de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica.

O PEE 2050 aprofunda essa perspectiva ao tratar a amônia como um dos principais derivados energéticos do hidrogênio renovável. O documento projeta que, nas décadas finais do horizonte de planejamento, compostos derivados do hidrogênio, incluindo amônia, e-metanol e e-querosene, poderão desempenhar papel relevante na descarbonização de setores intensivos em energia. No caso específico da amônia, o plano destaca seu potencial como combustível sintético para navegação e, de forma indireta, para o setor aéreo por meio da produção de combustíveis sintéticos sustentáveis.

O PEE 2050 também enfatiza o papel da amônia na descarbonização da indústria química, setor no qual aproximadamente 19% do consumo atual de hidrogênio no estado de São Paulo está associado à produção de amônia. Nesse contexto, o plano prevê a progressiva substituição do hidrogênio fóssil por hidrogênio renovável até 2050.

Adicionalmente, o PEE identifica a cadeia da amônia verde como uma área prioritária para atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação, incluindo a melhoria de processos industriais, tecnologias de síntese, armazenamento e transporte de compostos derivados do hidrogênio. O plano também projeta aumento da demanda de eletricidade associada à produção desses vetores energéticos, incluindo amônia verde, tanto para consumo interno quanto para potencial exportação de combustíveis sintéticos de baixo carbono.

Apesar dessas perspectivas favoráveis no longo prazo, a amônia verde enfrenta desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios relevantes que limitam sua aplicação no curto e médio prazo. Do ponto de vista tecnológico, o uso da amônia como combustível ainda enfrenta obstáculos relacionados à eficiência de combustão, à formação de óxidos de nitrogênio (NOx) e à necessidade de desenvolvimento ou adaptação de motores, turbinas e sistemas de conversão energética específicos. Além disso, a amônia é uma substância tóxica e corrosiva, exigindo padrões rigorosos de segurança em sua produção, armazenamento, transporte e utilização, o que implica custos adicionais e desafios regulatórios importantes.

Outro desafio relevante refere-se ao custo de produção da amônia verde, que permanece elevado em função do custo do hidrogênio verde e da necessidade de grandes volumes de eletricidade renovável para sua produção. A viabilidade econômica dessa tecnologia depende fortemente da redução dos custos da eletrólise, da expansão da oferta de energia renovável e da criação de mecanismos de mercado ou políticas públicas que valorizem os benefícios ambientais associados à redução de emissões.

No estágio atual de desenvolvimento tecnológico, o uso da amônia verde permanece predominantemente restrito a projetos-piloto, demonstrações tecnológicas e iniciativas de pesquisa e desenvolvimento em diferentes países. No Brasil, complexos portuários como o de Pecém (CE), Açu (RJ) e Camaçari (BA) estão se posicionando para se tornarem grandes hubs, atraindo investimentos para plantas de eletrólise, terminais de amônia verde e indústrias correlatas. Diversos projetos internacionais estão sendo conduzidos para testar o uso da amônia como combustível em motores marítimos, turbinas industriais e sistemas de geração elétrica, mas sua adoção em escala comercial ainda depende de avanços tecnológicos e da consolidação de marcos regulatórios e de segurança.

No que se refere às aplicações nos modais de transporte, a amônia verde apresenta potencial diferenciado conforme o perfil de cada modo. No transporte marítimo e hidroviário, a amônia é frequentemente apontada como uma das alternativas mais promissoras para a descarbonização de embarcações de grande porte e rotas de longa distância, segmentos nos quais a eletrificação direta é tecnicamente limitada. Nesse contexto, fabricantes de motores marítimos e operadores

logísticos vêm conduzindo testes com sistemas de propulsão movidos a amônia, embora a adoção em larga escala ainda dependa de avanços tecnológicos e da adaptação da infraestrutura portuária.

No modo ferroviário, o uso direto da amônia permanece altamente incipiente. Em tese, sua aplicação poderia ocorrer de forma indireta, como insumo para geração elétrica embarcada ou como vetor energético em sistemas híbridos baseados em hidrogênio, mas tais soluções ainda se encontram em estágio conceitual ou experimental. Dessa forma, a relevância da amônia verde para o setor ferroviário tende a se concentrar em horizontes tecnológicos de longo prazo.

No transporte rodoviário, o uso direto da amônia enfrenta restrições ainda mais significativas, relacionadas à segurança operacional, à toxicidade do combustível e à necessidade de tecnologias específicas de propulsão. No modo aeroviário, a amônia verde também não se apresenta como combustível direto viável para aeronaves comerciais. No entanto, pode desempenhar papel indireto relevante como insumo energético para a produção de combustíveis sintéticos sustentáveis de aviação (SAF), ampliando seu potencial de contribuição para a descarbonização do setor no longo prazo.

Em síntese, a amônia verde configura-se como um vetor energético com elevado potencial estratégico em sistemas energéticos de longo prazo, especialmente em aplicações de alta intensidade energética e difícil eletrificação, como o transporte marítimo e determinados processos industriais. Contudo, seu estágio atual de desenvolvimento tecnológico ainda é predominantemente experimental, e sua viabilidade econômica depende de avanços significativos em tecnologia, infraestrutura e regulação. Assim, embora apresente potencial relevante para a descarbonização profunda de determinados setores no futuro, **sua contribuição quantitativa para os cenários energéticos e de emissões considerados no horizonte do PLI-SP 2050 tende a ser limitada** quando comparada a alternativas tecnológicas já mais maduras e escaláveis.

1.4.3 Combustíveis sintéticos (E-*fuels*)

Os combustíveis sintéticos, também conhecidos como e-*fuels*, são combustíveis líquidos ou gasosos produzidos a partir da combinação de hidrogênio de baixo carbono, preferencialmente hidrogênio verde obtido por eletrólise com eletricidade renovável, e dióxido de carbono capturado, seja de fontes industriais ou diretamente da atmosfera. Por meio de processos químicos, como a síntese de Fischer-Tropsch ou rotas similares, esses insumos são convertidos em hidrocarbonetos sintéticos com propriedades equivalentes às dos combustíveis fósseis convencionais, como diesel, gasolina, querosene de aviação ou combustíveis marítimos.

Uma das principais vantagens dos e-*fuels* reside em sua compatibilidade com motores, frotas e infraestruturas existentes, configurando-se como combustíveis do tipo *drop-in*. Essa característica reduz barreiras de adoção em setores nos quais a renovação dos ativos é lenta, custosa e dependente de elevados investimentos de capital, como aviação, navegação e parte do transporte pesado. Do ponto de vista ambiental, quando produzidos com eletricidade renovável e carbono capturado de origem sustentável, os e-*fuels* podem apresentar emissões líquidas muito inferiores às dos combustíveis fósseis ao longo do ciclo de vida, embora seu desempenho final dependa criticamente da origem da eletricidade e da robustez dos sistemas de certificação[37].

[37] IEA (2023). The Role of E-fuels in Decarbonising Transport.

Apesar desse potencial, o uso atual dos e-*fuels* ainda é muito limitado. A IEA destaca que o consumo energético de hidrogênio renovável e e-*fuels* no transporte permanece próximo de zero na escala global, com expansão mais perceptível apenas em projetos-piloto, plantas demonstrativas e iniciativas apoiadas por políticas específicas na Europa, nos Estados Unidos e na China. Até 2030, a expectativa é de crescimento ainda concentrado em volumes relativamente pequenos, especialmente em nichos ligados à aviação e ao transporte marítimo.

No horizonte até 2050, entretanto, o papel dos combustíveis sintéticos tende a crescer de forma mais relevante justamente nos modais de mais difícil eletrificação. A IEA projeta, em cenários alinhados à neutralidade climática, que bioenergia, hidrogênio e combustíveis à base de hidrogênio passem de menos de 1% do consumo atual de energia em aviação e navegação para cerca de 80% em 2050, refletindo o papel crescente desses vetores na descarbonização dos transportes de longa distância. Nesse contexto, os e-*fuels* aparecem como solução especialmente promissora para a aviação e, em menor medida, para o transporte marítimo, onde a compatibilidade com motores e logística já existente constitui vantagem importante.

No âmbito do PLI-SP 2050, isso sugere que os e-*fuels* devem ser tratados como uma tecnologia de relevância estratégica, porém de difusão gradual e seletiva. No modo aeroviário, sua importância potencial é elevada, especialmente como complemento ao SAF de base biogênica, pois podem ampliar a oferta de combustíveis sustentáveis em um setor no qual as alternativas de propulsão direta permanecem mais limitadas. No transporte marítimo e hidroviário, podem contribuir em nichos específicos, sobretudo em rotas de longa distância e sob maior pressão regulatória internacional. Já no transporte rodoviário e ferroviário, sua tendência é de uso mais restrito, dado que outras rotas — como eletrificação, biometano, hidrogênio e híbridos — tendem a apresentar melhor relação custo-efetividade. Assim, até 2050, a contribuição dos e-*fuels* para os cenários do PLI-SP 2050 provavelmente será mais qualitativa e estratégica do que quantitativamente dominante, concentrando-se em setores *hard*-to-abate e em aplicações onde o caráter *drop*-in seja decisivo.

1.5 Sistemas híbridos de motorização

Além das rotas energéticas já mais consolidadas no debate sobre descarbonização, como eletrificação, biocombustíveis, hidrogênio de baixo carbono e seus derivados, os sistemas híbridos de motorização se destacam como tecnologia de transição relevante para o horizonte do PLI-SP 2050. Diferentemente dessas rotas, os sistemas híbridos não substituem a base energética dos transportes, mas atuam de forma complementar, ampliando o conjunto de opções tecnológicas disponíveis para os setores de difícil abatimento, reduzindo ineficiências operacionais e aumentando a flexibilidade dos cenários prospectivos.

No contexto do PLI-SP 2050, a relevância dessa tecnologia decorre menos de representar uma ruptura e mais de sua capacidade de gerar ganhos incrementais de eficiência, consumo energético e emissões já no curto e médio prazo. Sua difusão encontra-se em curso e tende a produzir efeitos mais concretos no horizonte do plano do que outras rotas ainda em estágios iniciais, sobretudo por sua complementaridade com as demais tecnologias de transição energética.

Os sistemas híbridos de motorização consistem na combinação de motores elétricos com motores térmicos convencionais, alimentados por combustíveis fósseis ou renováveis, com o objetivo de elevar a eficiência energética, reduzir o consumo específico de combustível e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Diferentemente da eletrificação plena, os sistemas híbridos não eliminam o uso de combustíveis líquidos ou gasosos, mas permitem seu aproveitamento de forma mais eficiente, explorando complementaridades entre tração elétrica, frenagem regenerativa e operação otimizada do motor a combustão.

Do ponto de vista tecnológico, os sistemas híbridos abrangem diferentes arquiteturas, desde configurações leves (*mild hybrid*) até híbridos completos e híbridos *plug-in*. Em todos os casos, a lógica central consiste em deslocar parte da demanda de potência para o sistema elétrico em situações de menor eficiência do motor térmico, como partidas, acelerações e ciclos urbanos com paradas frequentes, ao mesmo tempo em que se recupera energia cinética durante a frenagem. Essa característica os torna particularmente relevantes como tecnologia de transição.

O uso atual de soluções híbridas já é significativo em parte do transporte rodoviário, sobretudo em veículos leves e em algumas frotas urbanas de ônibus, embora a dinâmica recente mostre avanço mais acelerado dos veículos totalmente elétricos em diversos mercados. A IEA observa que a eletrificação do transporte rodoviário pesado ainda avança de forma desigual, com ônibus e caminhões elétricos crescendo, mas partindo de uma base relativamente pequena; nesse contexto, sistemas híbridos seguem relevantes em aplicações intermediárias, especialmente onde a eletrificação plena ainda enfrenta limitações de custo, infraestrutura ou autonomia[38].

No transporte rodoviário, os sistemas híbridos já se encontram amplamente difundidos em veículos leves e vêm ganhando espaço crescente em frotas de ônibus urbanos e, de forma mais incipiente, em veículos comerciais e de carga. Em ambientes urbanos, caracterizados por tráfego intenso, paradas frequentes e velocidades médias reduzidas, os ganhos de eficiência proporcionados pela hibridização tendem a ser mais expressivos, tornando essa tecnologia particularmente adequada para o transporte coletivo e para a distribuição urbana de mercadorias. Em veículos de carga de maior porte, os sistemas híbridos podem contribuir para reduções marginais, porém relevantes, de consumo e emissões, sobretudo quando combinados com estratégias operacionais e logísticas mais eficientes.

No modo ferroviário, os sistemas híbridos encontram aplicação principalmente em locomotivas diesel-elétricas híbridas, que combinam motores a combustão com sistemas de armazenamento elétrico, como baterias ou supercapacitores. Essa configuração permite ganhos de eficiência em trechos com paradas frequentes, manobras em pátios e operações de baixa velocidade, além de reduzir emissões locais e ruídos. Para trechos não eletrificados, os sistemas híbridos podem representar uma alternativa intermediária entre a tração puramente diesel e a eletrificação integral da via permanente.

No transporte marítimo e hidroviário, a adoção de sistemas híbridos tem se expandido em embarcações de apoio, balsas, rebocadores e navios de menor porte, especialmente em operações costeiras, fluviais e portuárias. Nesses casos, a combinação entre motores térmicos e propulsão elétrica permite operar em modo elétrico em áreas ambientalmente sensíveis, como zonas portuárias e trechos urbanos, reduzindo emissões atmosféricas e ruídos, ao mesmo tempo em que preserva a autonomia e a flexibilidade operacional para navegação em longas distâncias.

Em síntese, os sistemas híbridos devem ser entendidos no âmbito do PLI-SP 2050 como tecnologia de transição e de eficiência incremental, com maior relevância até 2050 em segmentos urbanos, regionais e operacionais nos quais a eletrificação plena ainda não seja economicamente viável. Sua contribuição prospectiva tende a ser mais importante no curto e médio prazo do que no período posterior, à medida que a eletrificação direta e outras rotas de baixo carbono avancem. Ainda assim, por sua elevada flexibilidade operacional e menor exigência de infraestrutura, os híbridos podem exercer papel importante na redução gradual de emissões e no gerenciamento dos riscos da transição tecnológica.

[38] IEA (2023). Electrification of road transport goes beyond cars and the ambition is growing. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/transport/trucks-and-buses. Acesso em: 11/03/2026.

1.6 Uso de inteligência artificial em sistemas logísticos

O uso de Inteligência Artificial (IA) aplicada à otimização logística configura-se como um dos vetores mais relevantes de transformação transversal do setor de transportes, com impactos diretos sobre eficiência operacional, custos, confiabilidade, segurança e sustentabilidade ambiental, tanto no transporte de cargas quanto no de passageiros. Diferentemente de inovações centradas exclusivamente em novos modos ou matrizes energéticas, a IA atua de forma sistêmica, potencializando o desempenho dos ativos e das infraestruturas existentes por meio do processamento avançado de dados, da automação de decisões e da aprendizagem contínua dos sistemas operacionais.

No transporte de passageiros, destaca-se ainda sua aplicação em plataformas de *Mobility as a Service* (MaaS), que integram diferentes modos de transporte em ambientes digitais unificados, permitindo o planejamento de viagens multimodais, a gestão dinâmica da oferta e da demanda, a integração tarifária e a prestação de informações em tempo real aos usuários, contribuindo para maior eficiência e atratividade do sistema de mobilidade.

No contexto dos sistemas de transporte, a IA compreende um conjunto de técnicas, como aprendizado de máquina, algoritmos de otimização, análise preditiva e sistemas de apoio à decisão, capazes de integrar grandes volumes de dados históricos e em tempo real. Esses dados podem incluir informações sobre demanda, tráfego, condições climáticas, estado da infraestrutura, desempenho de veículos, consumo energético e restrições operacionais. A partir dessa integração, a IA permite identificar padrões, antecipar eventos e propor decisões operacionais mais eficientes do que aquelas baseadas exclusivamente em regras fixas ou planejamento estático.

Uma das principais vantagens do uso de IA na logística de transportes reside na otimização dinâmica de rotas, horários e alocação de recursos. No transporte de cargas, sistemas baseados em IA permitem reduzir distâncias percorridas, tempos de viagem, consumo de combustível e emissões associadas, ao mesmo tempo em que aumentam a taxa de utilização da frota e a confiabilidade das entregas. No transporte de passageiros, a IA pode ser empregada para ajustar frequências, redistribuir capacidade e melhorar a regularidade dos serviços, respondendo de forma mais eficiente a variações de demanda e a eventos inesperados.

Outro benefício relevante da IA é sua aplicação em manutenção preditiva e gestão de ativos. A análise contínua de dados operacionais e sensores embarcados permite antecipar falhas, programar intervenções de manutenção de forma mais eficiente e reduzir indisponibilidades não planejadas. Essa abordagem contribui para a redução de custos ao longo do ciclo de vida dos ativos, aumento da segurança operacional e melhor aproveitamento da infraestrutura existente, sendo particularmente relevante em modais intensivos em capital, como ferroviário, metroviário e transporte coletivo urbano.

Apesar de seus benefícios, o uso de IA no setor de transportes também apresenta desafios e limitações. A eficácia dessas soluções depende da disponibilidade, qualidade e interoperabilidade dos dados, bem como da integração entre diferentes sistemas e operadores. Adicionalmente, a implementação de soluções baseadas em IA exige investimentos em infraestrutura digital, capacitação técnica e adaptação organizacional. Questões relacionadas à governança de dados, transparência algorítmica, cibersegurança e proteção de informações sensíveis também assumem papel central, demandando marcos regulatórios e institucionais adequados.

O uso atual dessas tecnologias já é concreto, embora ainda desigual entre países, empresas e modais. A OECD/ITF observa que autoridades de transporte e operadores vêm ampliando o uso de IA em funções como análise preditiva, planejamento e gestão operacional, enquanto a Organização Marítima Internacional (IMO) vem explicitamente associando a digitalização do setor à integração entre navios e portos, otimização logística e redução de emissões. Ao mesmo

tempo, a difusão permanece incompleta: em parte relevante dos mercados, a adoção ainda é limitada por barreiras de dados, interoperabilidade, governança e capacidade técnica[39].

Estudos recentes do Fórum Econômico Mundial sugerem que a aplicação de IA em logística pode reduzir emissões em até cerca de 15% por meio de melhor roteirização, maior ocupação de ativos, manutenção preditiva e melhor coordenação por modo, especialmente no transporte de cargas. Ainda que esse potencial dependa fortemente das condições locais e do grau de maturidade digital, a principal implicação para o PLI-SP 2050 é clara: a IA não substitui as tecnologias energéticas de baixo carbono, mas pode aumentar significativamente a eficiência com que elas são utilizadas[40].

No transporte rodoviário, a IA tende a se difundir por meio de sistemas de gestão de frotas, roteirização dinâmica, previsão de demanda, logística urbana e monitoramento de condutores e veículos. No modo ferroviário, seu uso é particularmente promissor em manutenção preditiva, gestão de capacidade, planejamento de circulação e coordenação entre operadores. No transporte hidroviário, marítimo e portuário, a combinação entre IA, digitalização e integração de dados podem melhorar a sincronização entre terminais, embarcações e hinterlândia logística, reduzindo tempos de espera, consumo energético e congestionamentos operacionais.

Até 2050, a tendência é de que a IA deixe de ser uma tecnologia complementar de adoção seletiva e passe a constituir parte estrutural da gestão dos sistemas de transporte. Seu avanço deverá acompanhar a expansão da conectividade, da sensorização dos ativos, dos sistemas de rastreamento e da digitalização das cadeias logísticas. No âmbito do PLI-SP 2050, isso significa que a IA provavelmente terá papel difuso, porém altamente relevante, ao contribuir para ganhos sistêmicos de eficiência, redução indireta de emissões e melhor uso da infraestrutura. Sua propagação tende a ser mais rápida e mais transversal do que a de combustíveis emergentes, justamente porque depende menos da substituição física dos ativos energéticos e mais da incorporação progressiva de capacidades digitais e analíticas.

No entanto, no horizonte de longo prazo, a inteligência artificial apresenta um potencial de transformação que pode ir muito além dos ganhos incrementais de eficiência atualmente observados. Em cenários mais avançados, a combinação entre IA, automação, conectividade e novas arquiteturas digitais pode reconfigurar profundamente a forma como os sistemas de transporte são organizados, operados e até mesmo demandados, configurando uma possível disrupção estrutural do setor. Essa transformação pode envolver desde a consolidação de sistemas altamente autônomos até a redefinição de cadeias logísticas e padrões de mobilidade, com impactos sobre custos, competição e organização industrial.

Todavia, a materialização desses efeitos depende fortemente do desenvolvimento e da difusão de tecnologias contíguas — como veículos autônomos, Internet das Coisas (IoT), redes 5G/6G, *edge computing, digital twins* e sistemas avançados de energia — bem como de avanços institucionais e regulatórios que permitam sua integração. Nesse contexto, a IA atua como tecnologia habilitadora, mas não isoladamente determinante.

Dada essa interdependência tecnológica e institucional, há elevada incerteza quanto à magnitude, direção e velocidade desses impactos. No estágio atual, não é possível quantificar de forma robusta os efeitos agregados da IA sobre o setor de transportes no longo prazo, sendo mais apropriado tratá-la, no âmbito do PLI-SP 2050, como um vetor potencialmente disruptivo,

[39] International Transport Forum (2022). AI for Transport Authorities: Principles and Practical Guidance.
[40] World Economic Forum (2025). Intelligent Transport, Greener Future: AI as a Catalyst to Decarbonize Global Logistics.

porém de trajetória aberta e dependente de condições futuras ainda não plenamente observáveis.

Em síntese, a inteligência artificial deve ser tratada nos cenários do PLI-SP 2050 como uma tecnologia habilitadora da transição dos transportes. Embora não altere diretamente a matriz energética, ela pode ampliar a produtividade do sistema, reduzir desperdícios e potencializar os efeitos de outras estratégias de descarbonização, tornando-se um componente central da modernização logística até 2050.

1.7 Requisitos de infraestrutura para combustíveis de baixo carbono

Esta seção analisa os requisitos de infraestrutura e os instrumentos de política associados à expansão de combustíveis de baixo impacto em emissões no setor de transportes, com foco em biodiesel, biometano, GNL/Bio-GNL e SAF. Diferentemente da estratégia de descarbonização via eletrificação, o biodiesel é um caso típico de descarbonização por *blending*.

A infraestrutura física necessária é menor do que para gases ou eletrificação, porque misturas moderadas são compatíveis com a cadeia logística existente do diesel. Nos EUA, por exemplo, orientações técnicas tratam a instalação de equipamentos compatíveis com B6–B20 como equivalente à instalação de equipamentos convencionais de diesel, com exigências de compatibilidade e autorização semelhantes às já existentes. A dinâmica do mercado centra-se em elementos de política e mercado e não na ampliação das bases de infraestrutura.

Em países voltados ao aumento da participação de biocombustíveis, o principal instrumento público é o mandato combinado com mecanismos de financiamento e estabilização do diferencial de custo. A Indonésia é um benchmark de mandato elevado. A base de políticas da IEA registra decreto que estabelece mistura B40 a partir de 2025, e análises da IEA descrevem o uso de instrumentos fiscais ("*palm oil export levies*") para subsidiar o diferencial do biodiesel, evitando repasse integral ao consumidor.

A literatura internacional destaca que, historicamente, o custo de *blending* para o consumidor pode ser relativamente pequeno em média (ordem de centavos de dólar por litro equivalente), mas é sensível a preços de matéria-prima e petróleo. Isso explica por que políticas flexíveis e mecanismos anticíclicos são determinantes para manter estabilidade do programa ao longo do tempo.

No Brasil, a mistura obrigatória de biodiesel é definida em âmbito federal e operacionalizada por regras de qualidade e comercialização sob regulação da ANP. A página técnica da ANP sintetiza a evolução do teor e indica a convivência entre mistura mandatória e usos autorizativos (especificação de diesel em caráter autorizativo e exigência de "prévia anuência" da ANP para misturas acima do percentual obrigatório).

Para São Paulo, o papel do Estado tende a ser mais indutor da disponibilidade e qualidade em corredores do que regulador direto da mistura, atuando por meio de instrumentos já disponíveis, como (i) exigências em concessões rodoviárias (áreas de serviço), (ii) fiscalização ambiental e inventários de emissões (CETESB), e (iii) compras públicas e contratos de transporte público que especifiquem parâmetros ambientais. Esses instrumentos incidem sobre a mistura mandatória vigente, regulada em âmbito federal pela ANP, e não sobre uma política estadual própria de teores.

Iniciativas adicionais de demanda e governança, como previsão de oferta de blends autorizativos em áreas de serviço das concessões, especificação ambiental em contratos de frotas cativas, apoio pontual à infraestrutura de segregação (B30/B100) onde houver necessidade comprovada, e articulação com a esfera federal para reduzir incerteza sobre teores, são exemplos de mecanismos observados em outras experiências.

Diferentemente do biodiesel, que já é uma realidade na composição de combustíveis nacional, o biometano envolve definições mais complexas. A Europa é um *benchmark* relevante para biometano em transporte porque já possui infraestrutura extensa. O *Bio-CNG*, ("*Biomethane Compressed Natural Gas*"), é o biometano comprimido a alta pressão (tipicamente 200–250 bar), equivalente ao GNV, porém de origem renovável. Ele é transportado em estado gasoso comprimido, em alta pressão e temperatura ambiente, já que sua densidade energética é baixa.

Portanto seu uso é mais adequado para curtas e médias distâncias e distribuição urbana ou regional. O Bio CNG Pressão pode ser transportado em cilindros (tube trailers) ou distribuído por rede de gás. Suas aplicações típicas incluem ônibus urbanos, caminhões de coleta de resíduos, frotas cativas e similares.

Já o *Bio-LNG* ("*Biomethane Liquefied Natural Gas*") é o biometano liquefeito por resfriamento criogênico em temperatura de −162 °C. Sua pressão é baixa, mas possui alta densidade energética: em comparação ao GNC (gás comprimido), o GNL ocupa cerca de 3 vezes menos volume para a mesma quantidade de energia, o que permite o transporte eficiente em longas distâncias e o uso em aplicações intensivas em energia[41].

A EBA reporta, como ordem de grandeza, milhares de estações de CNG e centenas de LNG em operação, incluindo Suécia, Itália, França e Países Baixos. Do ponto de vista de custo de implantação do abastecimento veicular, a referência do AFDC (EUA) destaca que estações CNG variam conforme aplicação e podem chegar a cerca de US$ 1,8 milhão para CNG. Estações LNG são altamente variáveis e podem custar vários milhões de dólares. Essa variabilidade explica por que políticas bem-sucedidas costumam combinar (i) demanda cativa (frotas) e (ii) contratos para reduzir risco de subutilização no início.

No Brasil, o biometano é regulado pela ANP como biocombustível gasoso, intercambiável com gás natural. A ANP explicita que o biometano pode ser transportado como gás comprimido ("gasoduto virtual") ou como biometano liquefeito (Bio-GNL) e lista resoluções de especificação e controle da qualidade para diferentes origens de biometano (aterros/ETE e resíduos agrossilvopastoris/comerciais).

Além do controle de qualidade do combustível, o país passou a estruturar instrumentos de atributo ambiental e rastreabilidade (CGOB) no âmbito da Lei 14.993/2024 e do Decreto 12.614/2025, com regulamentação em curso/atualizações recentes pela ANP, sinalizando a criação de um mercado de certificados e metas para produtores/importadores de gás natural.

Para São Paulo, existem duas camadas críticas. A primeira é a competência estadual sobre serviços locais de gás canalizado, que a Constituição reserva aos estados (exploração direta ou concessão), o que afeta a integração do biometano à rede e o relacionamento com distribuidoras locais (quando houver injeção e comercialização por rede). A segunda é a possibilidade de o Estado induzir postos e corredores nas rodovias concedidas, por meio de obrigações contratuais e cessão/uso de áreas de serviço.

Entre os instrumentos que uma política estadual para biometano em rodovias poderia combinar estão: (i) criação de corredores em concessões com obrigação de disponibilidade por contrato; (ii) instrumentos de *viability gap funding* para cobrir CAPEX em rodovias médias (menor tráfego); (iii) integração com mercado de atributos (CGOB) para gerar receita adicional por descarbonização; e (iv) incentivos à demanda via compras públicas e contratos de transporte (especialmente logística regional e ônibus).

[41] Gasrec. CNG & LNG – What's the difference and which should you choose?. Disponível em: https://www.gasrec.co.uk/blog/cng-lng. Acesso em: 01/09/2026.

Já o GNL e o Bio-GNL foram desenvolvidos como alternativa para transporte pesado em corredores, especialmente na Europa. Um exemplo estruturante foi o projeto europeu "LNG Blue Corridors" (2013–2018), que definiu quatro corredores europeus e implantou cerca de 14 estações LNG ou L-CNG em pontos estratégicos, apoiando uma frota de cerca de 100 a 150 caminhões pesados em 11 países.

O projeto foi cofinanciado pela Comissão Europeia por meio do 7º Programa-Quadro de pesquisa (FP7), com uma doação de aproximadamente €8 milhões sobre um investimento total de €14,33 milhões (cerca de 56% de financiamento público), reunindo 27 parceiros, fabricantes de veículos, operadoras de terminais e distribuidoras de gás, todos membros da NGVA Europe. Esse tipo de programa ilustra o papel do setor público como "organizador de corredor" e cofinanciador de risco inicial via fundo de pesquisa e inovação, viabilizando a formação de uma rede mínima que o setor privado, isoladamente, teria dificuldade de coordenar[42].

Além disso, a EBA reporta que já existe uma rede europeia relevante de estações LNG, parte com oferta de Bio□LNG, o que reforça a tese de que o gargalo é o CAPEX e a coordenação de demanda, e não a inexistência de modelo técnico. Em termos de custos, o AFDC indica que o custo de estações LNG é altamente variável, "de um a vários milhões de dólares", refletindo tanques criogênicos, segurança, obras e logística de suprimento[43].

No Brasil, a regulamentação da qualidade do gás natural abrange tanto o GNV (comprimido) quanto o "gás natural liquefeito veicular (GNLV)", e permite mistura de biometano e gás natural desde que a mistura atenda à especificação aplicável. Isso fornece a base normativa para GNL e para Bio-GNL quando tecnicamente enquadrado como biometano/gás natural liquefeito veicular.

A implantação de pontos de abastecimento, por sua vez, cruza autorização de revenda e instalação conforme regras de combustíveis com licenciamento e segurança (municípios, bombeiros, meio ambiente), além do uso do solo e contratos em rodovias concedidas. A ANP explicita que revendedores automotivos revendem diesel, gasolina, etanol e GNV mediante autorização. Em São Paulo, a política de corredor tende a envolver exigências contratuais em concessões estaduais (Artesp), enquanto em trechos federais a coordenação se dá com a ANTT e as concessionárias federais.

Em aviação, a infraestrutura e o mercado de SAF são fortemente induzidos por mandatos e regras de rastreabilidade. Na União Europeia, o *ReFuelEU Aviation* estabelece obrigações graduais de mistura de SAF no combustível fornecido em aeroportos (por exemplo, 2% em 2025 e 70% em 2050, com submandatos de combustíveis sintéticos). Isso cria sinal de demanda e reduz risco para investidores, ainda que permaneça o desafio de custo e oferta.

O custo do SAF tende a ser significativamente maior que o do querosene fóssil ("*green premium*"), o que gera tensões sobre metas e cronogramas quando a oferta não cresce no ritmo planejado, tensão que aparece em debates públicos recentes na Europa e em relatórios sobre viabilidade das metas[44]. A principal lição de política, nesse contexto, é que mandatos de mistura precisam vir acompanhados de mecanismos de apoio ao diferencial de custo e de garantias de

[42] LNG Industry (2014). Funding for LNG projects in Europe. Disponível em: https://www.lngindustry.com/small-scale-lng/03102014/funding-for-lng-projects-in-europe-1535/. Acesso em: 01/09/2026.
[43] National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2014). CNG Infrastructure Costs. Disponível em: https://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/cng_infrastructure_costs.pdf. Acesso em: 01/07/2026.
[44] IATA (2025). Mandates see SAF production fall short of expectations. Disponível em: https://airlines.iata.org/2025/12/10/mandates-see-saf-production-fall-short-industry-expectations. Acesso em: 01/07/2026.

rastreabilidade da oferta, sob risco de as metas se tornarem inviáveis à medida que a produção não acompanha o cronograma regulatório.

Do ponto de vista de cadeia logística, análises acadêmicas indicam que, em alguns desenhos, os custos de logística/armazenagem/mistura podem ser percentualmente pequenos frente ao custo total de suprimento de combustível, mas podem crescer quando há necessidade de segregação extrema e transporte rodoviário adicional até aeroportos[45] [46].

Uma implicação relevante para o dimensionamento de nova infraestrutura é o limite técnico de mistura do SAF ao querosene de aviação fóssil: sob a norma ASTM D7566, a maioria das rotas aprovadas (como HEFA e *Fischer-Tropsch*) está limitada a até 50% de mistura, enquanto a rota a partir de açúcares é limitada a 10% e o coprocessamento em refinarias a apenas 5%, restrição decorrente da baixa concentração de compostos aromáticos no SAF, necessários para a compatibilidade com as vedações elastoméricas das aeronaves[47].

Isso significa que, mesmo em cenários de forte expansão da oferta, o SAF continuará sendo misturado ao querosene fóssil em terminais e aeroportos, direcionando o investimento em infraestrutura para capacidade de mistura, armazenagem segregada e certificação, e não necessariamente para uma rede de abastecimento inteiramente nova e paralela à existente. Isso reforça que, para SAF, o maior "pacote de política" é garantir rastreabilidade e criar mecanismos de apoio ao diferencial de preço, mais do que financiar bombas.

1.8 Síntese das tecnologias nos transportes

A análise das diferentes rotas tecnológicas apresentadas nesta seção evidencia que a transição energética do setor de transportes não será resultado da adoção de uma única tecnologia dominante, mas sim da combinação de múltiplas soluções energéticas e operacionais ao longo do tempo. Cada alternativa apresenta níveis distintos de maturidade tecnológica, custos, requisitos de infraestrutura e aplicabilidade entre modais, o que sugere trajetórias diferenciadas de difusão até 2050.

De forma geral, tecnologias já consolidadas ou em rápida expansão tendem a produzir impactos mais imediatos na redução de emissões e no aumento da eficiência do sistema de transportes, embora seu grau de maturidade varie conforme a aplicação. A eletrificação já é consolidada para veículos leves, mas ainda enfrenta barreiras de custo e infraestrutura para ônibus e, sobretudo, caminhões pesados. O etanol, por sua vez, está plenamente consolidado em veículos leves, dada a frota flexfuel brasileira.

Já o biodiesel, embora amplamente estabelecido como mistura ao diesel, enfrenta limites técnicos para aumentos adicionais do percentual de mistura, como estabilidade oxidativa e compatibilidade com motores e infraestrutura de armazenagem, o que restringe o ritmo de expansão de sua participação na matriz. Soluções digitais de otimização logística, por fim, apresentam maior maturidade tecnológica, menor risco de implementação e ampla compatibilidade com infraestruturas já existentes, favorecendo sua difusão no curto e médio prazo de forma mais uniforme entre modos.

[45] Fu, S. et al. (2025). Sustainable Aviation Fuel Deployment Strategies in Europe: Supply Chain Implications and Climate Benefits. Environmental Science & Technology. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5c02364. Acesso em: 01/07/2026.
[46] National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2024). Sustainable Aviation Fuel Blending and Logistics. Disponível em: https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/90979.pdf. Acesso em: 01/07/2026.
[47] Grease Connections (2025). Current SAF Blending Rules & 50% Limit. Disponível em: https://greaseconnections.com/saf-blending-regulations/. Acesso em: 01/07/2026.

Por outro lado, biocombustíveis avançados, hidrogênio de baixo carbono, combustíveis sintéticos e derivados como a amônia verde apresentam potencial estratégico para a descarbonização de setores classificados como *hard-to-abate*, especialmente nos modais aéreo, marítimo e em parte do transporte rodoviário pesado de longa distância. Contudo, sua difusão depende de avanços tecnológicos adicionais, redução de custos e desenvolvimento de novas infraestruturas e cadeias produtivas específicas, o que sugere uma expansão mais gradual ao longo das próximas décadas.

No caso brasileiro e, especificamente paulista, as rotas baseadas em biomassa, como etanol, biodiesel, biometano e SAF, constituem a principal via de descarbonização do setor de transportes, beneficiando-se de vantagens comparativas associadas à disponibilidade de recursos naturais, à maturidade da cadeia agro energética e à experiência institucional acumulada em políticas de biocombustíveis. Essas características posicionam o país não apenas como consumidor, mas também como potencial fornecedor global de combustíveis sustentáveis.

Além das tecnologias energéticas, soluções associadas à digitalização e ao uso de inteligência artificial na logística tendem a exercer papel transversal na transformação do setor de transportes. Ao otimizar rotas, melhorar a gestão de ativos e reduzir ineficiências operacionais, essas tecnologias podem gerar reduções indiretas de emissões e ganhos relevantes de produtividade logística, amplificando os efeitos das demais estratégias de descarbonização.

Nesse contexto, os cenários prospectivos do PLI-SP 2050 devem considerar uma combinação dessas rotas tecnológicas, incorporando diferentes ritmos de difusão e níveis de maturidade tecnológica. A integração entre eletrificação, biocombustíveis, hidrogênio e soluções digitais permitirá avaliar trajetórias alternativas de custos logísticos, consumo energético e emissões associadas ao sistema de transportes paulista ao longo das próximas décadas.

Para viabilizar sua incorporação aos exercícios de simulação do PLI-SP 2050, essas tecnologias são também classificadas conforme os horizontes temporais de planejamento adotados no plano: curto prazo (até 2033), médio prazo (2033 a 2043), longo prazo (2043 a 2050) e horizonte pós-PLI-SP 2050 (após 2050). Essa classificação permite diferenciar tecnologias já em fase de adoção comercial relevante daquelas cujas difusões em maior escala depende de avanços tecnológicos, redução de custos ou consolidação regulatória ao longo das próximas décadas.

A Tabela a seguir apresenta uma síntese das principais tecnologias analisadas nesta seção, contemplando os modais rodoviário, ferroviário, hidroviário, marítimo/portuário e dutoviário, destacando sua meta de difusão até 2050, o horizonte temporal de adoção comercial relevante e o impacto estimado na descarbonização do setor.

Tabela 1-3: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros

Tecnologia / Categoria	Referência 2050	Horizonte temporal	Potencial de Redução / Impacto	Fonte
Rodoviário				
Eletrificação	**—**	**—**	**Mitigação de GEE**	**PAC 2050**
Automóveis de passeio	55% da frota	Curto a médio prazo (2028-2043)	Mitigação de GEE e redução de fósseis	PAC 2050 / PEE 2050
Veículos comerciais leves	57% da frota	Curto a médio prazo (2028-2043)	Viabilidade em centros urbanos	PAC 2050 / PEE 2050
Ônibus urbanos	60% da frota	Curto a médio prazo (2028-2043)	Redução de poluentes e ruído local	PAC 2050 / PEE 2050
Caminhões urbanos	35% da frota	Médio prazo (2033-2043)	Foco em distribuição urbana	PAC 2050 / PEE 2050

Tecnologia / Categoria	Referência 2050	Horizonte temporal	Potencial de Redução / Impacto	Fonte
Caminhões pesados	17% da frota	Médio a longo prazo (2033-2050)	Desafios de autonomia de bateria	PAC 2050 / PEE 2050
Biocombustíveis	—	—	—	—
Ciclo Diesel (HVO + Biodiesel)	60% do mix total de combustíveis	Curto a médio prazo (2028-2043)	Substituição do diesel fóssil	PEE 2050
Biometano	50% do mix de gás veicular	Curto a médio prazo (2028-2043)	Mitigação de metano de resíduos	PAC 2050
SAF (Aviação Sustentável)	65% do consumo total do setor	Médio a longo prazo (2033-2050)	Redução de ~60% das emissões aéreas	IATA
Hidrogênio de Baixo Carbono	—	—	—	—
Caminhões (Longa distância)	10% da frota	Médio a longo prazo (2033-2050)	Alternativa para difícil eletrificação	PAC 2050
Ônibus urbanos	5% da frota	Médio a longo prazo (2033-2050)	Descarbonização profunda	PAC 2050
Atividade hidroviária	60% da atividade	Longo prazo (2043-2050)	Substituição de óleo pesado	PAC 2050
Ferroviário				
Eletrificação por catenária	Sem meta quantificada no PAC/PEE 2050; expansão em corredores estruturantes (TIC, TIM)	Curto a médio prazo (2028-2043)	Redução de emissões em corredores de alta densidade	PEF-SP-SEMIL-CPTM
Biocombustíveis (biodiesel, etanol)	Substituição inicial de até 50% do diesel (piloto Vale/Wabtec, a partir de 2028)	Curto prazo (2028-2033)	Redução de emissões com compatibilidade à frota existente	PEF-SP-SEMIL-CPTM
Hidrogênio em célula a combustível	Sem meta quantificada; tecnologia em testes internacionais	Médio a longo prazo (2033-2050)	Emissões diretas nulas em linhas não eletrificadas	PEF-SP-SEMIL-CPTM
Marítimo e Portuário				
- Biocombustíveis para navegação (metanol, amônia, biocombustíveis)	~6% da frota mundial (tonelagem) em 2022; tendência de expansão	Médio a longo prazo (2033-2050)	Redução de 15-20% nas emissões com adaptação dual fuel	UNCTAD (2023) / EPE
- Automação, digitalização e eletrificação Portuária (TOS, PCS, OPS/shore power)	Sem meta quantificada; consolidação de Portos verdes/inteligentes	Curto a médio prazo (2028-2043)	Ganhos de produtividade >20% e redução de emissões operacionais	UNCTAD (2023) / EPE

Tecnologia / Categoria	Referência 2050	Horizonte temporal	Potencial de Redução / Impacto	Fonte
Hidroviário				
- Eletrificação de embarcações	~12 GWh de consumo elétrico projetado para 2050 (pequeno porte, balsas, empurradores)	Médio prazo (2033-2043)	Redução de emissões na navegação interior (Hidrovia Tietê-Paraná)	PEE 2050
Dutoviário				
- Adaptação da rede de gás canalizado (biometano e hidrogênio)	Potencial de produção de biometano de ~6,5 milhões de m³/dia no estado	Médio a longo prazo (2033-2050)	Redução de fósseis na matriz de gás e integração com produção sucroenergética	PEE 2050 / PAC 2050
Digitalização				
- Inteligência Artificial (IA)	—	Curto a médio prazo (2028-2043)	Redução de até 15% nas emissões	Fórum Econômico Mundial

Fonte: Estudos mercadológicos. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Essa síntese tecnológica fornece subsídios para a construção dos cenários prospectivos do PLI-SP 2050, permitindo incorporar hipóteses diferenciadas de difusão tecnológica, custos energéticos e intensidade de emissões no sistema de transportes. No Capítulo 3, essas trajetórias tecnológicas serão traduzidas em parâmetros de modelagem que permitirão avaliar impactos sobre demanda energética, custos logísticos e emissões associadas aos diferentes cenários.

2 APLICAÇÃO DAS NOVAS TECNOLOGIAS OU COMBUSTÍVEIS POR MODO

Essa seção analisa a aplicação, por modo de transporte, das tecnologias e 6,4 discutidos no capítulo anterior, avaliando sua viabilidade técnica e os potenciais impactos sobre os sistemas de transporte de cargas e passageiros no Estado de São Paulo, no contexto das transformações tecnológicas, energéticas e organizacionais do setor.

São examinadas alternativas de oferta por modo de transporte, considerando aspectos como eficiência operacional, custos, integração modal, emissões de gases de efeito estufa, tempos de deslocamento e necessidades de investimentos em infraestrutura. Sempre que pertinente, são abordadas também as restrições institucionais e regulatórias associadas à malha de jurisdição federal, de modo a garantir realismo na definição de cenários futuros. O objetivo é identificar serviços com potencial de reorganizar fluxos logísticos e padrões de mobilidade regional, subsidiando a construção de cenários consistentes para o horizonte do PLI-SP 2050.

2.1 Hidroviário

O modo hidroviário, na navegação interior, encontra-se atualmente em um processo de transformação tecnológica, impulsionado pela crescente pressão regulatória sobre o setor de transportes e pelo avanço de novas tecnologias energéticas e digitais. Entre essas soluções destacam-se a eletrificação de embarcações de curta distância, a expansão do uso de biocombustíveis, o desenvolvimento de combustíveis sintéticos e o avanço de vetores energéticos emergentes, como hidrogênio e amônia verde.

O transporte hidroviário apresenta elevada eficiência energética relativa quando comparado a outros modais, sobretudo o rodoviário. Ainda assim, a frota atual depende majoritariamente de combustíveis fósseis, como óleo combustível e diesel marítimo, o que evidencia a necessidade de introdução progressiva de soluções de baixo carbono[48].

2.1.1 Eletrificação

A eletrificação representa uma das alternativas mais promissoras para a descarbonização da navegação, especialmente em operações fluviais, costeiras e de curta distância. Embarcações elétricas utilizam motores alimentados por baterias recarregáveis, geralmente abastecidas em terminais portuários com eletricidade proveniente da rede, idealmente de fontes renováveis.

Essa solução apresenta vantagens ambientais significativas, como eliminação de emissões diretas de dióxido de carbono, redução de poluentes atmosféricos locais, diminuição de ruído e menor vibração, benefícios particularmente relevantes em áreas urbanas, estuários, regiões ribeirinhas e ambientes ambientalmente sensíveis. Por outro lado, a eletrificação ainda enfrenta limitações importantes relacionadas à densidade energética das baterias, à autonomia operacional e ao tempo de recarga, o que restringe sua aplicação principalmente a embarcações de pequeno e médio porte e a rotas de curta distância.

A experiência internacional já demonstra eletrificação em escala, e não apenas casos pontuais de demonstração. A Noruega opera atualmente 111 balsas elétricas de passageiros e veículos, distribuídas em mais de 67 rotas, cerca de 40% da frota nacional, tendo inaugurado o segmento

[48] CEBDS (2025). Coalizão dos transportes: como tornar o setor de transportes um contribuidor ativo para a redução das emissões brasileira.

com a MF Ampere em 2015[49]. Na China, o número de embarcações elétricas em operação superou 440 até o fim de 2024, concentradas majoritariamente em balsas, mas com expansão acelerada também em navios de carga: de apenas 4 embarcações elétricas de carga em 2022 para 42 em 2025, das quais 86% já operam em hidrovias interiores, como os rios Yangtzé e Pérola[50].

Na Alemanha, a balsa Rheinfähre Mondorf, que opera no rio Reno, utiliza baterias de aproximadamente 1.000 kWh recarregadas com eletricidade renovável durante a noite, permitindo até 14 horas de operação diária[51].

Figura 2-1: Balsa Rheinfähre Mondorf, perto de Bonn, alimentada por motores elétricos.



Fonte: Images Peter Seyfferth/Getty Images.

De forma semelhante, iniciativas como o projeto Solar Rivers, liderado pela organização Kara Solar na Amazônia, demonstram a viabilidade de embarcações elétricas movidas a energia solar para transporte de passageiros em comunidades ribeirinhas.

[49] Business Norway (2026). Norway showcases award-winning electric ferry technology. Disponível em: https://businessnorway.com/articles/norway-showcases-award-winning-electric-ferry-technology. Acesso em: 10/09/2026.
[50] International Council on Clean Transportation – ICCT (2026). Beyond roads: Inland shipping is China's next electrification frontier. Disponível em: https://theicct.org/?p=93376. Acesso em: 10/09/2026.
[51] Rheinfähre Mondorf (2025). Die schönste und kürzeste Verbindung - Rheinelektrisch. Disponível em: https://rheinfaehre-mondorf.de. Acesso em: 12/03/2026.

Figura 2-2: Barco Solar Indígena



Fonte: Projeto Kara Solar.

No contexto brasileiro, a eletrificação tende a ser mais adequada para operações fluviais regionais, transporte de passageiros e serviços auxiliares, podendo desempenhar papel relevante na redução de emissões locais, ainda que com impacto limitado sobre o transporte hidroviário de cargas de longa distância.

Essa transição também dialoga com o planejamento energético paulista. O PEE 2050 projeta expansão da eletrificação mesmo nos modais em que ela tende a ocorrer de forma mais seletiva, estimando, para o hidroviário, consumo elétrico da ordem de 12 GWh em 2050, associado a embarcações de pequeno porte, balsas e empurradores, especialmente na Hidrovia Tietê-Paraná.

Um exemplo concreto e relevante dessa tendência é a eletrificação das travessias hidroviárias na Baixada Santista e no Vale do Ribeira, no âmbito da Parceria Público-Privada (PPP) de Travessias Hídricas do Estado de São Paulo. O projeto, estruturado pelo governo estadual, prevê a modernização integral da frota de balsas, com a incorporação progressiva de embarcações elétricas ou híbridas-elétricas, além da requalificação dos terminais e da infraestrutura de apoio à operação[52].

A iniciativa abrange travessias estratégicas para a mobilidade regional, como Santos–Guarujá, São Vicente–Praia Grande e outras conexões fundamentais para o deslocamento diário de

[52] Agência SP. PPP de Travessias Hídricas vai transformar a mobilidade no litoral paulista com mais rapidez e conforto. Disponível em: https://www.agenciasp.sp.gov.br/ppp-de-travessias-hidricas-vai-transformar-a-mobilidade-no-litoral-paulista-com-mais-rapidez-e-conforto/. Acesso em: 06/02/2026.

passageiros, veículos leves e cargas urbanas. A introdução de balsas eletrificadas visa reduzir de forma significativa as emissões locais de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa, bem como os níveis de ruído, em uma região densamente urbanizada e ambientalmente sensível, marcada pela proximidade de áreas portuárias, estuários e zonas residenciais.

Além dos benefícios ambientais diretos, o projeto apresenta ganhos relevantes em termos de eficiência operacional, confiabilidade do serviço e conforto dos usuários. A redução de vibração e ruído, associada à maior previsibilidade do desempenho energético, contribui para a melhoria da experiência do transporte e para a aceitação social da tecnologia. Do ponto de vista sistêmico, a iniciativa também cria demanda para o desenvolvimento de infraestrutura elétrica portuária e para a capacitação técnica local, estimulando a formação de competências associadas à transição energética no modo hidroviário.

A eletrificação das balsas na Baixada Santista ilustra, portanto, como solução de baixo carbono, pode ser incorporada de forma pragmática e escalável em serviços públicos de transporte hidroviário, sem comprometer a continuidade operacional. Trata-se de um caso emblemático de aplicação da eletrificação em navegação de curta distância, plenamente coerente com as diretrizes do PEE e do PAC, e que pode servir de referência para outras travessias fluviais e costeiras no Estado de São Paulo.

2.1.2 Biocombustíveis

Os biocombustíveis constituem atualmente a alternativa mais imediata e economicamente viável para a descarbonização do transporte hidroviário, especialmente em frotas existentes. Combustíveis como biodiesel e diesel verde (HVO) apresentam a vantagem de serem compatíveis, até determinados percentuais de mistura, com motores de combustão interna já em operação, característica conhecida como "drop-in", o que reduz significativamente a necessidade de investimentos em adaptação de embarcações e infraestrutura. Já o metanol não compartilha dessa vantagem: por não se inflamar espontaneamente em motores de ciclo diesel convencionais, seu uso exige motores dedicados ou de duplo combustível (*dual-fuel)* e sistemas específicos de armazenamento e distribuição, com custos de retrofit estimados entre €250 e €650 por kW[53].

A descarbonização do transporte aquaviário, biocombustíveis podem ser incorporados de forma progressiva, permitindo reduções relevantes de emissões de GEE no curto prazo[54]. No Brasil, o biodiesel já vem sendo utilizado em escala comercial em embarcações: a Petrobras/Transpetro consolidou o uso do blend B24 em operações comerciais desde 2025, após autorização da ANP concedida em 2024, e a Citrosuco realizou, em agosto de 2025, a primeira viagem de longo curso de sua frota com biodiesel B24[55].

O etanol, por sua vez, ainda não tem aplicação em escala equivalente: seu uso permanece incipiente, e a ANP abriu, em julho de 2026, consulta pública para facilitar a comercialização de biocombustíveis no transporte aquaviário, incluindo etanol e biodiesel puro (B100), dispensando

[53] Sustainable Ships (2025). The State of Methanol as Marine Fuel. Disponível em: https://www.sustainable-ships.org/stories/2023/methanol-marine-fuel. Acesso em: 01/09/2026.
[54] EPE (2025). Nota Técnica - Descarbonização do Transporte Aquaviário: Desafios e Trajetórias Nacionais para Combustíveis Marítimos.
[55] Click Petróleo e Gás (2025). Petrobras supplies Transpetro ships with B24 renewable bunker fuel. Disponível em: https://en.clickpetroleoegas.com.br/petrobras-abastece-navios-da-transpetro-com-bunker-renovavel-b24-contendo-24-de-biodiesel-operacao-reduz-emissoes-e-apoia-metas-ambientais-do-setor-maritimo-brasileiro-hl1402/. Acesso em: 01/09/2026.

a exigência de anuência prévia hoje necessária[56]. Esse tipo de iniciativa evidencia o potencial do Brasil para desempenhar papel relevante na descarbonização do transporte marítimo, aproveitando sua base agrícola, disponibilidade de biomassa e experiência consolidada em políticas de biocombustíveis.

Para a Hidrovia Tietê-Paraná, essa aderência é ainda maior. Como se trata de um sistema em que a frota existente pode incorporar combustíveis renováveis com mudanças de baixa complexidade, os biocombustíveis surgem como solução particularmente pragmática, permitindo ganhos ambientais relevantes com custos de transição relativamente baixos. A própria EPE aponta, em suas trajetórias de longo prazo, que a navegação interior pode ser suprida integralmente por biocombustíveis até 2050, com substituição progressiva do óleo diesel marítimo por biodiesel e etanol, a partir da segunda metade da década de 2020.

O biometano, na forma de GNL (Gás Natural Liquefeito) ou seu equivalente renovável, o Bio-GNL, representa outra rota já em aplicação comercial na navegação interior[57]. Na Europa, hidrovias como o Reno e o Danúbio contam com embarcações dedicadas ao abastecimento fluvial de GNL, sob regulação específica (Acordo ADN) para transporte e manuseio do combustível em vias interiores[58]. A frota global de embarcações movidas a GNL, atualmente da ordem de 355 navios, já pode utilizar Bio-GNL como substituto direto, sem necessidade de modificação, o que confere a essa rota um caminho relativamente maduro de descarbonização para a navegação interior, à medida que a produção de biometano se expande.

Do ponto de vista do PAC 2050, o hidroviário também aparece entre os modais com espaço para vetores alternativos de baixa emissão. Nesse sentido, os biocombustíveis tendem a constituir a principal rota de curto e médio prazo para a navegação interior, enquanto vetores mais disruptivos devem ganhar relevância apenas em horizontes mais longos.

2.1.3 Outros vetores tecnológicos

Além da eletrificação e dos biocombustíveis, o modo hidroviário vem sendo impactado por um conjunto de tecnologias emergentes que, embora ainda em estágio inicial, apresentam elevado potencial de inovação no médio e longo prazo.

[56] Eixos (2026). ANP coloca em consulta novas regras para facilitar o uso de biocombustíveis no transporte aquaviário. Disponível em: https://eixos.com.br/combustiveis-e-bioenergia/biocombustiveis/anp-coloca-em-consulta-novas-regras-para-facilitar-o-uso-de-biocombustiveis-no-transporte-aquaviario/. Acesso em: 01/09/2026.
[57] Riviera Maritime News (2021). Titan LNG develops bilobe tank for inland waterway LNG bunker vessels. Disponível em: https://www.rivieramm.com/news-content-hub/titan-lng-develops-bilobe-tank-for-inland-waterway-lng-bunker-vessels-69030. Acesso em: 01/09/2026.
[58] Nautilus International. Europe's first inland waterway LNG bunker vessel begins operations. Disponível em: https://www.nautilusint.org/en/news-insight/news/europes-first-inland-waterway-lng-bunker-vessel-begins-operations/. Acesso em: 01/09/2026.

Figura 2-3: Barco movido 100% a hidrogênio verde, construído pela Itaipu Binacional



Fonte: Agência Brasil, foto de Bruno de Freitas Moura.

Entre essas alternativas, destaca-se o hidrogênio verde, produzido a partir de eletrólise da água com energia renovável. Apesar de sua baixa densidade energética volumétrica e dos desafios associados ao armazenamento a bordo, projetos recentes indicam viabilidade técnica para aplicações específicas. No Brasil, a Itaipu Binacional apresentou, em 2025, a primeira embarcação 100% movida a hidrogênio verde da América Latina (Figura 2-3), enquanto a embarcação JAQ H1, apresentada na COP30, demonstra o avanço da iniciativa privada nesse segmento (Figura 2-4).

Figura 2-4: Embarcação JAQ H1, da JAQ Apoio Marítimo



Fonte: Revista eletrônica Náutica, Foto de Victor Santos.

Outra rota promissora envolve os combustíveis sintéticos (e-*fuels*), produzidos a partir da combinação de hidrogênio verde com CO_2 capturado, resultando em hidrocarbonetos neutros em carbono, como e-metanol, e-amônia e e-diesel. Essas soluções são vistas como particularmente adequadas para o transporte marítimo de longo curso, embora ainda enfrentem desafios relacionados a custos, escala produtiva e regulação.

Adicionalmente, sistemas híbridos, que combinam motores a combustão, baterias e geração elétrica auxiliar, vêm sendo adotados como soluções intermediárias, permitindo ganhos de eficiência energética e redução de emissões, especialmente em operações com regimes variáveis de carga.

Os avanços tecnológicos já observados na navegação indicam que a substituição progressiva dos combustíveis fósseis é tecnicamente viável, mas requer avaliações específicas por tipo de embarcação, rota e perfil de carga. A identificação das soluções mais adequadas, sob os pontos de vista técnico, econômico e institucional, depende da consideração de fatores como as características operacionais locais, a disponibilidade de combustíveis, os custos de adaptação e os ganhos ambientais esperados.

2.1.4 Implicações para cenários futuros

A evolução tecnológica do transporte hidroviário deverá ocorrer de forma gradual e diferenciada entre tipos de operação, perfis de embarcação e escalas geográficas. No horizonte de planejamento considerado pelo PLI-SP 2050, a transição energética do setor tende a ser caracterizada pela coexistência de diferentes rotas tecnológicas, refletindo as especificidades operacionais do modo hidroviário e o estágio de maturidade de cada solução energética.

No curto e médio prazo, as tecnologias com maior probabilidade de difusão são aquelas que apresentam maior grau de maturidade tecnológica e maior compatibilidade com a infraestrutura existente. Nesse grupo destacam-se:

- Biocombustíveis marítimos;
- Sistemas híbridos de propulsão;
- Eletrificação de embarcações de curta distância.

Essas alternativas tendem a concentrar-se em operações locais e regionais, sobretudo em travessias urbanas, transporte fluvial de passageiros, embarcações de apoio portuário e navegação interior.

No caso específico do Estado de São Paulo, a eletrificação deverá produzir impactos predominantemente em escala local e regional, com destaque para travessias públicas e serviços auxiliares. Os biocombustíveis, por sua vez, apresentam maior potencial de impacto em escala regional e nacional, pois podem ser incorporados de forma relativamente rápida à frota existente e contribuir para reduzir emissões no transporte de cargas hidroviário sem exigir substituição integral dos ativos.

No longo prazo, vetores como hidrogênio verde, amônia e combustíveis sintéticos poderão ganhar relevância, sobretudo em operações de maior distância e intensidade energética. Contudo, sua difusão dependerá de fatores como redução de custos tecnológicos, expansão da infraestrutura energética, desenvolvimento de cadeias produtivas específicas, consolidação regulatória internacional e existência de instrumentos de incentivo econômico.

Nesse contexto, diferentes tecnologias tendem a apresentar impactos distintos sobre o setor hidroviário, tanto em termos de escala territorial quanto de horizonte temporal de adoção.

Tabela 2-1: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modo hidroviário

Tecnologia	Escala de impacto	Horizonte temporal*
Eletrificação de embarcações	Local / regional	Médio prazo (2033–2043)
Biocombustíveis marítimos	Regional/ nacional	Curto a Médio prazo (2028-2043)
Sistemas híbridos	Regional	Curto a Médio prazo (2028-2043)
Hidrogênio verde	Nacional/global	Longo prazo (2043-2050)
Amônia verde	Global	Longo prazo ou pós-PLI (2043–após 2050)
Combustíveis sintéticos	Global	Longo prazo ou pós-PLI (2043–após 2050)

*Nota: * Os horizontes indicam o período provável de adoção comercial relevante e de difusão da tecnologia no modo hidroviário, e não sua data de surgimento ou de realização dos primeiros projetos-piloto. Foram considerados os marcos temporais do PLI-SP 2050: curto prazo = até 2033; médio prazo = de 2033 a 2043; longo prazo = de 2043 a 2050; e horizonte pós-PLI = após 2050. Tecnologias classificadas em mais de um horizonte podem apresentar adoção inicial em nichos, frotas cativas ou corredores específicos antes de sua disseminação em maior escala.*

Fonte: Estudos mercadológicos. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

De forma geral, a transição energética no transporte hidroviário deverá ocorrer por meio de uma combinação dessas diferentes rotas tecnológicas, refletindo as características operacionais do setor e a diversidade de aplicações do modo.

Para o horizonte de planejamento do PLI-SP 2050, isso implica considerar trajetórias tecnológicas diferenciadas entre navegação interior, transporte fluvial regional e transporte marítimo de longo curso, incorporando hipóteses realistas de maturidade tecnológica, disponibilidade energética e evolução regulatória internacional.

2.2 Marítimo e portuário

Nos segmentos de navegação marítima e de infraestrutura portuária, a incorporação de novas tecnologias tem sido definida pela convergência entre metas ambientais cada vez mais ambiciosas e a necessidade de ganhos contínuos de produtividade. O desempenho operacional passa, crescentemente, pela capacidade de integrar combustíveis de baixa intensidade de carbono, novos sistemas de propulsão e plataformas inteligentes de gestão de dados, capazes de otimizar rotas, operações e o uso de ativos ao longo da cadeia logística.

Segundo a *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD)[59], o transporte marítimo ocupa posição central no debate global sobre sustentabilidade. O setor responde por mais de 80% do comércio mundial de mercadorias em volume e por cerca de 3% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). Embora essa participação relativa seja inferior à de outros setores intensivos em energia, a tendência histórica aponta para crescimento das emissões, em função da expansão do comércio internacional e do aumento do tamanho médio das embarcações.

Nesse contexto, a *International Maritime Organization* (IMO) vem coordenando o principal arcabouço regulatório internacional para a descarbonização da navegação. A estratégia revisada da IMO, aprovada em 2023, estabelece a ambição de atingir emissões líquidas zero "por volta de 2050", além de checkpoints indicativos para reduzir as emissões totais anuais do transporte

[59] UNCTAD (2023). Review of Maritime Transport.

marítimo internacional em pelo menos 20%, buscando 30%, até 2030, e em pelo menos 70%, buscando 80%, até 2040, ambos em relação a 2008. A estratégia também prevê a expansão do uso de combustíveis de zero ou quase zero emissões ao longo das próximas décadas[60].

A transição energética do transporte marítimo exigirá mudanças profundas não apenas nos combustíveis empregados, mas também no projeto dos navios, nos sistemas de propulsão, nos padrões operacionais e na infraestrutura portuária de apoio. Entre as mudanças mais relevantes destacam-se a adoção de combustíveis de baixa ou nula emissão, a conversão ou substituição de motores, a incorporação de tecnologias auxiliares de eficiência energética e ajustes operacionais, como otimização de rotas e redução de velocidades. Essas transformações tendem a elevar custos de transição no curto e médio prazo, o que reforça a importância de ganhos adicionais de eficiência logística e portuária para compensar parte desse impacto sobre fretes, tempos de viagem e competitividade[61].

Nesse cenário, os portos deixam de ser apenas pontos de transbordo e passam a atuar como infraestrutura estratégica da transição energética marítima. Além de buscar maior eficiência operacional, redução de tempos de estadia e integração de processos, os portos deverão ofertar novos combustíveis, energia elétrica em terra, sistemas digitais avançados e serviços de apoio à operação de embarcações de nova geração.

No Brasil, esse movimento vem sendo progressivamente incorporado à política pública setorial. Em 2025, o Ministério de Portos e Aeroportos instituiu o Programa Nacional de Descarbonização de Portos (PND-Portos) e o Programa Nacional de Descarbonização da Navegação (PND-Navegação), com o objetivo de reduzir progressivamente as emissões de gases de efeito estufa, incentivar a eficiência energética e modernizar a infraestrutura portuária e de navegação nacional, em alinhamento com a agenda internacional de transição energética[62].

No plano multilateral, a IMO também vem discutindo mecanismos econômicos para apoiar a transição de forma mais equilibrada entre países. Em abril de 2025, a 83ª sessão do Comitê de Proteção do Meio Ambiente Marinho da IMO (MEPC 83) aprovou um pacote de medidas com padrão global de combustível e mecanismo econômico para emissões, no âmbito do chamado IMO Net-Zero Framework[63].

Contudo, a própria IMO registra que as discussões sobre adoção formal e implementação plena do arranjo foram adiadas para 2026. Assim, instrumentos como o fundo internacional associado à transição marítima devem ser tratados, no presente momento, como mecanismos em estruturação, ainda que com potencial relevante para financiar inovação, infraestrutura, capacitação e mitigação de impactos distributivos em países em desenvolvimento.

Do ponto de vista tecnológico, a descarbonização do setor marítimo deverá ocorrer por meio de uma combinação de rotas, entre as quais se destacam combustíveis de baixo carbono, sistemas de propulsão assistida, digitalização, captura de carbono a bordo, eletrificação de embarcações de curta distância e, em horizonte mais longo, tecnologias mais disruptivas, como amônia, hidrogênio e até aplicações nucleares civis de nova geração. Paralelamente, observa-se transformação igualmente relevante na infraestrutura portuária, impulsionada por automação,

[60] UNCTAD (2023). Resolução MEPC.377(80) do *Marine Environment Protection Committee* (MEPC) de 7/7/2023.
[61] UNCTAD (2023). Review of Maritime Transport.
62 Brasil (2025). Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2025/11/governo-federal-anuncia-criacao-de-programas-de-descarbonizacao-da-navegacao-durante-a-cop30. Acesso em: 02/02/2026.
[63] IMO (2025). Marine Environment Protection Committee (MEPC 83), 7 to 11 April 2025. Disponível em: https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/mepc-83rd-session.aspx. Acesso em: 01/09/2026.

inteligência artificial, Internet das Coisas, integração de fontes renováveis e sistemas avançados de gestão, consolidando os conceitos de portos inteligentes e portos verdes[64].

2.2.1 Biocombustíveis no transporte marítimo

A conversão de motores convencionais para operação bicombustível (*dual fuel*) permite que embarcações utilizem, além do combustível fóssil tradicional, um segundo combustível de menor intensidade de carbono. Essa solução já vem sendo adotada, sobretudo, em navios transportadores de GNL e GLP, que passam a utilizar o próprio combustível transportado como fonte de energia.

De acordo com estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), esse tipo de adaptação pode resultar em reduções da ordem de 15% a 20% nas emissões de gases de exaustão, decorrentes da substituição parcial do combustível fóssil convencional por um combustível de menor teor de carbono e queima mais completa (como GNL ou metanol), reduzindo proporcionalmente as emissões de CO_2, NOx e material particulado, dependendo do combustível utilizado e do perfil operacional da embarcação[65].

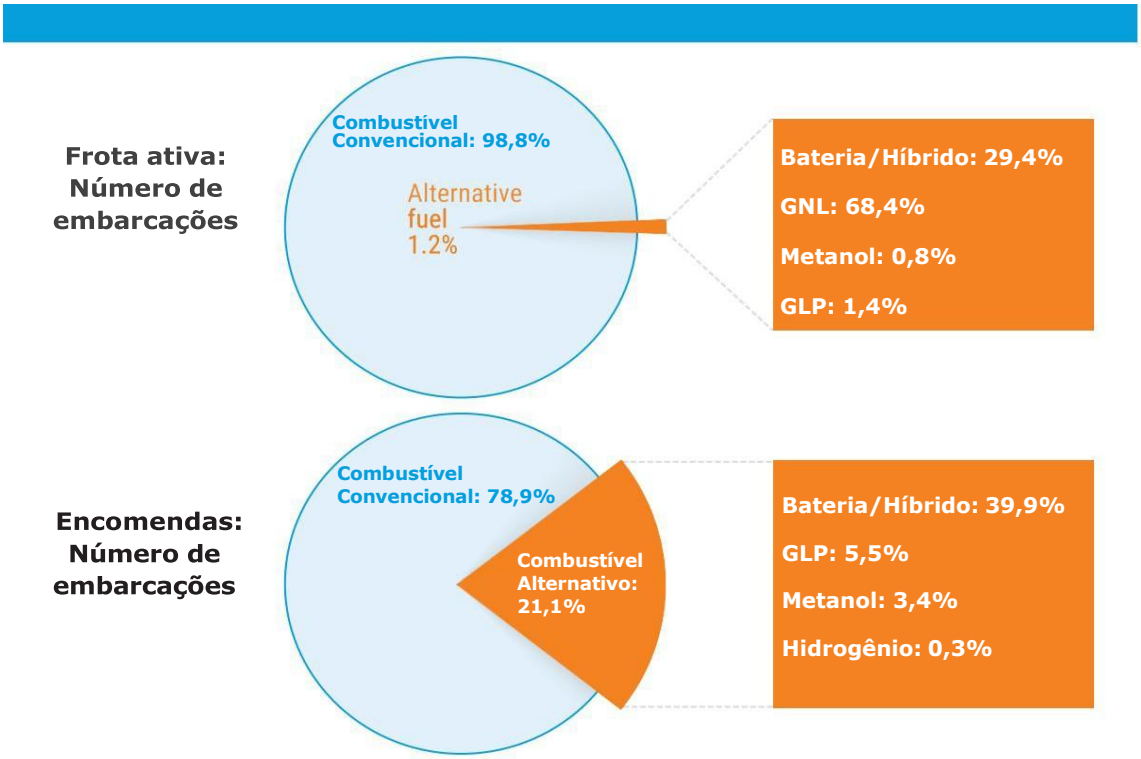
O mesmo estudo aponta que o custo de modernização, incluindo sistemas de armazenamento e abastecimento, varia entre US$ 5 milhões e US$ 15 milhões, conforme o tipo de combustível, e não deve exceder, como regra geral, 25% do custo de construção de um novo navio, de modo a preservar a viabilidade econômica do investimento.

No cenário internacional, armadores como Maersk, CMA CGM e COSCO *Shipping* têm liderado iniciativas voltadas à incorporação de combustíveis de baixo carbono em suas frotas. No Brasil, destaca-se a Vale, que desenvolve projetos pioneiros de design naval, prevendo a instalação de tanques e sistemas compatíveis com biocombustíveis e combustíveis de baixo carbono, como GNL, metanol e amônia, para operação com motores *dual fuel*.

Apesar desses avanços, a frota mundial ainda é amplamente dependente de combustíveis convencionais. Em 2022, cerca de 98,8% das embarcações em operação utilizavam combustíveis fósseis tradicionais, enquanto apenas 1,2% empregavam combustíveis de baixo carbono, com destaque para GNL, sistemas bateria/híbrido, GLP e metanol (Figura 2-5).

[64] EPE (2025). Descarbonização do Transporte Aquaviário: Desafios e Trajetórias Nacionais para Combustíveis Marítimos.
[65] EPE (2025). Nota Técnica NT-EPE-DPG-SDB-2025-04 — Descarbonização do Transporte Aquaviário: Desafios e Trajetórias Nacionais para Combustíveis Marítimos.

Figura 2-5: Adoção de Combustível Alternativo na Frota Mundial de Navios, 2022 - Número de embarcações



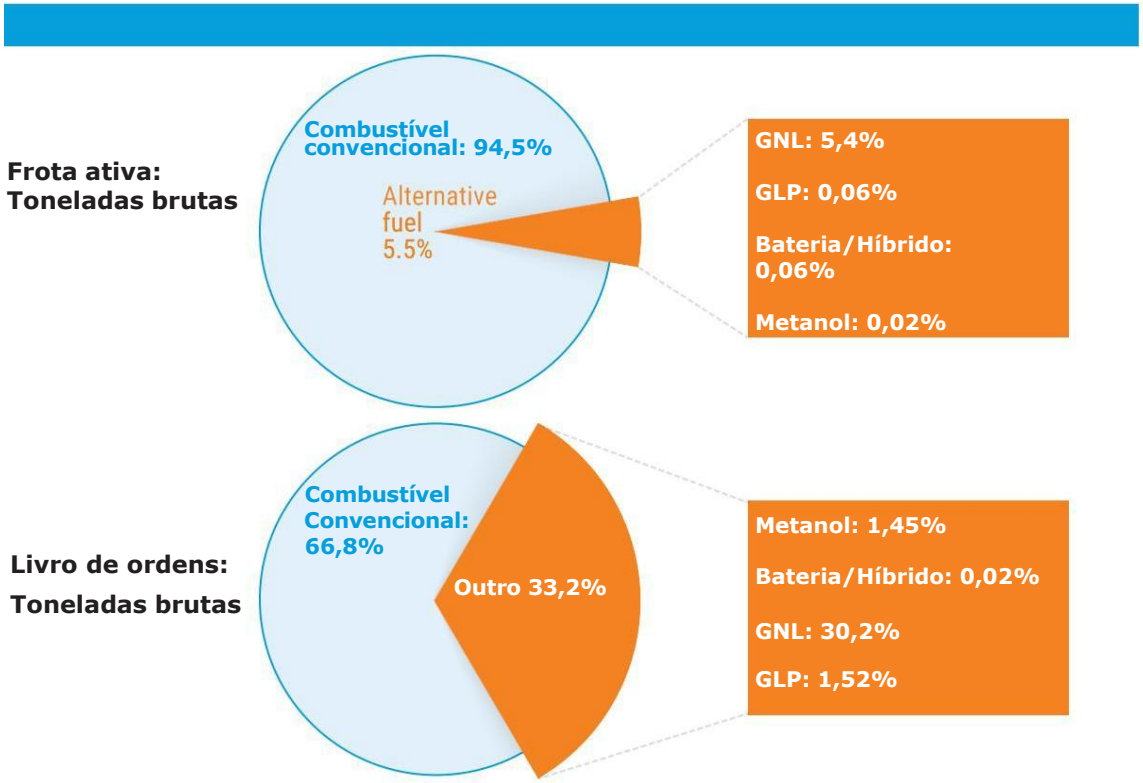
Fonte: Review of Maritime Transport – UNCTAD, 2023 — Traduzido e adaptado pelo Consórcio Concremat-Transplan (2026).

A maior parte das embarcações movidas a GNL corresponde a navios transportadores desse próprio produto, assim como ocorre com o GLP, cujo uso é praticamente restrito aos navios dedicados ao seu transporte. Já as embarcações com propulsão elétrica ou híbrida concentram-se em navios de menor porte, empregados em rotas de curta distância, travessias fluviais ou serviços auxiliares.

A navegação de apoio portuário e de apoio marítimo desponta como um segmento particularmente promissor para a adoção de sistemas bateria/híbrido, aplicáveis, por exemplo, a rebocadores e embarcações de apoio à exploração offshore de petróleo e gás.

Quando analisada pela tonelagem bruta, a adoção de combustíveis de baixo carbono apresenta maior relevância: em 2022, cerca de 6% da frota mundial ativa operava com combustíveis de baixo carbono, predominantemente GNL. Ademais, aproximadamente um terço da tonelagem mundial encomendada já foi projetada para operar com esse tipo de combustível (Figura 2-6).

Figura 2-6: Adoção de Combustível Alternativo na Frota Mundial de Navios, 2022 - Toneladas Brutas



Fonte: Review of Maritime Transport – UNCTAD, 2023 — Traduzido e adaptado pelo Consórcio Concremat-Transplan (2026).

Entre os combustíveis de baixo carbono para rotas de longa distância, predominam o GNL, GLP, metanol, amônia e, em menor escala, o hidrogênio. Segundo a EPE, os biocombustíveis avançados se destacam entre as opções mais adequadas ao transporte marítimo internacional no médio e longo prazo, ao lado dos e-combustíveis (combustíveis sintéticos) — estes últimos com especial destaque para o metanol e a amônia.

Conforme ressalta a EPE, os biocombustíveis avançados constituem uma opção particularmente relevante no curto prazo, uma vez que as normas vigentes permitem misturas de até 20% sem necessidade de modificações nos motores existentes. Além disso, motores a metanol já representam uma tecnologia madura, permitindo que novas embarcações operem integralmente com esse combustível. O biometano e o e-metanol renovável exigem pouca ou nenhuma adaptação técnica e podem gerar reduções expressivas nas emissões de gases de efeito estufa em comparação aos combustíveis convencionais.

Nesse contexto, a EPE diferencia biocombustíveis convencionais, produzidos a partir de matérias-primas alimentares tradicionais, como grãos e óleos vegetais, de biocombustíveis avançados, obtidos de fontes não alimentares, como resíduos agrícolas, florestais, urbanos e óleos residuais[66]. Essa distinção reflete preocupações internacionais, sobretudo na União Europeia e nos Estados Unidos, sobre a competição entre uso da terra para energia e para alimentos.

No caso brasileiro, contudo, essa preocupação não se aplica da mesma forma: o etanol de cana-de-açúcar é reconhecido como o biocombustível de menor intensidade de carbono do mundo,

[66] EPE (2025). Nota Técnica NT-EPE-DPG-SDB-2025-06 — Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis.

reduzindo em até 90% as emissões de CO2 em relação à gasolina[67]. Estudos que analisam mais de 200 casos mostram que, no Brasil, a expansão da produção de etanol, inclusive a partir do milho, não reduziu a oferta de alimentos nem elevou preços domésticos, graças a sistemas agrícolas integrados que combinam, na mesma cadeia produtiva, energia, ração animal e alimentos[68].

Entre as principais opções de biocombustíveis para o transporte marítimo, destacam-se:

- **Biodiesel** – utilizado recentemente em misturas na navegação marítima, como o B24, comercializado pela Petrobras.
- **Diesel Verde (HVO)** – produzido a partir do óleo vegetal hidrogenado.
- **Etanol** - obtido de fontes renováveis, como cana-de-açúcar e milho.
- **Biometano** - biocombustível gasoso derivado da purificação do biogás e constituído essencialmente de metano.
- **Biometanol** - obtido a partir de biomassa, incluindo resíduos florestais, agrícolas e urbanos.
- **FT-diesel** - combustível sintético produzido a partir de biomassa via processo Fischer-Tropsch.

De forma geral, combustíveis de baixo carbono como GNL, hidrogênio, metanol, amônia, biocombustíveis e eletricidade configuram-se como as principais rotas tecnológicas para a descarbonização do transporte marítimo. No contexto brasileiro, os biocombustíveis líquidos, especialmente biodiesel e etanol, assumem papel de destaque, em razão da maturidade industrial, da ampla disponibilidade de matéria-prima e da infraestrutura de distribuição já consolidada.

2.2.2 Outros vetores tecnológicos no transporte marítimo

Além da substituição direta de combustíveis, a descarbonização do transporte marítimo vem sendo impulsionada por vetores tecnológicos complementares, capazes de reduzir o consumo energético, mitigar emissões e ampliar a eficiência operacional das embarcações, inclusive em combinação com combustíveis de baixo carbono.

Um desses vetores é o uso de sistemas de propulsão assistida pelo vento, que vêm sendo retomados com base em tecnologias modernas, como velas rígidas, rotores *Flettner*, asas aerodinâmicas e *kites* automatizados. Essas soluções apresentam potencial de redução do consumo de combustível e das emissões entre 5% e 9%, podendo alcançar até 25% em condições operacionais favoráveis, especialmente em rotas com regimes de vento previsíveis.

A eficiência dessas tecnologias é significativamente ampliada quando associada a sistemas avançados de modelagem computacional, que integram dados meteorológicos, otimização de rotas e planejamento logístico. Dessa forma, a propulsão eólica não apenas reduz o consumo energético direto, como também atua de forma complementar ao uso de combustíveis de baixo carbono, contribuindo para a redução do custo operacional e da necessidade de armazenamento de combustíveis a bordo.

[67] GC Notícias (2026). Etanol de cana pode reduzir emissões em até 19% até 2030 e fortalecer transição energética no Brasil. Disponível em: https://www.gcnoticias.com.br/rural/etanol-de-cana-pode-reduzir-emissoes-em-ate-19-ate-2030-e-fortalecer-transicao-energetica-no-brasil/250852792. Acesso em: 01/09/2026.
[68] UDOP (2025). Biocombustíveis não ameaçam a alimentação. Disponível em: https://www.udop.com.br/noticia/2025/10/27/biocombustiveis-nao-ameacam-a-alimentacao. Acesso em: 01/09/2026.

Outro vetor tecnológico estudado é a captura e armazenamento de carbono a bordo (*Carbon Capture and Storage* – CCS). Essa tecnologia permite capturar o CO_2 presente nos gases de exaustão antes de sua liberação na atmosfera, viabilizando, em tese, uma operação com emissões líquidas próximas de zero, independentemente do combustível utilizado. No entanto, sua implementação impõe desafios relevantes, como a necessidade de espaço adicional para armazenamento do CO_2 capturado, impactos sobre o consumo energético do navio e, sobretudo, a existência de uma cadeia logística eficiente em terra, capaz de receber, transportar e armazenar permanentemente o carbono capturado.

Segundo a Nota Técnica *Descarbonização do Transporte Aquaviário*, publicada pela Empresa de Pesquisa Energética[69], o desenvolvimento e a viabilidade econômica dessa tecnologia no transporte marítimo estão fortemente condicionados à precificação do carbono. Conforme destaca o estudo da instituição, espera-se que a expansão da captura de CO_2 em instalações terrestres, onde os volumes capturados são significativamente maiores, impulsione o amadurecimento tecnológico, a redução de custos e a consolidação da infraestrutura logística, criando externalidades positivas que poderão viabilizar, no médio prazo, a adoção da CCS também no setor marítimo.

Por fim, o estudo da EPE também menciona a propulsão nuclear como um vetor tecnológico de longo prazo, especialmente no contexto do desenvolvimento de Pequenos Reatores Modulares (*Small Modular Reactors* – SMRs). Esses reatores, com potência inferior a 300 MW, apresentam potencial para reduzir custos de construção, permitir maior padronização industrial e simplificar processos de licenciamento quando comparados aos reatores nucleares convencionais. Apesar do elevado potencial de geração contínua de energia sem emissões diretas de carbono, a adoção dessa tecnologia no transporte marítimo civil enfrenta barreiras significativas, incluindo questões regulatórias, riscos de aceitação social, segurança operacional e desafios relacionados ao descarte de resíduos nucleares.

Em síntese, tecnologias como propulsão assistida pelo vento, captura e armazenamento de carbono a bordo e propulsão nuclear avançada não substituem, mas complementam as estratégias baseadas em combustíveis de baixo carbono, ampliando o leque de soluções disponíveis para a descarbonização do transporte marítimo. A viabilidade e a velocidade de adoção desses vetores dependerão, em grande medida, de fatores institucionais e econômicos, como a precificação de carbono, a evolução regulatória internacional e os avanços tecnológicos associados à digitalização e à automação naval.

2.2.3 Vetores tecnológicos na infraestrutura portuária

Os portos ocupam posição central no comércio marítimo internacional e constituem elos logísticos estratégicos da cadeia de transporte, desempenhando papel fundamental tanto na eficiência operacional quanto na estratégia de descarbonização do setor marítimo. A modernização da infraestrutura portuária é condição necessária para viabilizar a transição energética da frota, reduzir emissões locais e sistêmicas e elevar a competitividade logística.

Nos últimos anos, o setor portuário vem passando por uma transformação estrutural, impulsionada pela adoção de tecnologias como automação, digitalização, inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), big data, gêmeos digitais e sistemas avançados de gestão. Essas inovações têm dado origem ao conceito de "portos inteligentes" (*smart ports*), caracterizados

[69] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025). Descarbonização do Transporte Aquaviário: Desafios e Trajetórias Nacionais para Combustíveis Marítimos. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-903/NT-EPE-DPG-SDB-2025-04_Descarbonização_Transporte_Aquaviário_.pdf. Acesso em: 01/07/2026.

por operações mais eficientes, sustentáveis, seguras e integradas às cadeias logísticas globais, com impactos diretos sobre o atendimento aos navios, a redução de tempos de espera e o consumo energético.

A automação portuária envolve a implementação de sistemas e equipamentos capazes de operar com mínima ou nenhuma intervenção humana, abrangendo desde guindastes automatizados (STS, RTG e RMG) até veículos guiados automaticamente (AGVs), sistemas de controle remoto, robótica e amarração automatizada. Portos de referência internacional, como Porto de Roterdã e Porto de Singapura, demonstram ganhos expressivos de produtividade, segurança e sustentabilidade, com aumentos de produtividade superiores a 20% e reduções relevantes de emissões operacionais.

No Brasil, portos como o Porto de Santos e o Porto do Açu vêm investindo em agendamento eletrônico, controle automatizado de acessos, sensores IoT, monitoramento ambiental e torres de controle logístico, com resultados significativos na redução de tempos de permanência de caminhões, tempos de atracação e emissões associadas à ociosidade operacional.

A digitalização é outro vetor central dessa transformação. Sistemas como *Terminal Operating Systems* (TOS) e *Port Community Systems* (PCS) integram, em tempo real, operações portuárias, documentação, logística terrestre e marítima, promovendo maior transparência, rastreabilidade e coordenação entre armadores, terminais, autoridades portuárias, transportadores e órgãos reguladores.

Tecnologias complementares, como IA, big data, IoT, redes 5G, *cloud* e *edge computing*, permitem previsões mais precisas de chegada de navios, otimização de pátios, manutenção preditiva de equipamentos e monitoramento ambiental contínuo. Gêmeos digitais, por sua vez, viabilizam simulações operacionais e energéticas, contribuindo para o planejamento de investimentos, redução de gargalos e otimização do uso de recursos.

O TOS constitui o núcleo operacional dos terminais, responsável por planejar e controlar atracações, movimentação de cargas, gestão de pátios e operação de gates. Soluções avançadas permitem integração com sensores IoT, algoritmos de IA e plataformas analíticas, elevando significativamente a eficiência operacional. No Porto de Santos, por exemplo, terminais como a Santos Brasil utilizam sistemas TOS para gerenciar integralmente a operação de contêineres.

Já o PCS promove a integração digital de toda a comunidade portuária. No Brasil, destaca-se o Porto Sem Papel, que centraliza dados e documentos de diversos órgãos públicos, como Receita Federal, Anvisa, Marinha e Polícia Federal, e dos agentes privados. Essa integração reduziu drasticamente o tempo de autorizações de atracação, simplificou procedimentos de liberação de cargas e contribuiu para a sustentabilidade operacional do sistema portuário nacional.

Os ganhos associados ao Porto Sem Papel[70] são expressivos, com economias bilionárias decorrentes da redução de tempos de espera, custos operacionais e maior disponibilidade da infraestrutura portuária, além de impactos positivos sobre a produtividade e a redução de emissões.

A descarbonização da frota marítima é inviável sem uma infraestrutura portuária compatível, o que levou à consolidação do conceito de "portos verdes" (*green ports*). Nesse contexto, os portos passaram a desempenhar papel ativo na redução do uso de combustíveis fósseis e no fornecimento de energia e combustíveis de baixo carbono.

[70] Transformação digital impulsiona a eficiência nos portos brasileiros, do Instituto Brasil Logística – IBL, publicado em 10/04/2025 (https://ibl.org.br/transformacao-digital-impulsiona-a-eficiencia-nos-portos-brasileiros/#:~:text=Resultados%20expressivos,de%20crescimento%20adicional%20em%202024).

As principais iniciativas incluem:

- **Eletrificação de equipamentos portuários**, com substituição de motores a diesel por motores elétricos em empilhadeiras, *transtêineres* e *portêineres*;
- **Integração crescente de fontes renováveis** (solar, eólica, biomassa e hidrelétrica), combinadas com sistemas de armazenamento de energia, como baterias e *flywheels*;
- **Implantação de hubs multicombustíveis** em portos estratégicos, para fornecimento de biocombustíveis, metanol, amônia, hidrogênio e energia elétrica;
- **Corredores verdes**: rotas marítimas específicas entre dois ou mais portos, onde a viabilidade técnica, econômica e regulatória de embarcações de baixa/zero emissão é construída de forma coordenada.
- **Fornecimento de energia em terra** (*Onshore Power Supply – OPS ou shore power*), permitindo que navios atracados desliguem seus motores auxiliares, reduzindo drasticamente emissões locais e ruídos.

Essas ações estão alinhadas à Resolução MEPC.366 (2022) da IMO[71], que reconhece e incentiva o papel dos portos na facilitação da descarbonização do transporte marítimo. Além das soluções técnicas, os portos atuam como instrumentos de política ambiental, por meio de incentivos econômicos a embarcações com melhor desempenho ambiental. A *World Ports Climate Initiative* (WPCI) e a *International Association of Ports and Harbors* (IAPH) instituíram o *Environmental Ship Index* (ESI), que identifica navios com emissões atmosféricas inferiores aos padrões da IMO.

Portos ao redor do mundo utilizam o ESI para conceder descontos tarifários e prioridade de atracação a navios certificados. No Brasil, participam dessa iniciativa o Porto de Itaqui, o Porto do Pecém, o Porto de Paranaguá, o Porto de Santos e o Porto do Açu. O Porto de Santos, por exemplo, concede descontos entre 5% e 15% para navios com pontuação ESI elevada, enquanto o Porto de Suape oferece descontos progressivos de até 60%. Segundo a Autoridade Portuária de Santos, esses incentivos já ultrapassam dezenas de milhões de reais, reforçando o papel dos portos como catalisadores da transição energética.

Também o Porto de Santos já integra a política de corredores verdes. Em novembro de 2025, a Autoridade Portuária de Santos (APS) formalizou acordo com o Porto de Valência (Espanha) para a criação de um corredor verde transatlântico[72], e discussões trilaterais entre Brasil, Noruega e Países Baixos avançam para conectar Santos e Pecém aos portos de *Karmøy e Roterdã*[73]. Essas iniciativas reforçam a relevância de alinhar o planejamento da infraestrutura portuária paulista à trajetória de descarbonização das rotas internacionais que o Estado atende.

Em síntese, a infraestrutura portuária emerge como elemento-chave da transição tecnológica e energética do transporte marítimo, integrando automação, digitalização, eletrificação, fornecimento de combustíveis de baixo carbono e instrumentos econômicos de incentivo ambiental. A consolidação de portos inteligentes e verdes não apenas viabiliza a descarbonização da frota, mas também fortalece a competitividade logística, melhora a relação protocidades e alinha o setor portuário brasileiro às melhores práticas internacionais.

[71] MEPC Resolution.366(79) (adopted on 16 December 2022) Invitation to member states to encourage voluntary cooperation between the port and shipping sectors to contribute to reducing GHG emissions from ships.
[72] Portal BE News (2025). O Porto de Santos e seu corredor verde. Disponível em: https://portalbenews.com.br/opiniao/o-porto-de-santos-e-seu-corredor-verde/. Acesso em: 01/09/2026.
[73] Engine Online (2026). Brazil, Norway and the Netherlands discuss green shipping corridor. Disponível em: https://www.engine.online/news/brazil-norway-and-the-netherlands-discuss-green-shipping-corridor-7ca0. Acesso em: 01/09/2026.

2.2.4 Implicações para cenários futuros

Além dos benefícios ambientais associados à descarbonização do transporte marítimo e da infraestrutura portuária, a adoção de novas tecnologias operacionais, digitais e de facilitação documental tem produzido ganhos operacionais expressivos nos portos brasileiros, com efeitos diretos sobre eficiência logística, capacidade instalada e competitividade sistêmica.

A redução dos tempos de permanência de navios, tanto em espera quanto em operação, a diminuição dos prazos de liberação de cargas e a ampliação da capacidade efetiva dos terminais, sem expansão física imediata, constituem resultados concretos do processo de modernização em curso. Esses ganhos são particularmente relevantes em um contexto de crescimento da demanda e de restrições estruturais de espaço e acesso nos principais complexos portuários.

O caso do Porto de Santos é ilustrativo. Entre 2021 e 2025, o porto registrou crescimento de 27% na movimentação de cargas, mesmo diante de limitações de capacidade em terminais e acessos. Esse desempenho foi acompanhado por reduções de 45% no tempo de permanência de caminhões, 30% no tempo de atracação de navios e aumento de 28% na produtividade operacional, resultados diretamente associados à automação, digitalização e integração de sistemas. O processo de modernização segue em andamento: no início de 2026, o terminal da Santos Brasil incorporou novos portêineres de operação remota, sem operadores embarcados, ampliando a eficiência operacional e reduzindo riscos de acidentes.

Paralelamente à automação física, os sistemas de facilitação e integração do comércio exterior continuam a evoluir. Atualmente, a nacionalização de cargas de importação pela Receita Federal ocorre, em grande parte dos casos, em menos de 24 horas. Ainda assim, a liberação total das cargas depende da atuação coordenada de diversos órgãos anuentes, fazendo com que o prazo médio de liberação permaneça entre 5 e 7 dias. A expectativa de curto prazo é reduzir esse intervalo para menos de 5 dias, o que deve ocorrer nos próximos anos com o aprofundamento da integração digital entre os órgãos envolvidos.

Embora essas iniciativas, somadas às ações de descarbonização, contribuam significativamente para aliviar a pressão sobre a capacidade operacional dos portos paulistas, elas não são suficientes, por si só, para acomodar o crescimento da demanda projetada. Persistem gargalos estruturais relevantes, especialmente nos acessos terrestres e aquaviários, que condicionam a plena materialização dos ganhos tecnológicos.

Tanto o Porto de Santos quanto o Porto de São Sebastião enfrentam desafios nos sistemas de acesso rodoviário, ferroviário e nos canais de navegação. Em Santos, encontram-se em curso obras viárias de conexão ao sistema rodoviário, intervenções na malha ferroviária interna e, no acesso aquaviário, o processo de concessão da operação do canal, que prevê aprofundamento para 17 metros e alargamento, permitindo a passagem simultânea de embarcações. Em São Sebastião, o programa de arrendamento de áreas e terminais, previsto para iniciar em 2026, deverá ampliar de forma relevante a infraestrutura e a capacidade operacional do porto.

Tomando essas ações como garantidas e com base em números verificados em alguns terminais em portos internacionais, pode-se relacionar alguns dos principais ganhos operacionais obtidos pela introdução de novas tecnologias e sistemas nos portos.

- **Movimentação de Cargas:** aumento em portos que adotaram soluções avançadas de IA e IoT;
- **Eficiência de Armazenagem:** ganhos com sistemas automatizados de pátio;
- **Liberação de Cargas:** A adoção de sistemas automatizados resultou em uma melhoria no tempo de liberação de mercadorias;
- **Redução de Custos Operacionais (OPEX):** Redução nos custos diretos de operação;
- **Produtividade geral:** Incremento de produtividade.

Como referência internacional, o Porto de Antuérpia projeta, apenas com investimentos em automação previstos para 2026, um aumento de 5% na capacidade total, sem expansão física significativa.

À luz dessas evidências, e considerando os investimentos em infraestrutura e tecnologia em curso, podem ser delineadas tendências relevantes para os cenários futuros de movimentação de cargas nos portos paulistas:

Tabela 2-2: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modo marítimo e portuário

Vetor tecnológico / organizacional	Escala de impacto	Horizonte temporal*
Automação portuária	Local / regional	Curto a médio prazo (2028-2043)
Digitalização e integração documental (TOS, PCS, Porto Sem Papel, IA/IoT)	Regional / nacional	Curto a médio prazo (2028-2043)
Eletrificação de equipamentos e OPS/shore power	Local / regional	Médio prazo (2033-2043)
Expansão de combustíveis de baixo carbono para navegação	Regional / global	Médio a longo prazo (2033-2050)
Hubs multicombustíveis portuários	Regional / nacional / global	Longo prazo (2043-2050)
Automação e ampliação da capacidade sem expansão física imediata	Local / regional	Curto a médio prazo (2028-2043)
Integração porto-hinterlândia** e melhoria dos acessos	Regional / estadual	Médio a longo prazo (2033-2050)
Incentivos ambientais portuários e exigências regulatórias internacionais	Nacional / global	Médio a longo prazo (2033-2050)

*Nota: * Os horizontes indicam o período provável de adoção comercial relevante e de difusão da tecnologia no modo marítimo, e não sua data de surgimento ou de realização dos primeiros projetos-piloto. Foram considerados os marcos temporais do PLI-SP 2050: curto prazo = até 2033; médio prazo = de 2033 a 2043; longo prazo = de 2043 a 2050; e horizonte pós-PLI = após 2050. Tecnologias classificadas em mais de um horizonte podem apresentar adoção inicial em nichos, frotas cativas ou corredores específicos antes de sua disseminação em maior escala. ** Hinterlândia refere-se à área de influência terrestre de um porto — a região interior conectada a ele por rodovias, ferrovias ou hidrovias, de onde se origina ou para onde se destina a carga movimentada.*

Fonte: Estudos mercadológicos. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Por fim, o potencial de crescimento de São Sebastião e a consolidação de Santos como hub logístico e energético dependerão da combinação entre investimentos físicos, modernização tecnológica e inserção estratégica nas novas cadeias de combustíveis marítimos de baixa emissão. Para o PLI-SP 2050, isso implica incorporar hipóteses diferenciadas para cabotagem, apoio marítimo, apoio portuário e longo curso, articulando maturidade tecnológica, disponibilidade de combustíveis, investimentos em infraestrutura e evolução regulatória internacional.

2.3 Dutoviário

O modo dutoviário ocupa posição singular na infraestrutura logística e energética, por combinar elevada capacidade de movimentação contínua, baixos custos operacionais marginais e elevada confiabilidade no transporte de fluidos energéticos. Diferentemente de outros modais, sua competitividade depende menos de ganhos de velocidade ou flexibilidade operacional e mais da existência de escala, previsibilidade de demanda, estabilidade regulatória e forte coordenação institucional.

A principal vantagem comparativa do modo dutoviário reside em sua capacidade de conectar, de forma estável e contínua, grandes polos de oferta e demanda energética. No entanto, essa vantagem é acompanhada por restrições importantes. Trata-se de um modo com baixa flexibilidade locacional, dependente de elevados investimentos iniciais, forte rigidez de traçado e alta sensibilidade a questões regulatórias e de acesso.

Assim, sua expansão tende a ocorrer apenas quando houver clara justificativa econômica, segurança regulatória e perspectiva de utilização intensiva ao longo do tempo. Em outras palavras, o desafio do modo dutoviário no horizonte do PLI-SP 2050 não é a ruptura tecnológica, mas sim a reconfiguração funcional da rede para atender a uma nova matriz energética.

No contexto paulista, o PEE 2050 e o PAC 2050 tratam a infraestrutura dutoviária como vetor estratégico da transição energética, com foco na expansão da malha, na integração entre produção e consumo de gases renováveis e na criação de condições para que a rede deixe de operar exclusivamente como sistema de transporte de combustíveis fósseis e passe a incorporar biometano e, potencialmente, hidrogênio. Essa perspectiva é coerente com a posição de São Paulo como principal mercado consumidor de gás do país, com presença de infraestrutura relevante como o Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL), o OSBRA e os terminais associados ao sistema paulista, além do projeto do Terminal de Regaseificação de GNL de Santos (TRSP).

No contexto paulista, o PEE 2050 e o PAC 2050 tratam a infraestrutura dutoviária como vetor estratégico da transição energética, distinguindo-se duas frentes principais: dutos de produtos gasosos e dutos de produtos líquidos. No segmento gasoso, o foco está na expansão da malha de gás natural (GN) e seus derivados, e na criação de condições para que a rede deixe de operar exclusivamente como sistema de transporte de combustíveis fósseis, passando a incorporar biometano e, potencialmente, hidrogênio.

Essa perspectiva é coerente com a posição de São Paulo como principal mercado consumidor de gás do país, com infraestrutura relevante como o Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL), o Oleoduto São Paulo-Brasília (OSBRA) e os terminais associados ao sistema paulista, além do projeto do Terminal de Regaseificação de GNL de Santos (TRSP).

No segmento líquido, destaca-se o Sistema Dutoviário Logum, dedicado ao transporte de etanol anidro e hidratado, com cerca de 1.300 km de dutos e 750 km de hidrovia associada, conectando polos produtores em São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul aos centros de distribuição da Região Metropolitana de São Paulo e ao Porto de Santos, com capacidade projetada de até 13 milhões de m³/ano na maturidade do sistema. A expansão recente de 128 km em São Paulo (investimento de R$ 1,2 bilhão) já responde por cerca de 50% do volume de etanol transportado na Região Metropolitana, evidenciando o papel crescente do modo dutoviário na logística de biocombustíveis líquidos, complementando o foco em biometano no segmento gasoso.

2.3.1 Expansão e modernização da infraestrutura

O PEE 2050 destaca que a infraestrutura dutoviária existente em São Paulo constitui base importante para a expansão do uso de gás natural e gases de baixo carbono. No segmento gasoso, o plano menciona a relevância do GASBOL, com expectativa de ampliação de capacidade do gasoduto Cubatão–GASAN em cerca de 27%, reforçando o papel do litoral paulista como porta de entrada e redistribuição de gás.

No segmento líquido, destaca-se o poliduto OSBRA (Oleoduto São Paulo–Brasília), que conecta a Refinaria de Paulínia (Replan) a Brasília, transportando diesel, gasolina, GLP e querosene de aviação. A Transpetro vem ampliando sua capacidade nominal de vazão, de cerca de 9 milhões para 11,17 milhões de m³/ano (+24%), por meio da injeção de redutores de atrito e da

instalação de novas motobombas na Replan[74]. A empresa também estuda a construção de um novo duto para o Mato Grosso, já que os volumes de etanol de milho transportados na região já superam os de derivados de petróleo — evidenciando a crescente relevância dos biocombustíveis líquidos na demanda por infraestrutura dutoviária.

Além da expansão física, o monitoramento mais sofisticado e organização do sistema segundo vocações regionais de produção e consumo é relevante não apenas para elevar segurança e eficiência operacional, mas também para viabilizar a integração futura de novos gases à rede, inclusive em contextos de produção descentralizada. Nesse sentido, o modo dutoviário passa a ser visto menos como simples infraestrutura linear de transporte de fósseis e mais como plataforma energética articuladora entre produção industrial, agroenergia, logística e consumo final.

A principal transformação qualitativa projetada para o modo dutoviário paulista é sua adaptação para integrar biometano e, progressivamente, hidrogênio. O PAC 2050 menciona expressamente a adaptação da rede de gás canalizado existente e de sua expansão futura para comportar percentuais crescentes de hidrogênio. Já o PEE 2050 enfatiza a conexão entre o setor sucroenergético paulista, um dos maiores potenciais produtores de biometano do país, e os centros consumidores de gás.

Esse ponto é particularmente importante no caso de São Paulo. O potencial de produção de biometano no estado na ordem de 6,4 milhões de m³/dia[75], com forte participação das usinas sucroenergéticas, enquanto dados mais recentes do governo estadual e do setor mostram que a capacidade instalada paulista já avançou de forma relevante e continua em expansão. Em dezembro de 2025, o governo paulista indicava produção em torno de 500 mil m³/dia e expectativa de superar 700 mil m³/dia no curto prazo, enquanto agentes do setor projetavam capacidade próxima de 1 milhão de m³/dia em 2027.

Nesse contexto, o modo dutoviário assume papel central como elo entre produção dispersa e centros de consumo. A lógica não é apenas transportar gás, mas estruturar uma rede capaz de viabilizar o escalonamento econômico dos combustíveis de baixo carbono, especialmente em segmentos intensivos em energia, como transporte pesado, indústria e, potencialmente, abastecimento portuário.

2.3.2 Clusters energéticos, hubs e conexão com a produção de biometano

O planejamento recente do setor de gás e biometano no Brasil vem reforçando a ideia de clusters energéticos e hubs de concentração de oferta, nos quais a infraestrutura dutoviária funciona como âncora para múltiplos usos energéticos e para o atendimento de diferentes modais. O Plano Nacional Integrado de Infraestrutura de Gás Natural e Biometano (PNIIGB), da EPE, colocado em consulta pública em setembro de 2025, identificou volumes expressivos de biometano em São Paulo com potencial de destinação além do autoconsumo e avaliou alternativas de concentração de oferta para obter ganhos de escala e maior eficiência de integração à cadeia do gás natural[76].

Nesse estudo, a área adjacente à Estação de Compressão (ECOMP) São Carlos, no município de São Carlos/SP, foi identificada como alternativa particularmente adequada para implantação de

[74] Transpetro. Transpetro ampliará capacidade operacional de oleoduto que liga São Paulo a Brasília. Disponível em: https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/noticias/transpetro-ampliara-capacidade-operacional-de-oleoduto-que-liga-sao-paulo-a-brasilia.htm. Acesso em: 01/09/2026.
[75] FIESP (2026). Biometano pode substituir até 32% do gás natural em São Paulo. Disponível em: https://www.fiesp.com.br/mobile/noticias/?id=305094. Acesso em: 27/07/2026.
[76] EPE (2025). Plano Nacional Integrado das Infraestruturas de Gás Natural e Biometano.

um hub de biometano, em razão da proximidade com a infraestrutura de transporte existente, especialmente o GASBOL. Uma alternativa considerada em estudos anteriores envolve a região de Sertãozinho/SP, com conexão à malha integrada por meio de um gasoduto de aproximadamente 99,5 km entre Sertãozinho e São Carlos, com vazão inicial de até 1 milhão de m³/dia, diâmetro de 10 polegadas e pressão de projeto de 100 kgf/cm².

Figura 2-7: Mapa de localização do hub São Carlos/SP



Fonte: EPE (2025).

Essas alternativas são particularmente relevantes para São Paulo porque reforçam a importância de conectar diretamente a oferta do setor sucroenergético aos grandes centros de consumo, postos de abastecimento, usos industriais e, eventualmente, ao litoral para fins de exportação ou atendimento de mercados sujeitos a exigências crescentes de descarbonização.

Outra possibilidade destacada no PEE 2050 é a utilização do modo dutoviário para funções adicionais além do transporte de combustíveis, especialmente o transporte de CO_2 capturado em processos industriais e de refino até locais de armazenamento geológico seguro. Embora essa aplicação ainda dependa de avanços regulatórios, econômicos e tecnológicos, ela amplia a relevância estratégica da malha dutoviária no contexto da transição energética e da descarbonização industrial. Nesse cenário, o modo dutoviário passa a integrar não apenas cadeias de energia, mas também cadeias de mitigação climática associadas a CCS e, potencialmente, BECCS em rotas ligadas à bioenergia.

A expansão e a reconfiguração do modo dutoviário dependem fortemente de coordenação regulatória e segurança institucional. Temas como o livre acesso à infraestrutura, a interoperabilidade entre redes, a certificação da origem de gases de baixa pegada de carbono e a transparência nos mecanismos de mensuração e contabilização ambiental. Essa dimensão regulatória é particularmente relevante no modo dutoviário, uma vez que a infraestrutura física somente gera pleno valor econômico quando inserida em um ambiente institucional capaz de assegurar previsibilidade, eficiência operacional e adequada sinalização para os investimentos de longo prazo.

Uma alternativa potencial para ampliar o escoamento de combustíveis verdes consiste no aproveitamento de faixas de domínio já existentes para a implantação de uma rede dutoviária orientada ao transporte de gases renováveis, como biometano e, futuramente, hidrogênio. Essa solução poderia reduzir custos de implantação, facilitar o licenciamento e fortalecer a conexão entre polos produtores, especialmente do setor sucroenergético, e centros consumidores ou infraestrutura logística estratégica.

Ao mesmo tempo, a criação de uma rede com maior grau de segregação em relação ao gás natural convencional pode contribuir para preservar a rastreabilidade e os atributos ambientais desses combustíveis, aspecto relevante para sua valorização econômica em mercados associados à descarbonização. A análise detalhada dos requisitos regulatórios e institucionais para essa alternativa será desenvolvida no Produto D-18.

2.3.3 Implicações para cenários futuros

No horizonte do PLI-SP 2050, o modo dutoviário deve ser interpretado como infraestrutura habilitadora da transição energética. Sua principal função prospectiva é viabilizar o aumento da escala e da eficiência no transporte de gases de baixa emissão, especialmente biometano e, em menor grau inicial, misturas crescentes com hidrogênio. No médio prazo, a trajetória mais plausível é a ampliação e modernização da malha existente, com fortalecimento dos hubs de biometano e conexão entre oferta do setor sucroenergético e centros de consumo. No longo prazo, poderão ganhar relevância dutos dedicados a combustíveis verdes e, eventualmente, redes voltadas ao transporte de CO_2.

Do ponto de vista dos impactos setoriais, a expansão dutoviária tende a produzir efeitos mais fortes sobre o modo rodoviário pesado, ao viabilizar maior oferta de biometano para abastecimento de frotas, e pode ter efeitos complementares sobre o hidroviário, em aplicações localizadas como balsas e embarcações adaptadas a gás. Em escala territorial, seus impactos são sobretudo regionais e estaduais, mas com potencial de repercussão nacional na medida em que São Paulo se consolide como hub de gás natural e gases renováveis. Para o PLI-SP 2050, isso implica considerar a infraestrutura dutoviária como elemento articulador entre produção energética descentralizada, logística de combustíveis verdes e competitividade dos modais de transporte.

2.4 Aeroviário

A transição energética da aviação representa um dos maiores desafios tecnológicos e regulatórios entre os modais de transporte, em função das elevadas exigências de densidade energética, confiabilidade operacional e segurança impostas às aeronaves. Diferentemente do transporte terrestre, no qual a eletrificação direta e os biocombustíveis avançam de forma acelerada, a aviação enfrenta limitações físicas que tornam inviável, no curto e médio prazo, a substituição completa dos combustíveis líquidos por sistemas elétricos em aeronaves de médio e longo alcance. Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF – *Sustainable Aviation Fuel)* constituem o principal vetor de descarbonização do setor nas próximas décadas.

2.4.1 Sustainable Aviation Fuel SAF

Apesar de suas vantagens ambientais, a adoção do SAF em larga escala enfrenta desafios econômicos e estruturais relevantes. Atualmente, o custo de produção do SAF é significativamente superior ao do querosene de aviação convencional: a rota HEFA, tecnologia mais madura e responsável por quase toda a produção mundial atual, custa em média o dobro do querosene fóssil, enquanto rotas mais recentes, como o e-SAF, podem custar até 12 vezes

mais[77]. Essa diferença reflete tanto a escala ainda limitada das plantas industriais quanto o custo das matérias-primas e dos processos tecnológicos envolvidos. Essa diferença de custo tem impacto direto sobre o custo operacional das companhias aéreas, para as quais o combustível representa uma parcela expressiva das despesas totais. Assim, a incorporação do SAF tende a pressionar margens e pode afetar decisões de oferta de rotas, sobretudo em mercados regionais ou de baixa densidade.

A evolução da adoção do SAF está fortemente condicionada ao ambiente regulatório e às políticas públicas. Mandatos de mistura obrigatória, incentivos fiscais, subsídios à produção, contratos de longo prazo (*offtake agreements*) e mecanismos de precificação de carbono são instrumentos que vêm sendo utilizados internacionalmente para viabilizar economicamente o SAF e reduzir o diferencial de custo em relação ao combustível fóssil. Nesse sentido, a coordenação regulatória entre países e regiões é um fator crítico, dado o caráter global da aviação e a necessidade de evitar distorções competitivas entre operadores.

No médio e longo prazo, espera-se que a expansão da capacidade produtiva, os ganhos de escala e o amadurecimento tecnológico contribuam para a redução gradual do custo do SAF, ampliando sua participação na matriz energética da aviação. Entretanto, mesmo em cenários otimistas, o SAF deverá coexistir com outras soluções de descarbonização, como melhorias contínuas de eficiência energética, aeronaves híbridas-elétricas para nichos específicos e, em horizonte mais distante, aplicações de hidrogênio de baixo carbono.

Do ponto de vista dos cenários futuros do modo aéreo, o SAF assume papel central não apenas como solução técnica, mas como elemento estruturante da competitividade do setor, não por reduzir custos no curto prazo, já que seu preço permanece superior ao do querosene fóssil, mas porque mandatos de mistura obrigatória (como o *ReFuelEU Aviation*, na União Europeia, e o CORSIA, da ICAO) tornam o acesso ao SAF um requisito regulatório para operar em determinadas rotas e mercados.

Companhias sem contratos de fornecimento assegurados ficam expostas a restrições de acesso a mercados e a custos de conformidade mais voláteis com o avanço da precificação de carbono. Nesse sentido, a capacidade de acesso a combustíveis sustentáveis, a estabilidade regulatória e a previsibilidade de custos associados ao carbono tendem a influenciar decisões de frota, desenho de malha aérea e estratégias de longo prazo das companhias.

2.4.2 Outras tecnologias

O desenvolvimento de aeronaves híbridas-elétricas surge como uma solução promissora para a aviação regional e de curta distância, a exemplo da Heart Aerospace ES-30, aeronave de 30 lugares com alcance 100% elétrico de 200 km e alcance híbrido estendido de 400 km, com certificação prevista para 2031[78]. Essas aeronaves combinam sistemas de propulsão elétrica com motores convencionais, permitindo ganhos de eficiência energética, redução de emissões locais e diminuição de ruído, especialmente em operações de aproximação e decolagem. Seu potencial impacto é mais significativo em rotas regionais, onde distâncias menores e frequências elevadas favorecem a adoção desse tipo de tecnologia.

[77] IATA – International Air Transport Association (2025). SAF Production Growth Rate is Slowing Down, Essential to Correct Course Ahead of e-SAF Mandates. Disponível em: https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-12-09-04/. Acesso em: 01/07/2026.
[78] Heart Aerospace (2026). ES-30. Disponível em: https://www.heartaerospace.com/es-30. Acesso em: 01/09/2026.

Contudo, sua viabilidade econômica e operacional depende da maturidade tecnológica, da certificação regulatória e da compatibilidade com os modelos de negócio das companhias aéreas regionais.

No horizonte de mais longo prazo, o hidrogênio de baixo carbono desponta como uma alternativa disruptiva para a aviação, especialmente para voos de curto e médio alcance. Seja por meio de células a combustível ou da combustão direta em motores adaptados, o hidrogênio apresenta potencial para eliminar emissões diretas de CO_2 durante a operação. Entretanto, sua adoção enfrenta desafios técnicos relevantes, como densidade energética volumétrica, armazenamento a bordo, segurança operacional e adaptação das aeronaves.

O custo do hidrogênio de baixo carbono e a logística necessária para seu transporte e armazenamento, que exige infraestrutura criogênica a -253°C, também constituem barreiras relevantes: atualmente, o hidrogênio verde custa cerca de US$ 6/kg, podendo tornar seu uso na aviação mais caro que o próprio SAF no curto e médio prazo, com paridade de custos projetada apenas para horizontes mais distantes, condicionada à redução do custo da eletrólise e da eletricidade renovável[79]. Além disso, a viabilidade ambiental do hidrogênio está condicionada à sua produção a partir de fontes de baixo carbono, o que implica forte dependência de políticas energéticas mais amplas.

2.4.3 Ganhos de eficiência tecnológica

Os ganhos contínuos de eficiência tecnológica constituem um vetor estrutural para a sustentabilidade econômica e ambiental do modo aéreo, atuando de forma complementar às estratégias de transição energética baseadas em novos combustíveis. Historicamente, a aviação tem apresentado avanços incrementais e cumulativos em eficiência energética, resultantes da evolução de motores, aerodinâmica, materiais e sistemas embarcados. Esses avanços, embora individualmente graduais, produzem efeitos significativos quando considerados ao longo do ciclo de vida das aeronaves e da operação das frotas.

No campo da propulsão, o desenvolvimento de motores aeronáuticos tem sido orientado pela redução do consumo específico de combustível, aumento da taxa de diluição (*bypass ratio*), melhoria dos materiais de alta temperatura e otimização dos ciclos termodinâmicos. Motores de nova geração incorporam compressores e turbinas mais eficientes, sistemas de controle digital avançados e materiais cerâmicos e metálicos de elevada resistência térmica, permitindo operar em condições mais severas com maior eficiência. Esses avanços resultam não apenas em menor consumo de combustível, mas também em redução de emissões e de níveis de ruído.

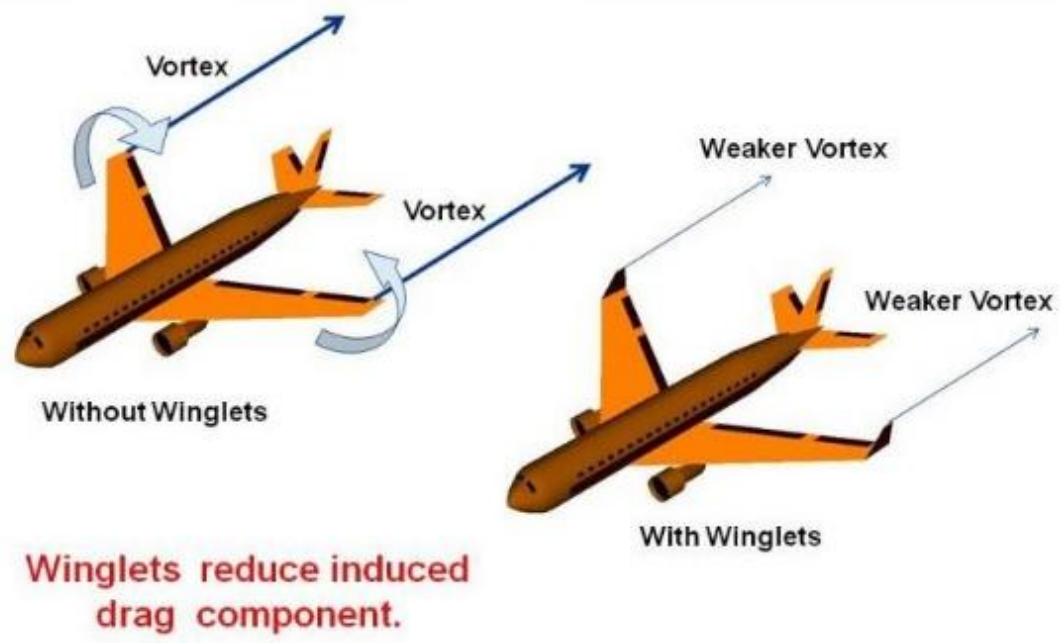
Adicionalmente, observa-se uma tendência crescente de integração entre motor e aeronave, com projetos que buscam otimizar o desempenho do conjunto propulsivo em interação com a fuselagem e as asas. Conceitos como motores de ultra alta taxa de diluição e arquiteturas abertas (open rotor) têm sido estudados como alternativas para ganhos adicionais de eficiência, especialmente em aeronaves de médio alcance, ainda que enfrentem desafios técnicos, regulatórios e de aceitação operacional.

A evolução aerodinâmica das aeronaves permanece como outro pilar fundamental dos ganhos de eficiência. O aprimoramento do desenho das asas, a adoção de *winglets* avançados, o controle de fluxo laminar e a redução de arrasto parasita contribuem de forma direta para a diminuição do consumo energético por unidade de distância transportada. Tecnologias de aerodinâmica

[79] IATA. Hydrogen for aviation: A future decarbonization solution for air travel?. Disponível em: https://www.iata.org/globalassets/iata/publications/sustainability/h2-for-aviation-facts.pdf. Acesso em: 01/09/2026.

ativa e superfícies adaptativas, embora ainda em estágios iniciais de aplicação comercial, indicam potencial adicional para otimização do desempenho em diferentes fases do voo.

Figura 2-8: Função de winglet para redução de arrasto



Fonte: Calgary Youth Science Fair

O uso crescente de materiais avançados, como compósitos de fibra de carbono e ligas metálicas de alta performance, também desempenha papel central na eficiência das aeronaves. A redução de peso estrutural, associada ao aumento da resistência mecânica e à diminuição de necessidades de manutenção, permite ganhos diretos no consumo de combustível e na confiabilidade operacional. Esses materiais contribuem ainda para maior flexibilidade no projeto aerodinâmico, viabilizando geometrias mais eficientes.

No âmbito dos sistemas embarcados, a digitalização e a integração de aviônicos avançados ampliam a eficiência operacional das aeronaves. Sistemas de gerenciamento de voo mais sofisticados, aliados a sensores e algoritmos de otimização, permitem trajetórias mais eficientes, melhor gestão de energia e redução de consumo durante todas as fases do voo. A integração com sistemas de tráfego aéreo e meteorologia em tempo real potencializa esses ganhos, ao reduzir desvios, tempos de espera e ineficiências operacionais.

A manutenção baseada em condição e preditiva, viabilizada por sensores, coleta massiva de dados e análise por inteligência artificial, representa outro vetor relevante de eficiência. Ao substituir modelos tradicionais de manutenção programada por intervenções baseadas no estado real dos componentes, é possível reduzir indisponibilidades, prolongar a vida útil de sistemas críticos e minimizar custos operacionais indiretos. Esses ganhos afetam positivamente a eficiência econômica do modo, sem comprometer os níveis de segurança.

Do ponto de vista ambiental, os ganhos de eficiência tecnológica têm impacto direto na redução de emissões absolutas e específicas, mesmo em cenários de crescimento da demanda. Embora não sejam suficientes, isoladamente, para atingir metas de neutralidade climática de longo prazo, esses avanços desempenham papel essencial na mitigação das emissões durante o período de transição para combustíveis e arquiteturas de propulsão de baixo carbono.

Nos cenários futuros do modo aéreo, a velocidade de incorporação dessas tecnologias dependerá de fatores como ciclos de renovação de frota, custos de capital, certificação regulatória e

capacidade financeira dos operadores. Aeronaves mais eficientes tendem a apresentar vantagens competitivas claras, influenciando decisões de frota, desenho de malha aérea e viabilidade de rotas, especialmente em mercados sensíveis a custos, como a aviação regional.

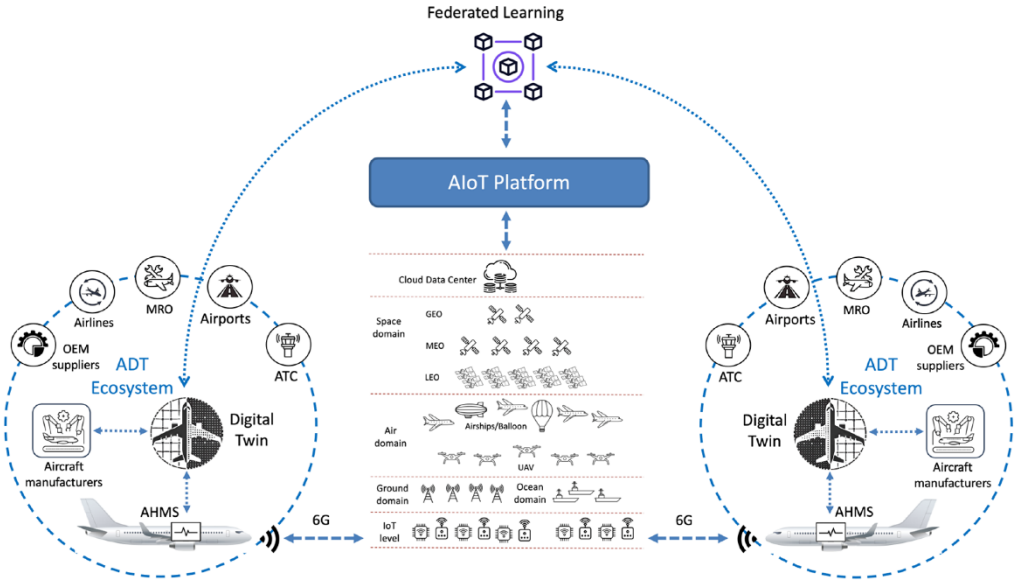
Assim, os ganhos de eficiência tecnológica devem ser compreendidos como um elemento estruturante e transversal dos cenários futuros da aviação, atuando em sinergia com a transição energética, a digitalização das operações e a evolução dos modelos de serviço, e contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental do modo aéreo no longo prazo.

2.4.4 Aplicação de inteligência artificial no setor aeroviário

A digitalização e a automação das operações aéreas constituem um dos vetores mais relevantes de transformação estrutural do modo aéreo, com impactos diretos sobre eficiência operacional, custos, confiabilidade, segurança e sustentabilidade ambiental. Diferentemente de inovações restritas ao desempenho das aeronaves, esses processos atuam de forma transversal sobre toda a cadeia operacional do transporte aéreo, abrangendo o planejamento da malha, a execução e o monitoramento dos voos, o controle operacional, a manutenção das frotas e a logística de cargas.

No contexto dos cenários futuros, a digitalização não se limita à informatização de processos existentes, mas envolve a integração sistêmica de dados, o uso intensivo de inteligência artificial, a automação de decisões operacionais e a crescente conectividade entre aeronaves, operadores, sistemas de controle de tráfego aéreo e agentes logísticos.

Figura 2-9: Digital Twin para Gestão do Ciclo de Vida de Aeronaves



Fonte: Kabashkin (2024) - Digital Twin Framework for Aircraft Lifecycle Management Based on Data-Driven Models[80].

O planejamento e a gestão da malha aérea vêm sendo profundamente transformados por ferramentas digitais avançadas capazes de processar grandes volumes de dados históricos e informações em tempo real. Algoritmos de otimização e modelos preditivos permitem uma

[80] https://www.mdpi.com/2227-7390/12/19/2979

alocação mais eficiente da frota, o ajuste dinâmico de frequências e horários, bem como a redução de tempos improdutivos e do consumo de combustível. Esses sistemas aumentam a resiliência da malha aérea frente a variações de demanda, condições meteorológicas adversas e restrições operacionais, contribuindo para maior eficiência econômica e operacional do modo.

Paralelamente, os centros de controle operacional evoluem para ambientes altamente automatizados e orientados por dados em tempo real. A integração de informações relativas a voos, manutenção, tripulações, meteorologia e tráfego aéreo permite decisões mais rápidas e precisas, reduzindo atrasos, cancelamentos e os custos associados a irregularidades operacionais. A automação de rotinas operacionais contribui ainda para a liberação de recursos humanos para atividades de maior valor agregado, ao mesmo tempo em que aumenta a consistência, a previsibilidade e a confiabilidade das operações.

A integração digital com os sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo constitui outro elemento central desse processo. A transição para operações baseadas em trajetórias, o compartilhamento de dados em tempo real e a maior automação do controle de tráfego possibilitam a redução de separações excessivas entre aeronaves, a adoção de trajetórias mais diretas e a diminuição de tempos de espera em voo e em solo. Esses ganhos sistêmicos são particularmente relevantes em regiões com elevada densidade de tráfego ou restrições operacionais, resultando em aumentos de capacidade, maior eficiência energética e redução das emissões associadas a ineficiências operacionais.

No campo da manutenção, a digitalização representa uma mudança estrutural no modelo de gestão técnica das frotas. A utilização de sensores embarcados, sistemas de monitoramento da condição dos equipamentos e análise de dados baseada em inteligência artificial permite a transição de modelos de manutenção predominantemente programada para abordagens baseadas em condição e manutenção preditiva. Essa transformação reduz falhas não planejadas, aumenta a disponibilidade das aeronaves, otimiza estoques de peças e contribui para a redução de custos ao longo do ciclo de vida dos ativos, preservando os elevados padrões de segurança exigidos na aviação.

No segmento de carga aérea, a digitalização viabiliza ganhos relevantes de rastreabilidade, transparência e integração com cadeias logísticas multimodais. Plataformas digitais permitem o rastreamento em tempo real das cargas, a gestão eletrônica de documentos, a otimização do uso da capacidade e a integração com operadores terrestres e marítimos. Esses avanços são essenciais para atender cadeias logísticas sensíveis ao tempo, como e-commerce, produtos farmacêuticos e cargas de alto valor agregado, reforçando a competitividade do modo aéreo nesses segmentos.

Em termos prospectivos, a digitalização e a automação das operações aéreas configuram um vetor transversal de transformação, com efeitos cumulativos e mensuráveis sobre eficiência operacional, custos, emissões e qualidade do serviço. Estudos da EUROCONTROL[81] indicam que a rede europeia de gerenciamento de tráfego aéreo (ATM) opera atualmente com um excesso de consumo de combustível de 8,6% a 11,2% em relação à rota mais eficiente possível para cada voo[81], e uma revisão do IPCC estima que melhorias em ATM e procedimentos operacionais podem reduzir o consumo de combustível da aviação entre 8% e 18%, com a maior parte desse ganho (6 a 12 pontos percentuais) atribuível especificamente a melhorias de ATM[82]. A CANSO (*Civil Air Navigation Services Organisation*) estima que o sistema global de ATM já opera com

[81] EUROCONTROL (2020). Environmental Assessment: European ATM Network Fuel Inefficiency Study. Disponível em: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-12/eurocontrol-european-atm-network-fuel-inefficiency-study.pdf. Acesso em: 01/09/2026.

[82] IPCC, apud ScienceDirect Topics. Eurocontrol — an overview. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/eurocontrol. Acesso em: 01/09/2026.

eficiência de combustível entre 92% e 94%, com meta aspiracional de 95% a 98% até 2050, o que indica que o potencial de ganho adicional, embora relevante, é finito e decrescente ao longo do tempo.

Do ponto de vista da manutenção, estudos da *National Business Aviation Association* (NBAA) mostram que a manutenção preditiva já reduz em 35% a 40% os eventos de manutenção não programada, elevando a confiabilidade de despacho de 97,5% para 99,2% em frotas com monitoramento abrangente[83]. Pesquisas sobre manutenção preditiva baseada em inteligência artificial indicam reduções adicionais de 12% a 18% nos custos de manutenção e de 15% a 20% no tempo de indisponibilidade não planejada da frota[84].

No transporte aéreo de cargas, a adoção do e-AWB (*Electronic Air Waybill*) pela IATA, hoje presente em mais de 80% das rotas comerciais globais, superando 90% em alguns corredores, já demonstra reduções médias de até 24 horas no tempo de processamento por embarque e de 50% nos erros documentais[85], validando empiricamente o potencial de ganhos de até um dia no ciclo administrativo e operacional da carga em corredores maduros.

Do ponto de vista ambiental, os ganhos operacionais associados à digitalização e à automação, embora não substituam a transição energética baseada em combustíveis sustentáveis, desempenham papel relevante na mitigação de emissões no curto e médio prazo, sobretudo em cenários de crescimento da demanda.

Em síntese, os cenários prospectivos indicam que a digitalização e a automação das operações aéreas atuam como um habilitador estrutural dos demais vetores de transformação do modo aéreo. Os ganhos em pontualidade, redução de disrupções e custos indiretos, discutidos na Tabela 2-3, decorrem primariamente da combinação desses três vetores mensuráveis, eficiência de ATM, manutenção preditiva e digitalização de carga, e devem ser interpretados como projeção qualitativa derivada desses fundamentos, não como estimativas com validação empírica independente.

Tabela 2-3: Impactos prospectivos por dimensão operacional

Dimensão	2026–2030	2030–2040	2040–2050
Consumo de combustível via eficiência de ATM/digitalização	Redução inicial dentro da faixa de ineficiência hoje estimada (8,6%–11,2%)	Redução consolidada, aproximando-se do limite prático do sistema ATM (~95%)	Estabilização próxima do teto de eficiência projetado (95%–98%)
Manutenção e disponibilidade de frota	Transição inicial para manutenção preditiva; 12%–18% de redução de custo, 15%–20% de redução de indisponibilidade	Consolidação; redução de até 35%–40% em eventos não programados, confiabilidade de despacho 97,5%→99,2%	Manutenção preditiva plenamente integrada; ganhos marginais

[83] NBAA (2026). How Trend Analysis Informs Predictive Aircraft Maintenance. Disponível em: https://nbaa.org/aircraft-operations/safety/safety-through-innovation/how-trend-analysis-informs-predictive-aircraft-maintenance/. Acesso em: 01/09/2026.
[84] MoghadasNian, SeyyedAbdolHojjat (2025). AI-Powered Predictive Maintenance in Aviation Operations. Disponível em: https://ssrn.com/abstract=6117408. Acesso em: 01/09/2026.
[85] Private Jets Connect (2026). Air Freight Digitalization. Disponível em: https://private-jets-connect.com/en/cargo/guide/digitalisation-fret-aerien/. Acesso em: 01/09/2026.

Dimensão	2026–2030	2030–2040	2040–2050
Carga aérea e processos logísticos	Digitalização em expansão (e-AWB já >80% das rotas); redução média de até 24h por embarque	Digitalização ampla e integração multimodal; redução de até 1 dia em corredores maduros	Processos totalmente digitais; ganhos marginais
Pontualidade, disrupções e custos indiretos	Melhoria qualitativa gradual, decorrente da combinação dos vetores acima	Melhoria qualitativa consolidada	Estabilização qualitativa em patamar elevado

Fonte: Elaboração Consórcio Concremat – Transplan.

2.4.5 Aplicações de novos modelos de negócios no modo aeroviário

A evolução tecnológica, combinada a mudanças regulatórias, ambientais e no perfil da demanda, vem ampliando o escopo tradicional do modal aéreo, dando origem a novos serviços e modelos de transporte que alteram a lógica de oferta, capilaridade e integração do setor. Esses novos modelos não substituem a aviação convencional, mas atuam de forma complementar, ocupando nichos específicos de mercado e redefinindo o papel do transporte aéreo na mobilidade de pessoas e mercadorias.

Entre os vetores mais relevantes destacam-se a mobilidade aérea urbana e regional por eVTO*L*, a expansão da aviação regional de curta distância com aeronaves de menor porte e a consolidação de serviços aéreos sob demanda, tanto para passageiros quanto para cargas. Em conjunto, esses modelos tendem a aumentar a granularidade da oferta aérea, aproximando o modo de padrões mais flexíveis e responsivos à demanda.

Mobilidade aérea urbana e regional (eVTOL)

Os eVTOLs (*Electric Vertical Take-Off and Landing*) representam uma das inovações mais disruptivas no transporte aéreo, ao viabilizar operações de curta distância com menor ruído, emissões locais reduzidas e elevada flexibilidade operacional. Inicialmente concebidos para mobilidade aérea urbana, esses veículos tendem a expandir seu escopo para conectividade regional de curta distância, ligando centros urbanos, polos econômicos, aeroportos e regiões metropolitanas.

Figura 2-10: Modelo de eVtol.



Fonte: Eve Air Mobility (2020)[86].

Do ponto de vista operacional, os eVTOLs introduzem um modelo baseado em alta frequência de viagens, baixa capacidade por veículo, tempos reduzidos de acesso e espera e forte integração com sistemas terrestres de mobilidade. Uma vantagem relevante desse tipo de tecnologia é que sua área de pouso e decolagem é, em grande medida, similar à dos helicópteros. Assim, adaptações relativamente simples para adequação ao porte e aos requisitos regulamentares dos eVTOLs podem permitir o aproveitamento de parte da infraestrutura já existente, como heliportos e helipontos, reduzindo barreiras iniciais de implantação e acelerando a entrada em operação em determinadas localidades.

Apesar desse potencial, a difusão dos eVTOLs depende de um conjunto amplo de condicionantes. Entre eles, destacam-se a maturidade tecnológica das aeronaves, os processos de certificação aeronáutica, a aceitação social, a consolidação de modelos de negócio economicamente viáveis e a evolução da regulação do espaço aéreo de baixa altitude.

Soma-se a isso a necessidade de infraestrutura energética compatível com operações intensivas, especialmente no que se refere à disponibilidade de energia elétrica para carregamento rápido das baterias. Esse aspecto é central para garantir elevada utilização das aeronaves, tempos curtos de solo e regularidade da operação, exigindo planejamento integrado entre mobilidade, infraestrutura aeroportuária e sistema elétrico.

Paralelamente, a aviação regional de curta distância surge como um dos principais vetores de expansão do modo aéreo nos cenários futuros, impulsionada por aeronaves mais eficientes, de menor porte e potencialmente híbridas-elétricas. Esse modelo permite ampliar a conectividade entre cidades médias, reduzir a dependência de grandes hubs e aumentar a frequência de voos em rotas de menor densidade, contribuindo para uma rede de transporte mais capilarizada e responsiva às necessidades territoriais.

A viabilidade desse segmento está fortemente associada à redução de custos operacionais, à existência de políticas públicas de estímulo à conectividade regional e à integração com outros modais de transporte. Em cenários prospectivos, a aviação regional tende a desempenhar papel

[86] https://www.eveairmobility.com/eve-the-first-spin-off-from-embraerx-is-launched-to-shape-the-future-of-urban-air-mobility.

estratégico na coesão territorial e no atendimento a demandas de mobilidade não plenamente supridas pelo transporte terrestre, especialmente em deslocamentos com restrições de tempo, acessibilidade ou cobertura logística. Ressalta-se, no entanto, que o impacto desta nova forma de transporte é local e com pouco impacto na matriz de transportes estadual.

No caso específico dos eVTOLs, além dos desafios tecnológicos e econômicos, sua consolidação como alternativa de transporte dependerá também de ajustes institucionais e regulatórios. As mudanças regulatórias necessárias para viabilizar esse tipo de operação, incluindo certificação, regras operacionais, gestão do espaço aéreo e requisitos de infraestrutura, serão discutidas de forma mais detalhada no Produto D18.

Serviços aéreos sob demanda e modelos flexíveis

A digitalização e o uso de plataformas tecnológicas viabilizam a expansão de serviços aéreos sob demanda, incluindo táxi-aéreo, fretamento dinâmico e modelos híbridos entre aviação regular e charter. Esses serviços caracterizam-se por maior flexibilidade de horários e rotas, resposta rápida a demandas específicas, customização do serviço conforme o perfil do usuário.

No transporte de passageiros, esses modelos atendem nichos corporativos, regionais e de alta sensibilidade ao tempo. No transporte de cargas, ampliam a oferta para remessas urgentes, de alto valor ou em regiões de difícil acesso.

Novos modelos no transporte aéreo de cargas

No segmento de cargas, os novos modelos de transporte aéreo incluem expansão da carga aérea expressa, impulsionada pelo e-commerce, uso de aeronaves menores e dedicadas em rotas regionais, aplicação de drones para cargas leves, emergenciais ou de última milha. Esses modelos aumentam a capilaridade da carga aérea, reforçam sua integração com cadeias logísticas multimodais e ampliam a competitividade do modo em mercados sensíveis ao tempo.

Figura 2-11: Drones para Carga



Fonte: More than Shipping[87].

Os novos serviços e modelos de transporte aéreo tendem a desempenhar papel crescente nos cenários futuros do modo aéreo, atuando como elementos complementares à aviação tradicional

[87] https://www.morethanshipping.com/cargo-drones-the-future-of-shipping

e ampliando sua capilaridade, flexibilidade e integração com outros modais. Diferentemente dos ciclos históricos de expansão baseados principalmente em grandes hubs e aeronaves de alta capacidade, esses modelos introduzem uma lógica mais granular de oferta, orientada por frequência, conectividade regional e redução do tempo total de deslocamento porta-a-porta.

No horizonte 2026 e 2035, a consolidação inicial desses novos serviços deve ocorrer de forma seletiva, concentrada em mercados-piloto, corredores regionais específicos e áreas metropolitanas com elevada densidade econômica. Os eVTOLs tendem a iniciar operações em nichos bem definidos, como ligações aeroporto–centro urbano e conexões regionais de curta distância, com impacto ainda limitado sobre o volume total de transporte, mas relevante do ponto de vista demonstrativo e regulatório. Em paralelo, a aviação regional de curta distância, apoiada por aeronaves menores e mais eficientes, tende a expandir gradualmente sua participação na malha aérea, especialmente em regiões com lacunas de conectividade terrestre.

Entre 2035 e 2045, espera-se uma fase de maturidade operacional desses modelos, com maior padronização regulatória, redução de custos tecnológicos e integração mais ampla com sistemas de mobilidade terrestre e logística. Nesse período, os novos serviços passam a gerar impactos mais perceptíveis sobre a organização da malha aérea, contribuindo para a descentralização parcial de hubs, aumento da frequência em rotas regionais e diversificação da oferta de serviços aéreos. O transporte aéreo sob demanda tende a se consolidar como solução flexível para passageiros e cargas sensíveis ao tempo, reforçando a competitividade do modo aéreo em mercados específicos.

No horizonte 2045 e 2050, os novos modelos de transporte aéreo tendem a estar plenamente integrados ao ecossistema de mobilidade e logística, operando como componentes estruturais, ainda que não dominantes, do sistema de transportes. Os eVTOLs e a aviação regional passam a atuar como extensões naturais da malha aérea convencional, enquanto serviços sob demanda e soluções dedicadas de carga aérea ampliam a responsividade do setor às variações de demanda. Nesse estágio, os ganhos adicionais tornam-se mais incrementais, com o foco deslocando-se da expansão para a otimização e integração sistêmica.

Do ponto de vista operacional, os cenários prospectivos indicam que esses novos serviços:

- Aumentam a frequência e a capilaridade da oferta aérea sem crescimento proporcional de capacidade por aeronave;
- Reduzem o tempo total de deslocamento porta-a-porta, especialmente em distâncias curtas e médias;
- Ampliam a resiliência da malha aérea, ao diversificar pontos de origem e destino;
- Reforçam a integração multimodal, conectando o transporte aéreo a sistemas terrestres e logísticos digitais;
- Criam nichos de mercado para passageiros e cargas de alto valor agregado ou alta sensibilidade ao tempo.

Em síntese, os novos serviços e modelos de transporte aéreo configuram um vetor de transformação funcional, mais do que volumétrica, do modal aéreo. Seu impacto prospectivo reside menos na substituição da aviação tradicional e mais na redefinição do papel do transporte aéreo dentro de um sistema de mobilidade e logística mais integrado, flexível e orientado à eficiência temporal. Ressalta-se, no entanto, que o impacto desta nova forma de transporte é local e com pouco impacto na matriz de transportes estadual. No contexto do D-11, esses modelos são fundamentais para compreender como o modal aéreo pode adaptar-se às demandas futuras sem depender exclusivamente da expansão de infraestrutura física.

2.4.6 Implicações para cenários futuros

A análise integrada dos vetores tecnológicos, operacionais, regulatórios, de mercado e de custos desenvolvidos ao longo do D-11 indica que o papel dos aeroportos tende a se transformar de forma significativa no horizonte 2026–2050. Os aeroportos deixam de ser avaliados apenas como ativos físicos associados à capacidade de pista e terminal, passando a ser compreendidos como plataformas operacionais, energéticas, digitais e logísticas, cuja relevância dependerá de sua capacidade de adaptação aos novos padrões do transporte aéreo.

Essa transformação ocorre de maneira heterogênea, variando conforme o perfil do aeroporto (hub, regional, cargueiro, urbano), o ritmo de adoção tecnológica, o ambiente regulatório e a dinâmica da demanda. Para fins de planejamento e avaliação prospectiva, os cenários futuros dos aeroportos podem ser analisados a partir de três trajetórias principais: Conservadora, Intermediária (Referência) e transformacional.

Tabela 2-4 - Avaliação qualitativa dos cenários futuros dos aeroportos (2026–2050)

Dimensão Analisada	Cenário Conservador	Cenário de Referência	Cenário Transformacional
Papel do aeroporto	Infraestrutura operacional tradicional, foco em capacidade física	Plataforma operacional integrada	Hub multimodal, energético e digital
Integração com a aviação regional e novos serviços	Limitada e pontual	Integração progressiva com aviação regional e novos modelos	Integração estrutural com eVTOLs, regional e carga expressa
Digitalização e automação	Adoção parcial, focada em eficiência incremental	Digitalização ampla das operações aeroportuárias	Automação avançada e operação orientada por dados em tempo real
Sustentabilidade e transição energética	Cumprimento mínimo de requisitos regulatórios	Adoção gradual de soluções energéticas e ambientais	Aeroporto como nó energético (SAF, eletrificação, gestão de carbono)
Resiliência operacional	Vulnerável a choques de demanda e custos	Resiliência moderada via gestão operacional	Alta resiliência por diversificação de serviços e conectividade
Integração logística (cargas)	Atuação limitada e dependente de operadores	Expansão do papel logístico regional	Consolidação como nó logístico estratégico
Competitividade no sistema de transportes	Estável, porém pressionada	Competitiva em nichos regionais e logísticos	Alta competitividade sistêmica e multifuncional

Fonte: ICAO. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

- No cenário conservador, os aeroportos preservam sua função básica, mas tornam-se mais expostos a riscos de obsolescência relativa, especialmente frente a mudanças na demanda, custos e regulação ambiental.
- No cenário de referência, os aeroportos adaptam-se gradualmente, mantendo relevância operacional e regional, com ganhos incrementais de eficiência e sustentabilidade.

- No cenário transformacional, os aeroportos assumem papel ativo na reorganização do sistema de transportes, atuando como plataformas integradas de mobilidade, energia e logística.

Tabela 2-5: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modal aeroviário

Indicador	Cenário Conservador	Cenário de Referência	Cenário Transformacional
Variação da demanda total (passageiros + cargas)	+20% a +40%	+40% a +70%	+70% a +120%
Participação da aviação regional e novos serviços	< 10% dos movimentos	10% a 25% dos movimentos	25% a 40% dos movimentos
Ganho de eficiência operacional aeroportuária	5% a 10%	10% a 25%	25% a 40%
Redução relativa de emissões por movimento	5% a 10%	15% a 30%	30% a 50%
Diversificação de receitas não aeronáuticas	Baixa (≤10%)	Média (10%–25%)	Alta (≥25%)
Integração logística e carga expressa	Pontual	Relevante em corredores específicos	Estrutural e estratégica
Capacidade de absorção de choques (demanda/custos)	Baixa	Média	Alta

Fonte: ICAO, estudos mercadológicos. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Observação metodológica: os valores apresentados representam ordens de grandeza prospectivas, úteis para planejamento estratégico e comparação entre cenários, não projeções determinísticas.

No horizonte 2026–2050, os aeroportos que permanecerem ancorados exclusivamente em sua função tradicional de infraestrutura física tendem a enfrentar pressões crescentes de custo, regulação e mudanças no perfil da demanda. Por outro lado, aeroportos capazes de se posicionar como plataformas integradas, incorporando digitalização, novos serviços, sustentabilidade e integração logística, apresentam maior resiliência e potencial de geração de valor.

Assim, a avaliação prospectiva indica que o desempenho futuro dos aeroportos será menos determinado pelo crescimento absoluto da demanda e mais pela capacidade de adaptação estratégica aos vetores analisados no Produto D-11, constituindo elemento central para a competitividade do sistema de transportes ao longo das próximas décadas.

2.5 Ferroviário

O transporte ferroviário desempenha papel estratégico no sistema logístico brasileiro, especialmente na movimentação de cargas de grande volume e baixo valor unitário, como commodities agrícolas e minerais, apresentando elevado potencial para a redução de custos logísticos e para a mitigação de impactos ambientais. Apesar de seu desenvolvimento inicial promissor, a trajetória histórica do setor ferroviário no Brasil foi marcada por um processo de perda relativa de participação, associado à priorização de políticas públicas voltadas à expansão do transporte rodoviário e ao fortalecimento da indústria automobilística. Esse processo resultou

em uma malha ferroviária fragmentada, com elevados níveis de obsolescência e carências significativas de manutenção e modernização.

No contexto atual, a modernização do transporte ferroviário assume papel central nas estratégias de transição energética e de descarbonização do setor de transportes. A adoção de tecnologias mais eficientes e menos intensivas em carbono, como a eletrificação da tração, o uso de biocombustíveis e a incorporação de sistemas avançados de controle e gestão operacional, constitui um dos principais caminhos para reduzir emissões de gases de efeito estufa, aumentar a eficiência energética e melhorar o desempenho ambiental do modal. Essas soluções permitem, adicionalmente, ganhos operacionais relevantes, como maior confiabilidade, redução de custos ao longo do ciclo de vida dos ativos e melhoria da segurança.

No contexto atual, a modernização do transporte ferroviário assume papel central nas estratégias de transição energética e de descarbonização do setor de transportes. Cabe destacar que a própria expansão da participação do modo ferroviário na matriz de transportes já constitui, por si só, parte da transição energética: por ser cerca de seis vezes mais eficiente energeticamente por tonelada-quilômetro do que o transporte rodoviário, e emitir 85% menos gases de efeito estufa por unidade de carga transportada[88], o deslocamento de cargas do rodoviário para o ferroviário reduz o consumo energético e as emissões do sistema de transportes como um todo, independentemente da fonte de energia utilizada pela locomotiva.

Complementarmente, a substituição do diesel na tração ferroviária não deve ser vista como a adoção de uma solução única, mas como um processo de diversificação da matriz energética do modal, combinando eletrificação da tração, uso de biocombustíveis e incorporação de sistemas avançados de controle e gestão operacional, caminhos que, em conjunto, constituem os principais vetores para reduzir emissões de gases de efeito estufa, aumentar a eficiência energética e melhorar o desempenho ambiental do modo.

2.5.1 Eletrificação

A transição energética no setor ferroviário pode ocorrer por diferentes caminhos tecnológicos, que variam conforme as características da malha, o perfil da operação e as restrições institucionais e ambientais. A eletrificação convencional por meio de catenárias aéreas continua sendo a solução mais madura e eficiente em termos energéticos, especialmente em corredores com elevada densidade de tráfego e operação contínua. Esses sistemas permitem o fornecimento direto de energia elétrica às locomotivas e carros motores (passageiros), viabilizando altas potências, maior confiabilidade operacional e significativa redução de emissões ao longo do ciclo de vida, sobretudo quando associados a uma matriz elétrica de baixo carbono.

[88] ANTF — Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. Por que o Brasil vai bem de Trem. Disponível em: https://www.antf.org.br/por-que-o-brasil-vai-bem-de-trem/. Acesso em: 01/09/2026.

Figura 2-12: Catenária Aérea no transporte ferroviário



Fonte: CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (acesso em junho de 2026).

Em trechos onde a implantação de infraestrutura aérea apresenta restrições técnicas, econômicas ou ambientais, ganham relevância soluções alternativas de eletrificação parcial ou indireta. Entre elas, destacam-se as locomotivas equipadas com baterias de íon-lítio, que permitem a operação elétrica em segmentos específicos, como manobras em pátios ferroviários, acessos urbanos e trechos curtos, podendo ser recarregadas por frenagem regenerativa ou em estações dedicadas. Essas soluções são particularmente adequadas para reduzir emissões locais e ruído em áreas sensíveis, ainda que apresentem limitações de autonomia para operações de longa distância.

Uma alternativa em desenvolvimento é o uso de hidrogênio em células a combustível, que gera eletricidade a bordo da locomotiva, permitindo operação com emissões diretas nulas de carbono e baixo nível de ruído. Essa tecnologia já vem sendo adotada ou testada em países como Alemanha, França, Reino Unido, Japão e Estados Unidos, especialmente em linhas não eletrificadas, como substituto direto da tração diesel. No contexto brasileiro, essa solução pode ser relevante para corredores específicos, desde que acompanhada da implantação de infraestrutura de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio de baixo carbono.

O avanço da eletrificação ferroviária também está associado à incorporação de inovações nos sistemas de tração e controle. Motores com rotor de ímã permanente, por exemplo, oferecem ganhos adicionais de eficiência energética e redução de perdas. Ao mesmo tempo, sistemas digitais de monitoramento e gestão da energia permitem otimizar o consumo energético, acompanhar o desempenho operacional em tempo real e aumentar a confiabilidade da operação. Essas soluções são particularmente relevantes em redes ferroviárias mais complexas ou com tráfego misto, nas quais a gestão eficiente da energia e da capacidade operacional se torna elemento central para o desempenho do sistema.

Nesse contexto, projetos recentes de transporte ferroviário de passageiros no Estado de São Paulo ilustram o papel da eletrificação na modernização da infraestrutura de mobilidade regional. Um dos projetos estruturantes é o Trem Intercidades (TIC) Eixo Norte, que conectará a capital paulista ao município de Campinas por meio de uma linha ferroviária de aproximadamente 101 km. O projeto prevê a operação de um serviço expresso entre a estação Barra Funda, na cidade de São Paulo, e Campinas, com parada intermediária em Jundiaí.

A velocidade operacional máxima estimada é de cerca de 140 km/h, permitindo que o trajeto seja realizado em aproximadamente 60 a 64 minutos. Cada composição terá capacidade para transportar até 860 passageiros por viagem, com intervalos previstos de até 15 minutos nos horários de maior demanda. As obras tiveram início em março de 2026, com as primeiras intervenções no trecho entre Campinas e Jundiaí, com entrada em operação estimada para 2031, no âmbito de uma concessão de longo prazo estruturada pelo Governo do Estado de São Paulo.

O projeto também contempla a implantação de um serviço complementar denominado Trem Intermetropolitano (TIM), que ligará Jundiaí a Campinas com múltiplas paradas intermediárias em municípios da Região Metropolitana de Campinas, como Louveira, Vinhedo e Valinhos. Esse serviço deverá atender fluxos pendulares regionais e ampliar a integração entre as redes metropolitanas e intermunicipais de transporte, contribuindo para aumentar a capilaridade do sistema ferroviário e reduzir a dependência do transporte rodoviário em deslocamentos cotidianos. As estimativas indicam que o TIM poderá operar com composições de maior capacidade, suportando até 2.000 passageiros por viagem, com previsão de operação a partir de 2029, antecedendo o serviço expresso do TIC.

Além do eixo Campinas–São Paulo, o planejamento estadual prevê a expansão da rede de trens regionais por meio de novos corredores ferroviários. Entre eles destaca-se o TIC Eixo Oeste, que deverá conectar São Paulo a Sorocaba, reproduzindo o modelo de trem de média velocidade e integração com o sistema metropolitano adotado no projeto do Eixo Norte.

Estudos e consultas públicas para esse corredor vêm sendo conduzidos nos últimos anos, e o projeto faz parte do programa estadual de expansão da infraestrutura ferroviária conhecido como SP nos Trilhos, que prevê investimentos em diferentes projetos ferroviários de passageiros no estado ao longo das próximas décadas. Essas iniciativas também se articulam com o Plano Estadual Ferroviário de São Paulo (PEF-SP), atualmente em desenvolvimento pela Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL), em parceria com a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), cujo objetivo é estabelecer diretrizes para a expansão e integração da rede ferroviária paulista, subsidiando a priorização de investimentos e a estruturação de projetos de transporte ferroviário de passageiros e cargas no horizonte de longo prazo.

A implantação desses sistemas ferroviários de passageiros pode gerar efeitos indiretos relevantes para a infraestrutura logística regional. Em particular, a eletrificação das linhas e a modernização da infraestrutura ferroviária abrem a possibilidade de, em determinados trechos ou horários operacionais específicos, considerar o uso compartilhado ou complementar da infraestrutura para transporte de cargas leves ou de alto valor agregado. Essa hipótese poderia, em tese, permitir a movimentação de pequenas cargas, encomendas expressas ou logística urbana regional utilizando material rodante eletrificado.

Contudo, trata-se apenas de uma possibilidade exploratória, cuja viabilidade dependeria de aspectos operacionais, regulatórios e de capacidade da infraestrutura, bem como da compatibilidade entre os fluxos de passageiros e de cargas. Portanto, qualquer eventual utilização dessa natureza exigiria estudos específicos de demanda, engenharia operacional e modelagem econômica antes de sua implementação.

Do ponto de vista estratégico, a eletrificação do modal ferroviário desempenha papel central na modernização da malha e na consolidação de um sistema de transportes mais sustentável. Além da redução das emissões de gases de efeito estufa, a eletrificação contribui para a diminuição de poluentes locais, a melhoria da eficiência energética do sistema e a redução da dependência de combustíveis fósseis importados.

Para os serviços de passageiros, a tração elétrica é um dos elementos centrais para viabilizar sistemas de transporte de alta capacidade, confiáveis e ambientalmente eficientes, como trens metropolitanos e veículos leves sobre trilhos, embora soluções híbridas também venham sendo adotadas em determinados serviços regionais.

A implementação de soluções de eletrificação ferroviária exige, contudo, elevado grau de planejamento e coordenação. São necessárias análises detalhadas de viabilidade técnica e econômica, simulações operacionais e energéticas e o uso de ferramentas de modelagem capazes de avaliar o desempenho do sistema sob diferentes condições de carga e operação.

Além disso, a adoção dessas tecnologias depende de investimentos significativos em infraestrutura e de um ambiente institucional que ofereça previsibilidade regulatória e mecanismos adequados de financiamento.

No âmbito do PLI-SP 2050, a eletrificação ferroviária deve ser considerada de forma diferenciada conforme o tipo de serviço, a intensidade de uso e as características da malha existente. Em corredores estruturantes e de alta demanda, a eletrificação convencional tende a apresentar maior viabilidade e impacto sistêmico. Em trechos secundários ou com restrições à implantação de catenárias, soluções baseadas em baterias ou hidrogênio podem desempenhar papel complementar, contribuindo para a redução de emissões e para a transição gradual do modal ferroviário para padrões energéticos mais limpos e eficientes.

2.5.2 Biocombustíveis

O uso de biocombustíveis no modal ferroviário representa uma alternativa concreta para reduzir a dependência de diesel fóssil, mitigando emissões de gases de efeito estufa (GEE) e alinhando-se às metas de descarbonização do setor de transportes. Em âmbito global, estudos técnicos[89] apontam que, além do biodiesel, principal biocombustível com potencial de aplicação ferroviária, outros combustíveis renováveis, como etanol, biometano e blends de biocombustíveis, podem ser utilizados em misturas ou substituições parciais do diesel convencional, resultando em redução líquida de GEE quando comparados aos combustíveis fósseis tradicionais.

No Brasil, iniciativas recentes refletem a crescente experimentação com biocombustíveis no contexto ferroviário. Um exemplo inovador é o acordo pioneiro entre a Vale e a Wabtec para testar o uso de etanol, incluindo o etanol de segunda geração (E2G), em locomotivas da Estrada de Ferro Vitória a Minas.

Do ponto de vista químico e de aplicação no motor, o E2G é idêntico ao etanol convencional (produzido a partir do caldo ou melaço da cana) — ambos são etanol (C2H5OH), sem distinção técnica quanto à compatibilidade com motores ou sistemas de injeção. A diferença está exclusivamente na matéria-prima: por ser obtido a partir de resíduos agrícolas e biomassa lignocelulósica, como o bagaço da cana, o E2G apresenta um balanço energético e uma intensidade de carbono ainda mais favoráveis ao longo do ciclo de vida, por aproveitar resíduos que, de outra forma, teriam menor valor econômico ou destino inadequado.

No Brasil, testes com locomotivas movidas a etanol estão sendo conduzidos com o objetivo de substituir progressivamente o diesel em rotas de carga e passageiros. Segundo relatos técnicos, a empresa Vale planeja iniciar a adoção dessa tecnologia a partir de 2028, com substituição inicial de até 50% do diesel por etanol nas locomotivas, e uma meta de evolução para motores totalmente adaptados para operação com esse biocombustível.

Para tanto, são necessárias modificações nos sistemas de injeção e tanques de combustível, mas os primeiros resultados indicam que a substituição parcial não compromete o desempenho operacional das composições ferroviárias, representando um avanço em soluções energéticas mais limpas.

[89]International Union of Railways (UIC) (2007). Railways and Biofuels. Disponível em: https://uic.org/IMG/pdf/railways_and_biofuels_final_report.pdf. Acesso em: 01/07/2026.
Huang, T. Y., Masum, F. H., Jiang, Y., Li, S., Curran, S. J., Biruduganti, M. S., & Hawkins, T. R. (2025). Techno-economic analysis and life cycle assessment of alternative fuels for locomotives in the US freight rail sector. Environmental Science & Technology, 59(30), 15741-15750.

O biodiesel é outro biocombustível com potencial de aplicação direta em locomotivas diesel e diesel-elétricas, seja por meio de blends com diesel fóssil ou em configurações híbridas. Internacionalmente, há registros de utilização de biodiesel em ferrovias, como testes de blends em locomotivas no Reino Unido e nos Estados Unidos, que demonstraram operabilidade técnica e reduções locais de emissões de poluentes.

No Brasil, a Estrada de Ferro Carajás (EFC), operada pela Vale, vem ampliando o uso de biodiesel na sua frota: as locomotivas já operam com mistura de biodiesel (B14) e a expectativa é elevar esse percentual para 25% com a chegada de novas locomotivas, com testes indicando possibilidade de até 50% de biodiesel dependendo das condições de operação. Além disso, projetos ferroviários híbridos combinando tração a diesel com uso intensificado de biodiesel têm sido descritos como soluções intermediárias, especialmente em trechos não eletrificados, permitindo redução de consumo de combustível fóssil, emissões e maior flexibilidade logística.

O biogás e seu produto purificado, o biometano, também constituem opções de baixo carbono quando derivados de resíduos orgânicos, dejetos animais ou resíduos sólidos urbanos, podendo ser empregados em motores de combustão adaptados ou fornecidos a sistemas de geração elétrica embarcada. No contexto ferroviário, embora a aplicação em larga escala ainda seja pouco documentada, essas formas de biocombustíveis apresentam vantagens ambientais significativas, dada a sua origem em resíduos e o potencial de redução de emissões de metano e CO_2 ao longo do ciclo de vida.

Estudos acadêmicos e de avaliação energética apontam ainda que a combinação de combustíveis fósseis com biocombustíveis e alternativas energéticas, como gás natural liquefeito (GNL) com biodiesel, pode gerar ganhos de ecoeficiência em locomotivas diesel-elétricas. Em uma análise que considerou critérios como consumo total de energia, uso de energia renovável, emissões de CO_2, NOx e material particulado, esse cenário híbrido apresentou reduções de emissões e custos quando comparado ao modelo convencional de diesel puro, evidenciando que misturas e configurações mistas podem representar soluções intermediárias de transição energética[90].

A produção e uso de biocombustíveis como etanol e biodiesel já desempenham papel relevante na matriz energética brasileira, respondendo por uma parcela significativa da energia utilizada no transporte e contribuindo para a redução de emissões de GEE quando comparados aos equivalentes fósseis. Dados recentes indicam que, somados, etanol e biodiesel representam mais de 22% da energia utilizada nos transportes brasileiros, com evidências de que o aumento do consumo desses biocombustíveis tem contribuído para a diminuição das emissões globais do setor mesmo diante do crescimento da demanda por deslocamentos[91].

No entanto, a expansão da produção de biocombustíveis e sua aplicação no modal deve considerar a necessidade de adequação das infraestruturas de abastecimento e manutenção. Políticas públicas que incentivem o desenvolvimento sustentável da bioenergia, como mandatos de mistura (*blending mandates*), incentivos fiscais e mecanismos de crédito para inovação tecnológica, desempenham papel importante para ampliar a viabilidade e o impacto ambiental positivo desses combustíveis nos transportes.

[90] CARVALHAES, Bernardo Bicalho (2016). Desenvolvimento de um método para medir e avaliar a eco-eficiência da operação de locomotivas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/handle/10/9459. Acesso: 01/09/2026.
[91] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) / Ministério de Minas e Energia (MME) (2024). Balanço Energético Nacional (BEN) 2024.

Em resumo, o uso de biocombustíveis no modal ferroviário combina redução direta de emissões, compatibilidade com a tecnologia de locomotivas existentes e potencial de mitigação de impactos ambientais sistêmicos, constituindo uma opção de transição energética relevante especialmente em trechos não eletrificados.

A combinação de experiências experimentais, como o etanol 2G no Brasil, com o uso ampliado de biodiesel e biometano, aponta para uma trajetória de aceleração de soluções de baixo carbono no setor ferroviário, complementando outras estratégias de descarbonização como a eletrificação e a inovação tecnológica em tração e gestão operacional. Esses combustíveis sustentáveis oferecem uma alternativa mais limpa e renovável ao óleo diesel, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a transição para uma matriz energética mais sustentável.

2.5.3 Outros vetores tecnológicos

Além das tecnologias atualmente em difusão ou em fase de testes avançados, observa-se o surgimento de discussões e iniciativas exploratórias envolvendo soluções tecnológicas de caráter mais disruptivo no modal ferroviário. Embora ainda se encontrem em estágios iniciais de desenvolvimento e debate, essas alternativas podem constituir fontes relevantes de inovação no longo prazo, especialmente em horizontes que extrapolam o período de referência do PLI-SP 2050.

Uma dessas frentes diz respeito às discussões sobre a eletrificação de corredores ferroviários associada a fontes alternativas de geração de eletricidade, incluindo projetos conceituais que consideram o uso de combustível nuclear como fonte primária de energia. Essas propostas, ainda restritas a estudos preliminares e debates técnicos em âmbito internacional, buscam explorar a elevada densidade energética e a estabilidade de geração associadas à energia nuclear como forma de garantir suprimento contínuo e de baixo carbono para sistemas ferroviários de grande escala.

No entanto, tais iniciativas enfrentam desafios significativos de ordem tecnológica, regulatória, institucional e social, incluindo elevados custos de implantação, requisitos rigorosos de segurança e aceitação pública limitada. Diante dessas restrições, trata-se de uma alternativa que, embora relevante do ponto de vista conceitual e de inovação tecnológica, permanece fora do escopo de aplicação prática no horizonte do PLI-SP 2050, devendo ser interpretada como uma possibilidade de longo prazo.

Outra linha de desenvolvimento tecnológico refere-se à implementação de sistemas de recuperação de calor residual (*Locomotive Waste Heat Recovery Systems – LWHRS*), voltados ao aumento da eficiência energética de locomotivas existentes, especialmente aquelas baseadas em tração diesel-elétrica. Esses sistemas permitem capturar parte do calor dissipado pelos motores e sistemas de exaustão e convertê-lo em energia útil, que pode ser utilizada para geração elétrica auxiliar ou apoio à tração. Trata-se de uma solução incremental, com potencial de reduzir o consumo específico de combustível e as emissões associadas, prolongando a vida útil de frotas mais antigas e contribuindo para ganhos ambientais de curto e médio prazo sem a necessidade de substituição integral do material rodante.

Embora a recuperação de calor residual apresente maior proximidade tecnológica em relação a soluções mais disruptivas, sua aplicação em larga escala no setor ferroviário ainda demanda validação operacional, padronização tecnológica e avaliação econômica detalhada. Os ganhos de eficiência tendem a ser modestos quando comparados a soluções estruturais como a eletrificação plena, mas podem desempenhar papel complementar relevante em estratégias de transição, sobretudo em contextos nos quais investimentos em novas frotas ou infraestrutura elétrica sejam limitados.

Em síntese, essas tecnologias emergentes ilustram o potencial de inovação contínua no modal ferroviário, ainda que sua aplicação prática se situe, em grande medida, além do horizonte temporal do PLI-SP 2050 ou restrita a nichos específicos. No âmbito da construção de cenários do plano, sua relevância reside menos na incorporação direta aos exercícios de simulação e mais no reconhecimento de trajetórias tecnológicas de longo prazo, que podem influenciar decisões estratégicas futuras e orientar a adaptação do sistema ferroviário a transformações energéticas e tecnológicas mais profundas ao longo das próximas décadas.

2.5.4 Implicações para cenários futuros

A evolução tecnológica do modal ferroviário apresenta implicações relevantes para a construção de cenários prospectivos no âmbito do PLI-SP 2050. As transformações observadas nos sistemas de tração, nas fontes energéticas e na gestão operacional da malha ferroviária indicam uma trajetória potencial de aumento da eficiência energética, redução de emissões e ampliação do papel estratégico do modal na matriz de transportes. Essas mudanças, contudo, tendem a ocorrer de forma gradual e heterogênea, variando conforme as características dos corredores ferroviários, o perfil das cargas transportadas, o nível de demanda e as condições institucionais e regulatórias.

No transporte de cargas, a tendência predominante no horizonte do plano é a continuidade da operação baseada em locomotivas diesel-elétricas, ainda que progressivamente complementadas por soluções de menor intensidade de carbono. A incorporação crescente de biocombustíveis, especialmente biodiesel e etanol, pode representar uma estratégia de transição energética relativamente rápida e de menor custo de implementação, uma vez que essas soluções apresentam elevado grau de compatibilidade com a frota existente.

Paralelamente, a eletrificação da malha ferroviária tende a ganhar relevância em corredores específicos, particularmente aqueles caracterizados por elevada densidade de tráfego, grande volume transportado e operação contínua. Nessas condições, a eletrificação por catenária aérea pode gerar ganhos significativos de eficiência energética e redução de emissões, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Soluções tecnológicas alternativas, como locomotivas híbridas com baterias ou sistemas baseados em hidrogênio, podem desempenhar papel complementar nesse processo de transição energética. Embora ainda enfrentem desafios relacionados a custos, infraestrutura e maturidade tecnológica, essas alternativas apresentam potencial de aplicação em segmentos específicos da rede ferroviária, especialmente em trechos onde a eletrificação convencional apresenta restrições técnicas ou econômicas.

No transporte de passageiros, projetos de trens regionais eletrificados, como o Trem Intercidades (TIC) no Estado de São Paulo, indicam uma tendência de modernização da infraestrutura ferroviária associada à expansão de serviços de média velocidade e maior integração com sistemas metropolitanos de transporte. Em cenários de longo prazo, iniciativas dessa natureza podem ampliar a conectividade regional e fortalecer o papel do modal ferroviário em deslocamentos interurbanos de média distância.

A modernização da infraestrutura ferroviária também pode gerar externalidades positivas para o sistema logístico como um todo. A implantação de corredores eletrificados e a melhoria da qualidade operacional da malha podem ampliar a atratividade do modal ferroviário para novos fluxos de carga e favorecer a integração com outros modais. Em determinados contextos, a coexistência de serviços de passageiros e de cargas em infraestruturas modernizadas pode abrir espaço para novas formas de utilização da rede, embora a viabilidade dessa integração dependa de estudos específicos de capacidade operacional e compatibilidade de tráfego.

Tabela 2-6: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modal ferroviário

Vetor tecnológico	Escala de imapcto	Horizonte temporal*
Eletrificação por catenária aérea	Local/regional	Curto a médio prazo (2028-2043)
Locomotivas híbridas com baterias	Local/regional	Médio prazo (2033-2043)
Hidrogênio em células a combustível	Nacional/global	Médio a longo prazo (2033-2050)
Uso ampliado de biocombustíveis (biodiesel, etanol)	Nacional/global	Curto prazo (2028-2033)
Biometano e combustíveis de baixo carbono	Nacional/global	Médio prazo (2033-2043)
Sistemas digitais de gestão energética e tração eficiente	Nacional/global	Curto prazo (2028-2033)
Sistemas de recuperação de calor residual	Nacional/global	Médio prazo (2033-2043)
Expansão de trens regionais eletrificados	Local/regional	Médio a longo prazo (2033-2050)

*Nota: * Os horizontes indicam o período provável de adoção comercial relevante e de difusão da tecnologia no modal ferroviário, e não sua data de surgimento ou de realização dos primeiros projetos-piloto. Foram considerados os marcos temporais do PLI-SP 2050: curto prazo = até 2033; médio prazo = de 2033 a 2043; longo prazo = de 2043 a 2050; e horizonte pós-PLI = após 2050. Tecnologias classificadas em mais de um horizonte podem apresentar adoção inicial em nichos, frotas cativas ou corredores específicos antes de sua disseminação em maior escala. Fonte: Estudos mercadológicos.*

Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Dessa forma, no âmbito da construção de cenários do PLI-SP 2050, o modal ferroviário pode evoluir segundo diferentes trajetórias tecnológicas. Em cenários mais conservadores, observa-se a predominância de melhorias incrementais na tração diesel-elétrica combinadas com maior uso de biocombustíveis. Em cenários de transição energética mais acelerada, a eletrificação seletiva da malha e a incorporação de novas tecnologias de tração podem ampliar significativamente os ganhos ambientais e energéticos do modal. Já em cenários mais transformadores, a combinação entre modernização da infraestrutura, expansão da rede e adoção de tecnologias de baixa emissão pode reposicionar o transporte ferroviário como um dos pilares centrais de um sistema logístico mais eficiente, sustentável e integrado.

2.6 Rodoviário

O transporte rodoviário constitui o principal eixo estruturante da mobilidade e da logística no Brasil, desempenhando papel central na integração territorial, no dinamismo econômico e na garantia do acesso da população a bens, serviços e oportunidades, conectando centros urbanos de diferentes portes, áreas de produção agroindustrial e mineral, polos de consumo e

infraestruturas estratégicas de comércio exterior, como portos e aeroportos, conferindo ao modal elevada capilaridade e flexibilidade operacional.

Sua relevância histórica está associada ao processo de ocupação do território e à consolidação das cadeias produtivas nacionais, intensificado a partir da segunda metade do século XX, quando políticas públicas e investimentos passaram a privilegiar a expansão da infraestrutura viária. Essa centralidade se reflete na predominância do transporte rodoviário na matriz nacional de transportes, sendo responsável pela maior parte da movimentação de cargas e pela quase totalidade do transporte de passageiros.

Atualmente, a malha rodoviária brasileira abrange um universo de cerca de 1.800.000 km, com somente 216.976 km (12,6%) das rodovias pavimentadas (CNT, 2025)[92], evidenciando os desafios estruturais associados à capacidade, à segurança e à eficiência do transporte rodoviário no Brasil. No Estado de São Paulo, esse quadro é comparativamente mais favorável: a malha rodoviária estadual totaliza aproximadamente 199.809 km (DER-SP, 2024), dos quais cerca de 34.584 km (17,3%) são pavimentados, proporção superior à média nacional, refletindo investimentos consistentes em concessões e gestão pública, que também colocam o Estado na liderança do ranking de qualidade rodoviária do país, segundo a Pesquisa CNT de Rodovias 2024/2025[93].

No campo econômico e social, o setor apresenta elevada relevância em termos de geração de emprego e renda, reunindo uma vasta quantidade de empresas e trabalhadores distribuídos ao longo de toda a cadeia logística e de mobilidade. No transporte de cargas, o modal rodoviário exerce função estratégica tanto nas ligações de curta e média distância quanto na integração com outros modais de maior capacidade, como o ferroviário e o aquaviário, assegurando a fluidez das cadeias de suprimentos e o atendimento à chamada "última milha".

É inerente ao transporte uma grande diversidade de veículos e aplicações de uso. Segundo dados do SENATRAN (2026), os veículos comerciais leves (picapes e furgões) representam 12,5 milhões de veículos na frota brasileira, correspondendo a 9,51% do total[94]. Os veículos leves de carga, como vans, desempenham papel versátil e essencial na logística urbana e regional, viabilizando a distribuição de mercadorias, especialmente no contexto do crescimento do comércio eletrônico e da demanda por entregas rápidas e descentralizadas, sobretudo nas etapas finais das cadeias. Esses veículos são amplamente utilizados por pequenas e médias empresas como instrumentos de trabalho, atendendo a múltiplas finalidades, que incluem serviços de construção, manutenção, transporte de pequenas cargas, serviços postais, ambulâncias e transporte de passageiros em grupos reduzidos.

Os caminhões, por sua vez, constituem o principal vetor do transporte rodoviário de cargas de média e longa distância, apresentando ampla variedade de configurações em função das exigências operacionais. Desde veículos rígidos até combinações complexas de semirreboques e múltiplos eixos, os caminhões são projetados para atender a diferentes tipos de carga, volumes, distâncias e condições operacionais. Esse segmento é fundamental para o abastecimento interno, para o escoamento da produção agrícola e industrial e para o funcionamento de serviços públicos essenciais, como coleta de resíduos, obras de infraestrutura e serviços de emergência. Além disso, os caminhões exercem papel indispensável na articulação intermodal, assegurando

[92] CNT – Confederação Nacional do Transporte (2025). Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2025/03/pesquisa-CNT-anuario-rodovias-2024.pdf. Acesso em: 01/07/2026.
[93] DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem (2024). Malha Rodoviária do Estado de São Paulo — Extensão Total.
[94] SENATRAM (2026). Frota de Veículos – 2026. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2026. Acesso em: 01/07/2026.

a transferência de cargas entre rodovias, ferrovias, hidrovias, portos e aeroportos. No recorte dos transportes de passageiros, o rodoviário atende a uma ampla diversidade de demandas, incluindo deslocamentos urbanos, intermunicipais, interestaduais e internacionais, além de serviços de fretamento, desempenhando papel fundamental na coesão social e na acessibilidade.

Ainda se destacam diferentes categorias de veículos e serviços, dentre os quais os automóveis de passeio, em suas diversas configurações, representam o principal meio de mobilidade individual, proporcionando autonomia e flexibilidade, especialmente em contextos de dispersão urbana e em regiões com oferta limitada de transporte coletivo.

Os ônibus constituem o eixo central do transporte coletivo de passageiros, desempenhando papel estratégico na promoção da mobilidade, da inclusão social e da integração territorial. Sua ampla presença em áreas urbanas, periurbanas e rurais confere elevada capilaridade ao sistema, permitindo o atendimento a diferentes perfis de demanda e assegurando o acesso da população a serviços essenciais, como educação, trabalho, saúde e lazer, especialmente para grupos com menor acesso à mobilidade individual.

Do ponto de vista operacional, os ônibus se destacam pela flexibilidade e pelo baixo custo relativo de implantação e expansão, em comparação a outros modos de transporte coletivo, o que os torna particularmente adequados a contextos de restrição fiscal e rápida resposta à demanda. Sistemas estruturados, como corredores exclusivos e BRTs, ampliam a capacidade e a confiabilidade do serviço, consolidando-se como alternativas custo-efetivas a investimentos mais intensivos em infraestrutura ferroviária.

Além disso, o transporte por ônibus contribui para a racionalização do uso do espaço viário, reduzindo congestionamentos ao substituir diversas viagens por automóveis individuais e, considerando motores a combustíveis fósseis, apresentam menor emissão de carbono por passageiro transportado e facilidade de incorporação de tecnologias mais eficientes e de baixa emissão, reforçando seu papel central nas estratégias de mobilidade sustentável e desenvolvimento de longo prazo.

Em relação aos automóveis e motocicletas, estes desempenham papel relevante não apenas nos deslocamentos cotidianos associados ao trabalho, à educação e ao lazer, mas também no atendimento a serviços essenciais, como assistência domiciliar, atendimento médico e emergências. Complementarmente, serviços como táxis, transporte por aplicativo e *carsharing* ampliam as opções de mobilidade, sobretudo em áreas urbanas.

Apesar de sua importância estratégica, o transporte rodoviário enfrenta desafios estruturais relevantes, associados às condições da infraestrutura viária, à segurança, aos custos operacionais e aos impactos ambientais. Ao mesmo tempo, a pluralidade de formatos, finalidades e serviços que caracteriza esse modal, abrangendo desde a mobilidade individual até o transporte comercial de cargas e passageiros, conferindo-lhe elevado potencial para a incorporação de inovações tecnológicas, incluindo novos combustíveis, aplicações digitais, sistemas inteligentes de transporte e soluções avançadas de gestão e operação.

Somente para este setor, O *ETP Clean Energy Technology Guide*[95] da Agência Internacional de Energia (IEA 2025) apresenta 49 tecnologias e componentes individuais com o respectivo nível de maturidade tecnológica voltados à consecução da meta global de emissões líquidas zero. Essa diversidade amplia as possibilidades de modernização, mas também impõe a necessidade de

[95] https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide

conciliar usos comerciais e pessoais, considerando a heterogeneidade de perfis de usuários, preferências de consumo e limitações impostas pela infraestrutura existente.

Nesse contexto, as estratégias de desenvolvimento do transporte rodoviário devem buscar um equilíbrio entre flexibilidade operacional, eficiência econômica e adequação às condições reais da malha viária, ao mesmo tempo em que se alinham aos compromissos climáticos assumidos pelo país no âmbito das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) brasileiras e às especificidades do contexto ambiental local.

A adoção de soluções de menor intensidade de carbono, embora desejável do ponto de vista ambiental, enfrenta barreiras econômicas relevantes, como elevados custos iniciais para a transição energética do sistema vigente, assimetrias regionais de renda e de acesso a tecnologias. Ainda assim, o rodoviário é, entre os modais de transporte, o setor com o maior número de soluções de descarbonização já maduras e custo-efetivas em comparação a outros modos.

Ainda assim, cenários que consideram forte adoção de veículos elétricos na frota rodoviária indicam ganhos relevantes de eficiência e potencial de redução do consumo energético no Brasil mesmo com o aumento da frota, como apresentado pelo ICCT (2025). Esses ganhos, contudo, não substituem, mas complementam a diversificação de soluções já contemplada pelo planejamento energético estadual, no qual biocombustíveis, eletrificação e outras rotas tecnológicas convivem como alternativas complementares, e não excludentes, para a descarbonização do transporte rodoviário. Deste modo, serão abordadas na sequência as principais tendências, gargalos e oportunidades tecnológicas e de inovação relevantes para o transporte rodoviário no âmbito do PLI-SP.

As informações tem como base dados de diversas organizações, normativas e estatísticas nacionais, como a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), Agência Internacional de Energia (IEA), Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO), Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), Confederação Nacional do Transporte (CNT), Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis (ACEA), Confederação Nacional do Transporte (CNT), Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE), Banco Mundial (World Bank), Conselho Consultivo Europeu para Pesquisa em Transporte Rodoviário (ERTRAC), Iniciativa Global de Relatórios (GRI), Fórum Internacional de Transportes (ITF), Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP), Fórum Econômico Mundial (WEF), além de outras referências bibliográficas que desenham as perspectivas futuras para o setor.

2.6.1 Eletrificação

A busca mundial pela transição energética da frota rodoviária para veículos eletrificados, considerados mais sustentáveis, tem como base na redução significativa das emissões locais de poluentes atmosféricos em comparação aos veículos movidos a combustíveis fósseis, e por vantagens operacionais, como menor nível de ruído e melhorias no desempenho e na dinâmica de condução. Ainda assim, existem algumas questões que precisam ser equacionadas para efetivamente impulsionar a penetração desta tecnologia no Brasil, um dos maiores mercados automotivos do mundo e ainda fortemente dependente de combustíveis fósseis.

Dados da União Europeia (ACEA, 2025) indicam uma forte correlação entre a adoção de veículos elétricos a bateria e o nível de renda da população. Em contextos com maior poder aquisitivo e políticas de incentivo estáveis, como a Dinamarca, Holanda e Finlândia, a penetração desses veículos ocorre de forma mais acelerada, enquanto em realidades de menor renda a participação permanece limitada. Essa diferença não decorre da falta de interesse dos consumidores, mas sim de restrições de acesso, especialmente associadas ao diferencial de preço em relação aos

veículos com motores a combustão. Na ausência de mecanismos que reduzam esse custo relativo, a transição tende a se concentrar em segmentos mais favorecidos.

Como base de comparação, o mercado automotivo da União Europeia em 2025 apresentou 17,4% de novos veículos totalmente elétricos (VEB), 9,4 % Veículo Elétrico Híbrido Plug-in (VEHP) e 34,5% de veículos elétricos híbridos (VEH), superando, pela primeira vez, a participação combinada dos veículos movidos exclusivamente a gasolina e diesel, com redução para somente 35,5% do mercado. Para vans eletrificadas, chegou a 12,1%, enquanto caminhões a 3.6% e ônibus a 28,5%. Estes dados da ACEA (2025) evidenciam a aceleração da transição tecnológica no setor automotivo europeu e a consolidação da eletrificação como eixo central das estratégias de descarbonização.

Por outro lado, os dados da FENABRAVE (2025), apontam que o Brasil, para o ano de 2024, o percentual da venda de carros totalmente elétricos atingiu 3,09% e para veículos híbridos de 5,88%, situação ainda mais díspar quando se considera os outros tipos de veículos, somente 0,15% dos comerciais leves, 0,39% dos caminhões, 0,93% dos ônibus e 0,41% das motocicletas.

A literatura e a experiência internacional indicam que políticas previsíveis e de longo prazo, voltadas ao estímulo da demanda e à expansão da infraestrutura de abastecimento, tendem a favorecer a universalização da eletromobilidade, incluindo estratégias específicas para frotas corporativas, com evidências de maior efetividade de incentivos econômicos em comparação a abordagens exclusivamente mandatória. Segundo a ABVE, em março de 2021 existiam 500 eletropostos, atingindo a marca de 16.880 setembro de 2025, com quase 50% destes na região Sudeste, e somente 2,44% na região Norte, evidenciando tanto o ritmo de expansão quanto as disparidades regionais.

Além da frota privada, a transição para a eletrificação do transporte público encontra entraves estruturais relevantes, sobretudo em função dos elevados custos iniciais de aquisição dos veículos e da necessidade de infraestrutura de recarga dedicada nas garagens e pátios operacionais das frotas, distinta da rede pública de eletropostos, voltada a veículos particulares.

A eletrificação de frotas de ônibus depende de investimentos das operadoras ou do poder público municipal na instalação de carregadores de alta potência nos depósitos, viabilizando a recarga noturna ou entre turnos das composições. Projeta-se uma expansão gradual dessa infraestrutura nos próximos anos, à medida que governos locais estabeleçam metas de eletrificação e que instrumentos de financiamento público e programas federais de investimento, como o Novo PAC, contribuam para reduzir barreiras econômicas e viabilizar a adoção em escala.

Adicionalmente, deve-se entender que a retirada ou a redução abrupta de incentivos compromete de forma significativa o ritmo de crescimento do mercado de veículos elétricos, tanto de veículos como de infraestrutura. A volta gradual da tributação da importação dos eletrificados em 2024, os quais eram isentos desde 2015, chegando em 2026 no patamar de 35%, pode causar uma retração do crescente mercado nacional; por outro lado, esta ação visa desenvolver a cadeia automotiva nacional, acelerar o processo de descarbonização da frota brasileira e contribuir para o projeto de neoindustrialização do país.

Salienta-se que, caso ratificado pelas câmaras, o acordo de livre comércio entre o Mercosul e a União Europeia é visto como vantajoso para o setor automobilístico externo. Ao reduzir tarifas sobre veículos e autopeças e mitigando barreiras técnicas, a competitividade de automóveis europeus no país irá aumentar.

Para o Brasil, a entrada em vigor do acordo traz uma dualidade: de um lado, pode acelerar a eletrificação da frota, atrair investimentos e ampliar o acesso a tecnologias e componentes

avançados, viabilizando ganhos de eficiência e redução de emissões; de outro, há risco de desindustrialização e maior dependência externa, caso a redução tarifária intensifique a substituição da produção local por importações. Outro ponto de preocupação seria a possibilidade de direcionamento ao mercado nacional de modelos tecnologicamente mais defasados e poluentes, aproveitando-se de exigências ambientais menos rigorosas do que as vigentes no mercado europeu.

Nesse contexto, a literatura aponta a relevância de combinar abertura comercial com políticas industriais, regulatórias e ambientais que considerem conteúdo local em tecnologias limpas, critérios mínimos de desempenho ambiental para importações, instrumentos de financiamento e P&D, além de monitoramento da balança comercial e eventuais salvaguardas setoriais, como forma de mitigar riscos de retrocesso na estrutura produtiva e no compromisso de descarbonização.

Ainda, a introdução de uma grande quantidade de veículos eletrificados pode gerar um aumento significativo da demanda ao sistema elétrico. A conexão simultânea de muitos veículos pode alterar significativamente os perfis horários de consumo, tornando inadequadas as metodologias tradicionais de previsão de demanda. Em áreas urbanas densas onde alimentadores e transformadores já operam próximos ao limite, a simultaneidade das recargas intensifica o risco de sobrecargas, exigindo novos critérios de dimensionamento, revisão do carregamento de equipamentos e maior atenção à coordenação dos sistemas de proteção.

Além do aumento de carga, a infraestrutura de recarga traz impactos à qualidade da energia, tanto devido ao uso intensivo de carregadores rápidos, que podem elevar níveis de distorção harmônica, provocar desbalanceamento entre fases e acelerar o envelhecimento de equipamentos, assim como alteram os perfis de consumo, criando padrões de estresse da rede com a recarga residencial noturna ou a recarga rápida em centros urbanos. Como ressaltam Aguiar e Coelho (2025), sem análises prévias de fluxo de carga, curto-circuito, avaliação térmica e proteção, a instalação de eletropostos pode resultar em violações operacionais, demandando reforços na rede, como substituição de transformadores, aumento da bitola de cabos ou reconfiguração de alimentadores, elevando custos e a complexidade da expansão do sistema elétrico.

Por fim, destaca-se que a acessibilidade econômica se configura como elemento central da eletrificação da frota rodoviária, onde a existência de infraestrutura adequada e ampla oferta de modelos não se demonstra suficiente para sustentar a demanda em escala compatível com os objetivos de neutralidade climática, situação vivida na União Europeia. São Paulo precisa equacionar o arcabouço legal e regulatório para permitir que a transição energética veicular realmente ocorra, e de forma ampla, não restrita a uma pequena parcela favorecida da população.

2.6.2 Baterias

As células de bateria representam uma parcela significativa do valor agregado de um veículo elétrico, podendo responder por até cerca de 40% do seu valor total (ACEA 2025). No processo de fabricação dessas células, os materiais ativos do ânodo e do cátodo assumem papel central na estrutura de custos, sendo responsáveis, respectivamente, por aproximadamente 10% e 50% do custo total de produção. Essa composição evidencia o elevado grau de dependência de insumos minerais estratégicos e de cadeias industriais complexas, fortemente concentradas em determinadas etapas do processamento.

No que se refere à cadeia produtiva global, observa-se elevada concentração nas atividades de processamento e refino de materiais críticos. A maior parte das fases produtivas destes materiais como o lítio, grafite e níquel é dominada por poucos atores globais, com destaque para a

liderança chinesa. De maneira geral, a capacidade produtiva mundial nas etapas iniciais da cadeia de suprimentos de baterias encontra-se fortemente concentrada em um número restrito de países, o que resulta em assimetrias relevantes do ponto de vista geoeconômico e de segurança de abastecimento.

Adicionalmente, a produção secundária proveniente da reciclagem ainda desempenha um papel limitado nesse contexto, e, para determinados insumos críticos como metais de terras raras, é praticamente inexistente no mundo. Esse cenário reforça a necessidade de estratégias voltadas ao fortalecimento da cadeia de valor doméstica, à diversificação de fornecedores, ao estímulo à reciclagem em escala, como a planta de reciclagem em desenvolvimento em Poços de Caldas – MG, e ao desenvolvimento de soluções tecnológicas que reduzam a dependência de matérias-primas primárias, em consonância com os objetivos de sustentabilidade e resiliência industrial no longo prazo.

Em relação à pesquisa e desenvolvimento, das 49 tecnologias mencionadas no guia de tecnologias limpas da IEA (2025), 15 são de baterias elétricas, organizadas por níveis de maturidade tecnológica descritos abaixo:

- Aceitos pelo mercado

1) Bateria com ânodo de grafite de baixo teor de silício
2) Bateria de íons de lítio
3) Tecnologia de bateria *cell-to-pack*

- Demonstrada

4) Bateria de íons de sódio
5) Bateria com ânodo de médio a alto teor de silício
6) Tecnologia de bateria *cell-to-chassis*
7) Tecnologia de bateria *module-to-bracket*

- Prototipagem ampla

8) Bateria de estado sólido
9) Bateria de lítio-enxofre (Li-S)
10) Bateria com ânodo de silício
11) Bateria com cátodo rico em manganês

- Prototipagem restrita

12) Bateria de óxido de zinco-manganês
13) Bateria de íons de potássio

- Conceitual

14) Bateria de íons multivalentes

15) Bateria lítio-ar (Li-Air)

Dada a extensa diversidade de tecnologias emergentes, será apresentado somente um exemplo de inovação de baterias para o horizonte próximo.

2.6.3 Baterias de estado sólido

As baterias de estado sólido representam uma evolução tecnológica relevante no armazenamento de energia, com potencial impacto sobre o transporte terrestre de cargas e passageiros no horizonte de planejamento de médio e longo prazo. Como a WIPO (2025) apresenta, o número de patentes publicadas sobre este tema é crescente, com mais de 2.000 em 2023, indicando intensificação dos esforços de pesquisa e desenvolvimento.

Em comparação às baterias convencionais de íons de lítio, essa tecnologia apresenta benefícios significativos, como maior segurança operacional, caracterizando-se pela substituição do eletrólito líquido, inflamável, por um eletrólito sólido. O uso de eletrólitos sólidos pode viabilizar a adoção de ânodos com maior densidade energética, como lítio metálico ou silício, resultando em aumento da capacidade das baterias. Além disso, apresentam vida útil ampliada e potencial para recargas mais rápidas, características que podem contribuir para ganhos de desempenho, confiabilidade e sustentabilidade na eletrificação da frota veicular, principalmente para aplicações em veículos médios e pesados de carga.

Como exemplo, pode-se citar as soluções de algumas empresas, como a divulgação da venda de baterias de estado sólido da Samsung SDI e de carros da Nissan para 2028, e a bateria da Toyota baseada em condutores iônicos com estrutura espinélio, incorporando lítio, magnésio, zinco e alumínio nos diferentes componentes da bateria para alcançar maiores ganhos de desempenho e baixo custo. Caso esses avanços se consolidem nas aplicações comerciais de larga escala, as baterias de estado sólido poderão desempenhar papel estratégico na transição energética do transporte terrestre, com implicações relevantes para a demanda por infraestrutura, a competitividade industrial e a redução de impactos ambientais.

Apesar do elevado potencial, a tecnologia ainda enfrenta restrições técnicas e econômicas para sua disseminação em escala comercial. Destacam-se os desafios associados à produção industrial em larga escala, aos processos de manufatura mais complexos e custosos e à necessidade de garantir a estabilidade dos eletrólitos sólidos e de suas interfaces com os eletrodos ao longo do ciclo de vida da bateria. Esses fatores condicionam o ritmo de adoção da tecnologia e indicam que sua aplicação mais ampla deverá ocorrer de forma gradual ao longo do horizonte do plano.

2.6.4 Infraestrutura de carregamento

A infraestrutura atual de recarga de veículos elétricos constitui um dos fatores determinantes para a disponibilidade de flexibilidade operacional desses veículos no sistema de transporte rodoviário. O sistema de recarga de veículos elétricos é composto pelos carregadores, pelas estações externas de carregamento e pela infraestrutura elétrica que as suporta. Na recarga em corrente alternada (CA), modo em que a energia é disponibilizada pelas redes de distribuição, a conversão para corrente contínua (CC), necessária para carregar a bateria, ocorre no carregador interno do próprio veículo.

Como a potência desse carregador embarcado é limitada, esse processo resulta em recarga lenta, tipicamente associada a pontos residenciais e locais de trabalho. Já na recarga em corrente contínua (CC), a conversão ocorre na própria estação externa de carregamento, que fornece energia diretamente à bateria em potências muito mais elevadas, caracterizando os chamados

carregadores rápidos, geralmente distribuídos ao longo de rodovias e em ambientes urbanos de alta demanda.

O tempo de recarga tem decaído significativamente ao longo dos anos, aproximando-o do tempo de abastecimento dos veículos convencionais, sendo a velocidade de recarga o principal critério dos usuários ao utilizar carregadores públicos[96]. Exemplos recentes trazidos pela IEA (2025) incluem baterias capazes de recuperar entre 30% e 40% da carga em apenas cinco minutos, e plataformas de carregamento de última geração impulsionadas por arquiteturas elétricas de até 1.000 V levando a autonomia de 400 km no mesmo prazo. Entretanto, para a maioria dos usuários, redes confiáveis capazes de recarregar um veículo em 15 a 20 minutos já atendem adequadamente as necessidades de longa distância, e nos principais centros urbanos mundiais, a infraestrutura pública ainda é majoritariamente composta por carregadores lentos ou semirrápidos (até 22 kW).

As múltiplas possibilidades influenciam diretamente na viabilidade para os diferentes serviços envolvidos, uma vez que carregadores embarcados tendem a reduzir o custo da estação de recarga e menor dependência de infraestrutura, enquanto carregadores externos diminuem o peso e o custo do veículo, ao transferirem o conversor para a infraestrutura fixa, permitindo maior celeridade e atendendo a baterias maiores, como os necessários para transporte de carga ou longas distâncias. Para potências elevadas, a partir de cerca de 50-60 kW, os carregadores são maiores e mais pesados, favorecendo estruturas compartilhadas, exemplificado nos sistemas de recarga por pantógrafo em pontos intermediários ou finais de linha em ônibus urbanos elétricos, com potências típicas entre 150 kW e 300 kW.

Outra variável dos carregadores está relacionada à forma de transferência de energia. Esta pode ser realizada por meio de cabos metálicos, a forma condutiva, ou de forma indutiva, na qual a transferência de energia ocorre sem contato físico entre o veículo e a estação. Características como tecnologia de transferência, limite de tensão, da corrente e se o abastecimento é do tipo CA ou CC segregam a que tipos de veículos podem ser atendidos.

A padronização das tecnologias de carregamento para sistemas de recarga de veículos elétricos é desenvolvida por diferentes instituições e variam conforme o país e o contexto de aplicação. As diferenças mais relevantes entre os padrões concentram-se nos tipos de conectores e portas utilizadas, cujo veículo pode receber pinos adicionais para suportar os dois (Sistema de Carregamento Combinado), além dos níveis de tensão adotados pelas redes elétricas de cada país, fatores que devem ser cuidadosamente considerados no processo de projeto para garantir segurança, compatibilidade e interoperabilidade dos sistemas de recarga. No Brasil, são mais comuns aqueles divulgados pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e pela *International Electrotechnical Commission* (IEC).

Como exemplo, a família das normas IEC 62196 e IEC 61851, incorporadas nacionalmente com as respectivas ABNT NBR IEC 61851 e a ABNT NBR IEC 62196, definem os níveis e modos de recarga, bem como os tipos de corrente, tensões e potências associadas.

- A recarga em CA abrange desde o nível 1, tipicamente operando em 120 V com potência da ordem de 1,9 kW, até níveis superiores em 240–250 V, alcançando potências que

[96] International Energy Agency - IEA (2025). Electric vehicle charging – Global EV Outlook 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging. Acesso em: 12/09/2026.

variam de aproximadamente 7,7 kW a mais de 60 kW, dependendo do modo e da corrente admissível.

- Já a recarga em CC corresponde aos níveis mais elevados, com tensões que podem atingir até 600 V e potências da ordem de centenas de quilowatts, viabilizando o carregamento rápido.

Segundo o INMETRO (2024), os principais tipos de plugues e tomadas para veículos elétricos são:

- Tipo 1 (SAE J1772) e CCS1
- Tipo 2 (IEC 62196) e CCS2
- GB/T 20234
- CHAdeMO
- Tesla

A presença majoritária no mercado automotivo nacional de veículos elétricos leves é a do conector do Tipo 2/CCS2 (IEC 62196). Como cada montadora adota o tipo de carregador de sua preferência, e como no caso brasileiro a vasta maioria dos postos implementados por iniciativa das próprias montadoras, é interessante que se realize ações de padronização no país no futuro, mas no presente momento, como as tecnologias envolvidas estão em rápido processo de evolução e que uma pode inibir a inovação e investimentos, a análise do INMETRO não recomendou uma medida regulatória que imponha tal padronização.

Especificamente para o Estado de São Paulo, este apresenta 28% (4.777) do total de eletropostos do país (ABVE 202597), sendo 3.937 do tipo AC (recarga lenta) e 840 em DC (recarga rápida). Destes, 44,3% (2.116) estão na capital, seguidos ao longe por Campinas (4,1% / 194), Barueri (3,0% / 141) e Ribeirão Preto (2,8 % / 194), com os outros municípios com menos de 2%. Este panorama destaca a falta de disseminação de carros elétricos fora das grandes cidades, com baixa capilaridade e dificultando a presença de carros totalmente elétricos em áreas rurais ou rodovias secundárias, destacando a necessidade de investimento em novos eletropostos para permitir a adoção desta tecnologia.

Dentre as considerações sobre a expansão dos eletropostos no Estado de São Paulo, além da maior dispersão, devem ser ponderadas as questões da gestão dos sistemas de energia. Por exemplo, as *Smart Grids* habilitam a medição e comunicação bidirecional em tempo real entre pontos de conexão (estações de recarga, consumidores, microrredes e usinas), permitindo gerenciar a simultaneidade de recargas, suavizar picos (*peak shaving*), realizar balanceamento de carga e coordenar serviços ancilares (regulação de frequência e tensão), mitigando sobrecargas em transformadores e a necessidade de reforços emergenciais na distribuição.

Uma das funções desta tecnologia permite organizar momentos em que a geração distribuída apresente excedentes de energia renováveis, utilizando a malha de estações de recarga e algoritmos de controle para alocar energia excedente aos VEs, reduzindo vertimentos, emissões locais e custos sistêmicos, ao mesmo tempo em que preservam margens operativas da rede metropolitana para ramais críticos, fundamental para a resiliência e a qualidade do serviço no

[97] https://abve.org.br/abve-data/bi-eletropostos/

sistema paulista, além de gerar uma compensação aos donos dos veículos, mitigando os custos de manutenção.

No futuro, a integração à rede energética dos veículos a bateria (V2G) pode gerar um sistema de serviços ancilares como regulação de frequência/tensão, mitigação de congestionamentos, reservas girantes, redução de intermitência e deslocamento de demanda (*load shifting*). O V2G amplia o papel das baterias elétricas como cargas passivas para ativos de rede, ao permitir a injeção controlada de energia dos veículos para o sistema, transformando estacionamentos públicos e privados em recursos energéticos distribuídos com valor operacional superior ao mero armazenamento. Esta tecnologia pode reduzir investimentos em expansão de rede, elevar a confiabilidade do suprimento e gerar receitas para proprietários de veículos, contribuindo para metas ambientais ao deslocar emissões e viabilizar maior penetração de renováveis no sistema interligado que atende a Região Metropolitana de São Paulo.

2.6.5 Biocombustíveis

Em relação ao biometano, este é considerado como grande fonte de mitigação de emissões de GEE do setor de transportes rodoviários a curto e médio prazo no país. O uso de biometano em frotas de caminhões pesados já está em escala comercial em São Paulo, com diversos projetos em operação, aproveitando que a região é destaque na produção deste combustível. A ICONIC, joint venture entre Ipiranga e Chevron, em parceria com a transportadora Jomed, iniciou em novembro de 2025 a adoção de carretas a biometano na rota entre a Região Metropolitana de São Paulo e Duque de Caxias (RJ), com cerca de 28% das viagens substituindo o diesel de forma direta, sem etapa intermediária com GNV.

Na mesma linha, a Copersucar desenvolveu o programa BioRota, iniciado como piloto em abril de 2024 e hoje considerado a maior operação de logística sustentável a biometano do Brasil: entre abril de 2024 e março de 2026, mais de 70 caminhões, operados por cinco transportadoras parceiras, realizaram mais de 13 mil viagens e percorreram 11 milhões de km entre usinas do interior paulista e o Porto de Santos, substituindo cerca de 5 milhões de litros de diesel, com redução de até 90% nas emissões de gases de efeito estufa e custo de 20% a 25% inferior ao diesel, a empresa planeja expandir o modelo para as 42 usinas associadas[98]. Ainda, empresas como a Ultragaz oferecem como produto de descarbonização de frotas pesadas o fornecimento de biometano com infraestrutura dedicada de abastecimento, com eficiência operacional equivalente ao diesel e ao GNV, com benefícios adicionais como a redução de ruído, economia no custo de combustível, menor índice de manutenção e maior autonomia dos veículos.

Os Veículos Elétricos a Célula de Combustível (VECC), principalmente o hidrogênio, mostram-se promissores para longas distâncias e aplicações de carga pesada em um horizonte mais próximo devido a uma operação mais próxima ao sistema atual, além de ser mais compatível com grandes distâncias, minimizando a quantidade de abastecimentos. Caminhões de carga geralmente circulam por corredores de transporte específicos, o que minimiza os custos de instalação de pontos de abastecimento de hidrogênio, maximizando o impacto e a eficácia.

Por outro lado, o uso de hidrogênio em veículos de passeio levaria a uma pulverização da necessidade de instalação de abastecimento de hidrogênio, levando esta demanda para praticamente todos os postos de combustível do Estado de São Paulo. Em contrapartida, os

[98] Copersucar (2026). Copersucar apresenta BioRota, maior operação de logística sustentável movida a biometano do Brasil. Disponível em: https://www.copersucar.com.br/copersucar-apresenta-biorota-maior-operacao-de-logistica-sustentavel-movida-a-biometano-do-brasil/. Acesso em: 12/09/2026.

e-fuels oferecem uma solução de substituição direta (*drop-in*) para a redução das emissões de gases de efeito estufa, sem a necessidade de uma nova infraestrutura extensa, mas ainda apresentam os gargalos de custo mais elevado e escala industrial incipiente, como mencionado anteriormente.

2.6.6 Outros vetores tecnológicos

A transformação digital está instaurando as bases de novos ecossistemas de mobilidade digital, orientado a serviços, dados e conectividade. O *Mobility-as-a-Service* (MaaS) é um conceito de organização da mobilidade urbana originado voltado à oferta de uma experiência integrada, inteligente e centrada no usuário, por meio da reorganização da estrutura produtiva do setor de transportes. Envolve a transição de um modelo fragmentado por modais de transporte para um modelo estruturado, unificado por funcionalidades de mobilidade, permitindo maior eficiência operacional, customização dos serviços e aderência às necessidades individuais dos usuários.

Integra atores públicos e privados, apresentando-se ao usuário como um único provedor de serviços de mobilidade. o MaaS é sustentado por arquiteturas baseadas em APIs, sistemas de bilhetagem eletrônica, dados em tempo real e algoritmos de roteamento multimodal, permitindo que diferentes provedores de transporte operem de forma interoperável. O Bilhete Único e o People Mover (APM), sistema a ser implantado no Aeroporto Internacional de São Paulo, em Guarulhos, se apresentam alinhados ao MaaS ao atuar como elemento estruturante e automatizado de integração modal entre os terminais aeroportuários à Estação Aeroporto-Guarulhos da Linha 13-Jade da CPTM, mas necessitando ampliar as integrações entre transporte público, compartilhado e privado em um único sistema.

Outro modelo envolve o compartilhamento de veículos, o *Vehicle-as-a-Service* (VaaS), um formato orientado a uso, no qual veículos são disponibilizados por meio de assinaturas, locações flexíveis ou pagamento por uso, com serviços agregados como manutenção, seguro, telemetria e gestão de frota. O VaaS depende fortemente de plataformas digitais de gestão de ativos, conectividade veicular, monitoramento em tempo real e análise de dados, possibilitando elevada taxa de utilização e otimização do ciclo de vida do veículo. Esse modelo reduz investimentos iniciais de capital para usuários e empresas, amplia a previsibilidade de custos e facilita a eletrificação e renovação tecnológica das frotas.

Especificamente voltado para a eletrificação da frota, o *Battery-as-a-Service* (BaaS) é um modelo que surge como uma alternativa ao modelo tradicional *Battery-as-a-Product* (BaaP), com o objetivo de reduzir barreiras de entrada para os consumidores e ampliar a adoção de veículos elétricos. Este modelo separa a propriedade da bateria do veículo, oferecendo a energia armazenada como serviço, por meio de assinaturas, locação ou sistemas de troca rápida (*battery swapping*).

O BaaS envolve baterias padronizadas, sistemas avançados de gerenciamento (BMS), conectividade IoT, monitoramento remoto e infraestrutura dedicada de troca e recarga, permitindo manutenção preditiva, atualização tecnológica e reciclagem eficiente, resultando na mitigação da degradação da bateria, na redução do tempo de inatividade operacional e favorece a economia circular, sendo particularmente relevante para frotas comerciais e mobilidade urbana intensiva.

Contudo, apesar de seu potencial teórico, permanece em aberto a avaliação sobre se e em quais condições o modelo BaaS é efetivamente superior ao modelo BaaP, tanto do ponto de vista econômico quanto operacional e ambiental, exigindo mais análises comparativas aprofundadas sobre custos, eficiência, comportamento do consumidor e impactos de longo prazo no ecossistema da mobilidade elétrica.

Neste tópico são apresentadas algumas iniciativas e ferramentas aplicadas internacionalmente voltadas ao ganho de qualidade dos sistemas de transporte, focadas em políticas, estudos e tecnologias. Os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) constituem um conceito abrangente que engloba o uso de tecnologias da informação, comunicação, controle e automação para melhorar a eficiência, a segurança e a sustentabilidade dos sistemas de transporte, normalmente por meio da coleta, processamento e disseminação de dados de forma centralizada ou unidirecional, como em centros de controle de tráfego, sistemas de gerenciamento semafórico e informações ao usuário.

A sustentabilidade e digitalização se apresentam como principais tendências para o transporte rodoviário, a primeira impulsionando a inovação voltada à redução das emissões de CO_2 e à promoção de práticas mais ecológicas, enquanto a digitalização aumenta a eficiência operacional por meio de avanços em tecnologia e análise de dados, incluindo a integração de inteligência artificial aos sistemas de navegação e novos sensores aumentando a segurança e a eficiência. No entanto, tal panorama levanta preocupações quanto a cibersegurança aplicada ao transporte rodoviário.

2.6.7 Sistemas avançados de assistência ao condutor (ADAS)

Os Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor (*Advanced Driver Assistance Systems* - ADAS), consistem em um conjunto de tecnologias embarcadas nos veículos que utilizam sensores, sistemas eletrônicos e software para apoiar o condutor na execução das tarefas de direção, com o objetivo principal de reduzir a ocorrência e a gravidade dos acidentes de trânsito. O desenvolvimento e a disseminação desses sistemas decorrem do avanço da capacidade computacional veicular, da miniaturização e redução de custos de sensores e do crescente enfoque internacional na segurança viária baseada em sistemas.

Os principais grupos de tecnologias ADAS incluem sistemas de advertência e prevenção de colisões, sistemas de suporte à condução longitudinal e lateral, sistemas de monitoramento do ambiente e do condutor e sistemas de apoio à segurança sistêmica. Entre os sistemas de prevenção de acidentes, destacam-se os alertas de colisão frontal, a frenagem automática de emergência, o controle eletrônico de estabilidade e os sistemas de assistência à frenagem de emergência, os quais apresentam evidências consistentes de redução de colisões traseiras e de acidentes com consequências graves, sobretudo em ambientes urbanos e rodoviários de tráfego intenso.

No âmbito do suporte à condução, ganham relevância os sistemas de alerta de saída de faixa, de assistência ativa à manutenção na faixa e de centralização do veículo, os quais utilizam principalmente câmeras e algoritmos de visão computacional para interpretar a sinalização horizontal. Esses sistemas são particularmente sensíveis à qualidade, visibilidade e padronização das marcas viárias, o que reforça a interdependência entre a tecnologia embarcada e a infraestrutura rodoviária disponível.

Os sistemas de monitoramento do ambiente e do condutor incluem tecnologias de detecção de ponto cego, câmeras de visão periférica e para ré, sistemas de monitoramento por espelhos digitais, sistemas automáticos de chamada de emergência em caso de acidente e mecanismos de detecção de fadiga e distração do motorista. Esses recursos ampliam a percepção situacional do condutor e contribuem para a mitigação de riscos associados a falhas humanas, especialmente em veículos pesados, transporte coletivo e operações de longa duração. Ainda, sistemas de caráter sistêmico, como o controle de velocidade assistida auxilia o condutor no cumprimento dos limites de velocidade. Essas tecnologias extrapolam a atuação individual do veículo e se alinham a políticas públicas mais amplas de segurança viária, redução de vítimas fatais e resposta rápida a sinistros.

A incorporação de normativas relacionadas a ADAS no contexto do Estado de São Paulo tende a produzir impactos significativos sobre os sistemas rodoviários. Em especial, tecnologias dependentes de leitura de faixas e sinalização demandariam elevação do padrão de qualidade da sinalização horizontal e vertical, com maior regularidade de manutenção, padronização cromática e adequação à leitura por sistemas de visão computacional. Esse aspecto implica em revisões nos manuais técnicos atualmente adotados por órgãos gestores e concessionárias, com reflexos diretos nos contratos de operação e manutenção viária.

Além disso, a expansão do uso de ADAS favorece a integração progressiva entre veículos e sistemas inteligentes de gestão do tráfego, incluindo limites de velocidade dinâmicos, corredores monitorados e, em um horizonte mais avançado, soluções de comunicação veículo-infraestrutura. No contexto paulista, caracterizado por elevada densidade veicular e extensa malha concedida, tais normativas podem atuar como indutoras de investimentos em rodovias inteligentes e em sistemas de controle operacional mais sofisticados.

Do ponto de vista da segurança viária urbana, a obrigatoriedade gradual de tecnologias como frenagem automática de emergência, monitoramento de fadiga e assistência inteligente à velocidade apresenta potencial para redução de atropelamentos, colisões com usuários vulneráveis e acidentes envolvendo transporte coletivo e de cargas. Esses efeitos convergem com diretrizes de políticas públicas voltadas à redução de mortes no trânsito e à abordagem de "sistema seguro", já presente em debates técnicos e institucionais no Estado de São Paulo.

Por fim, a disseminação dos ADAS tende a influenciar os modelos de fiscalização, planejamento e gestão do trânsito, com maior disponibilidade de dados operacionais e deslocamento do enfoque punitivo individual para análises sistêmicas de desempenho e risco. Nesse cenário, torna-se fundamental a harmonização entre a legislação nacional de trânsito, as resoluções do Conselho Nacional de Trânsito e eventuais normativas estaduais, de modo a garantir coerência regulatória e maximização dos benefícios associados à adoção dessas tecnologias.

A integração dos sistemas ADAS com Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) potencializa de forma significativa a coordenação entre veículos, infraestrutura e gestão do tráfego, ampliando os benefícios da interação com semáforos inteligentes e modelos de previsão de congestionamentos. No contexto dos ITS, dados provenientes de centros de controle, sensores urbanos, câmeras, laços magnéticos, GPS veicular e plataformas de mobilidade são processados de forma integrada para estimar níveis de saturação viária, tempos de viagem e formação de filas.

Essas informações podem ser disponibilizadas aos veículos equipados com ADAS, permitindo ajustes antecipatórios de velocidade, aceleração e desaceleração, de modo a sincronizar a condução com os ciclos semafóricos e com as condições reais e previstas do tráfego. Essa abordagem reduz a ocorrência de paradas desnecessárias, suaviza os ciclos de parada e partida, melhora a fluidez em corredores críticos, aumenta a eficiência energética e contribui para a redução de emissões e de conflitos viários, reforçando uma gestão do trânsito mais sistêmica, preditiva e orientada à segurança e sustentabilidade.

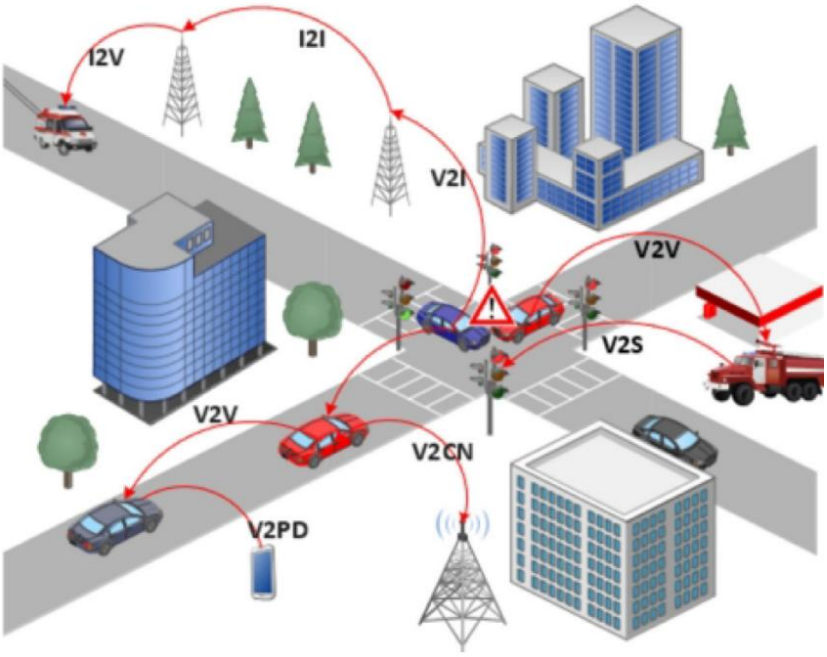
2.6.8 Comunicação veículo-a-tudo (V2X) e sistemas de transporte inteligente cooperativo (C-ITS)

Os Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativos (*Co-operative Intelligent Transport Systems* – C-ITS) ou *Redes Veiculares Ad hoc* (*Vehicular Ad hoc Networks* – VANETs), constituem um conjunto integrado de tecnologias que permitem a comunicação e interpretação de dados entre veículos rodoviários, outros veículos, condutores, infraestruturas viárias, serviços de dados e usuários vulneráveis, como pedestres e ciclistas. Essa comunicação cooperativa possibilita o compartilhamento de informações em tempo quase real, transformando o veículo em uma

plataforma computacional móvel, integrada a um ecossistema digital cooperativo. Dentre as diferentes modalidades de comunicação entre os elementos do C-ITS, resumidas ao termo Veículo a Tudo (V2X), se destacam:

- Veículo a Veículo (V2V)
- Veículo a Infraestrutura (V2I)
- Infraestrutura a Infraestrutura (I2I)
- Veículo a Sensores (V2S)
- Veículo a Dispositivos Pessoais (V2DP)
- Veículo a Rede Celular (V2CN)

Figura 2-13: Elementos da comunicação em C-ITS



Fonte: Saoud et al. 2024.

A implementação do V2X apoia-se em uma arquitetura tecnológica integrada, baseada na convergência entre Internet das Coisas (IoT), conectividade avançada e inteligência artificial, permitindo processamento distribuído, análise de dados em tempo real e tomada de decisão proativa. O avanço das redes móveis 5G, os padrões internacionais definidos pelo 3GPP e, de forma prospectiva, 6G, ampliou significativamente as capacidades do V2X, ao oferecer baixa latência, alta confiabilidade, elevada largura de banda e maior cobertura, sustentando aplicações de segurança cooperativa, como alertas de colisão, avisos de frenagem brusca e assistência em interseções, além de contribuírem para a coordenação do tráfego e o suporte à condução automatizada.

Ainda, reconhecendo os riscos associados à segurança cibernética e à privacidade de dados, um princípio fundamental deste sistema envolve a adoção de soluções eficazes e tempestivas para a proteção dos sistemas, das mensagens e das informações pessoais, assegurando um ambiente de transporte confiável e resiliente.

Comparativamente, o C-ITS representa uma evolução do ITS. Enquanto o ITS tradicional tende a operar de forma mais fragmentada e reativa, o C-ITS promove um ecossistema de transporte integrado e cooperativo, no qual as informações são compartilhadas continuamente para apoiar decisões humanas e automatizadas, incorporando capacidades preditivas e permitindo aplicações avançadas de segurança e automação veicular, como veículos conectados, pelotões veiculares, frenagem cooperativa e alertas antecipados de riscos. Esta ampliação da percepção do ambiente antecipa riscos, permite otimizar fluxos de tráfego, a redução de consumo de combustível e emissões de poluentes.

Como exemplo, destaca-se que o ITS já é aplicado na Austrália, com resultados visíveis em melhorias da segurança viária, redução de congestionamentos, equidade no acesso ao transporte, qualidade de vida urbana, tempos de viagem, manutenção da qualidade da pista e sustentabilidade ambiental (AUSTRALIA, 2024). A introdução do C-ITS está sendo implementada em algumas cidades-piloto, como Perth. benefícios que tendem a ser ampliados com a crescente automação veicular, na medida em que a resposta passará a ser feita automaticamente às informações recebidas de outros veículos, da infraestrutura e dos demais usuários da via.

A abordagem australiana para o C-ITS baseia-se em princípios acordados entre os governos e o setor produtivo, viabilizando os investimentos e planejamentos robustos necessários e a segurança de dados. Destaca-se a busca por um ambiente nacionalmente consistente, com padrões uniformizados, de modo a garantir uma experiência integrada aos usuários e previsibilidade para a indústria, além da harmonização com abordagens internacionais, como espectro de radiofrequência.

Considerando sua aplicação no Estado de São Paulo, marcada por elevada complexidade operacional, alta densidade de tráfego e grande diversidade de modais, embora experiências internacionais com tecnologias C-ITS comprovem sua viabilidade técnica, sua adoção permanece um objetivo de médio a longo prazo, condicionado a fatores institucionais, regulatórios e operacionais locais.

A elevada complexidade do sistema viário paulista, marcada por alta densidade de tráfego, diversidade de usuários e integração metropolitana, exige avanços consistentes na harmonização do uso dos espectros de comunicação entre as partes, na interoperabilidade entre fabricantes, sistemas embarcados e infraestrutura urbana, bem como no fortalecimento da cibersegurança e da governança de dados. Além disso, a consolidação desta tecnologia no estado depende da demonstração de benefícios concretos e mensuráveis para usuários, operadores e gestores públicos, ou a massa crítica de componentes no sistema para sua viabilidade custará a chegar.

2.6.9 Veículos autônomos (AV)

Os veículos autônomos (*Autonomous Vehicles* – AV) figuram entre as tecnologias que estão redefinindo os sistemas de transporte e mobilidade. O avanço simultâneo da capacidade computacional e da disponibilidade de grandes volumes de dados de alta qualidade permitiu que os AV atingissem marcos significativos de desempenho na arquitetura de seus sistemas, compostos por três módulos fundamentais: percepção, planejamento e controle. Além do aspecto de comodidade, a segurança viária é o cerne do desenvolvimento dos AV, uma vez que a grande maioria dos acidentes de trânsito estão associados a erro humano. Como aponta Liu et al. (2025), a perspectiva é que sistemas automatizados, livres de distração, fadiga ou julgamento comprometido, podem reduzir substancialmente a ocorrência de sinistros, superando o desempenho humano em termos de taxas de acidentes e fatalidades.

A Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) criou uma escala de automação para veículos. O nível 0 é o veículo sem automação. Os níveis 1 e 2 da SAE correspondem à automação de

baixo nível, amplamente difundida na frota atual, incluindo funções ADAS como controle de cruzeiro adaptativo, assistência de permanência em faixa e frenagem automática, mas ainda dependente do condutor humano para monitoramento e pela tomada de controle. A WEF (2025) aponta que os veículos novos comercializados a partir de 2030 e nos anos subsequentes os níveis 1 e 2 tendem a se tornar predominantes.

Essa predominância é explicada pela ampla disponibilidade no mercado, pelas menores barreiras regulatórias e pelos custos de sistema significativamente inferiores quando comparados às soluções de automação mais avançadas. Como consequência, mesmo no horizonte pós-2035, a maioria dos condutores continuará sendo legal e operacionalmente responsável pela condução do veículo.

O nível 3, caracterizado como automação condicional, o veículo já consegue realizar todas as tarefas de direção automaticamente, mas exige que o condutor reassuma o controle quando solicitado, sendo considerado de viabilidade limitada e com desafios específicos de segurança. Já os níveis 4 e 5 correspondem à alta e à total automação da condução, com redução significativa ou eliminação da necessidade de intervenção humana. A principal diferença entre estes seria que no nível 4 esta automação possui restrições geográficas, climáticas ou está atrelada a realização de rotas específicas, enquanto a 5 seria para qualquer situação, não sendo necessário a supervisão humana.

A adoção de AV ocorrerá de forma heterogênea entre as diferentes regiões do mundo, refletindo variações em capacidade econômica, ambiente regulatório, maturidade tecnológica e aceitação do consumidor. Para a WEF (2025), a transição deverá ser liderada pela China, seguida pelos Estados Unidos, enquanto Europa e Japão tendem a apresentar uma trajetória semelhante, porém mais lenta, ao longo da próxima década.

Tabela 2-7: Níveis de automação veicular (escala SAE J3016)

Nível	Nome	Descrição resumida
0	Sem automação	Condutor realiza todas as tarefas de condução.
1	Assistência ao condutor	Sistema auxilia em uma função, como controle de cruzeiro adaptativo **ou** assistência de faixa.
2	Automação parcial	Sistema controla direção e aceleração/frenagem simultaneamente, mas o condutor monitora o ambiente e deve assumir a qualquer momento.
3	Automação condicional	Veículo monitora o ambiente e conduz sozinho em condições específicas, mas o condutor deve retomar o controle quando solicitado.
4	Alta automação	Veículo opera sozinho em condições ou áreas definidas, chamadas de ODD, sem necessidade de intervenção humana dentro desse

Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

No que se refere especificamente aos níveis 2 e 2+, e em menos destaque aos níveis 3 e 5, projeta-se que, em 2035, a China será vanguardista neste ponto, dada a maior disposição de sua população a estes sistemas e a capacidade de fabricação interna. O restante do mundo seguirá uma trajetória mista, na qual algumas regiões avançarão de maneira gradual na adoção de níveis 2 e 2+, enquanto outras enfrentarão restrições econômicas, tecnológicas e regulatórias que retardarão a transição para níveis mais altos de ADAS e automação veicular.

As implantações em larga escala de táxis autônomos (robotaxis) já demonstraram a viabilidade tecnológica de frotas de veículos totalmente autônomos em operação comercial. Nos Estados Unidos, empresas do setor realizaram milhões de viagens pagas sem a presença de motoristas de segurança em Phoenix, São Francisco e Los Angeles, enquanto na China centenas de robotáxis já operam em cidades como Pequim, Wuhan e Chongqing. Apesar desses avanços, a escalabilidade dessas operações permanece um desafio significativo, em função da necessidade de aprovações regulatórias específicas para cada cidade, da heterogeneidade dos ambientes viários e de complexidades operacionais associadas à integração urbana.

Considerando diferentes cenários de adoção e ritmos de expansão, o elevado volume de tempo e investimento exigido para entrar e expandir mercados urbanos tende a restringir a oferta de serviços de robotáxi até 2030, mas projeta-se que frotas de larga escala estarão presentes em aproximadamente 40 a 80 cidades globalmente até 2035. Esse padrão de crescimento evidencia que, embora a tecnologia esteja suficientemente madura para aplicações comerciais, a expansão deste serviço será condicionada principalmente por fatores institucionais, regulatórios e de governança urbana, e não apenas por limitações técnicas.

As trajetórias atuais indicam que China e Estados Unidos deverão liderar esse processo, consolidando-se como os principais polos de implantação de robotáxis urbanos. A Europa desponta como o terceiro maior mercado potencial, embora com uma estratégia distinta, mais orientada à adoção de ônibus ou vans autônomas (*robô shuttles*) integrados e complementares às redes de transporte público existentes. O Oriente Médio também surge como um adotante inicial, impulsionado por projetos urbanos planejados e políticas pró-inovação.

Quanto ao desenvolvimento de caminhões autônomos, testes extensivos e implantações comerciais iniciais estão em curso, sobretudo nos Estados Unidos e na China, com ganhos de eficiência associados à operação contínua e baixa dependência humana. Ainda assim, depende do aumento da confiabilidade da tecnologia em diferentes condições viárias e climáticas, a complexidade regulatória e a integração com cadeias logísticas já estabelecidas.

As implantações de caminhões autônomos podem ser organizados nos seguintes principais usos, com distintos estágios de maturidade tecnológica, regulatória e de infraestrutura: operações de média e longa distância entre hubs logísticos, mais promissoras devido à previsibilidade das rotas, vis exclusivas e menor complexidade operacional; operações de média distância ponto a ponto; distribuição intraurbana, de maior complexidade; e operações em ambientes fechados e controlados, como canteiros de obras, minas, fazendas e portos, as mais adequadas à automação no contexto atual.

Avaliando o contexto para a introdução dos AV no Brasil, a KPMG apresentou e, 2020 o Índice de Prontidão para Veículos Autônomos (AVRI) que avalia o quanto que 30 países selecionados estão preparados para a adoção desta tecnologia a partir de critérios de segurança viária, arcabouço regulatório, proteção de dados e privacidade, infraestrutura digital, impactos sobre os sistemas de transporte e capacidade de integração em viagens interjurisdicionais.

O Brasil ficou posicionado em último lugar, com baixo nível de prontidão institucional, diretrizes governamentais claras, projetos-piloto em ambiente urbano aberto ou definição de corredores dedicados para testes e operações. A infraestrutura digital, fundamental para a automação veicular, apresenta avanços potenciais com a implantação do 5G.

Por outro lado, empresas nacionais já implementam veículos autônomos para ambientes controlados, como o caso da Vale, com mais de 70 equipamentos autônomos operados por sistemas digitais apoiados por IA entre caminhões, perfuratrizes e máquinas de pátio em minas de grande porte em Carajás, Brucutu e Itabira. A empresa relata ganhos de operação de até 15% no rendimento operacional e redução de até 7,5% no consumo de combustível,

contribuindo de forma direta para a diminuição das emissões de carbono e a exposição de trabalhadores a riscos operacionais. A Lume Robotics, em parceria com Grupo o Águia Branca e o Portocel, utilizam um caminhão 100% autônomo, sem nenhuma intervenção humana, no transporte de celulose internamente no porto de Aracruz-ES.

No caso específico de São Paulo, embora o estado e a região metropolitana concentrem a maior capacidade tecnológica, industrial e logística do país, não há ainda uma política estadual estruturada para veículos autônomos. A infraestrutura viária complexa, a alta densidade de tráfego e a diversidade de usuários da via representam desafios adicionais, mas também oferecem um ambiente estratégico para testes controlados. Especialistas apontam que iniciativas como a criação de corredores dedicados ao transporte de cargas autônomas, por exemplo entre São Paulo e outras grandes cidades, poderiam posicionar o estado como líder nacional nessa agenda, reduzindo riscos regulatórios e acelerando a aprendizagem institucional.

2.6.10 Sistemas de detecção automática de incidentes (DAI)

O Sistema de Detecção Automática de Incidentes (DAI) é uma solução tecnológica baseada em análise inteligente de vídeo aplicada às câmeras de CFTV, podendo ser complementada por Inteligência Artificial (IA), redes neurais profundas e drones, operando de forma coordenada com os demais recursos operacionais destinados à monitoração contínua e em tempo real das condições de tráfego nas faixas de rolamento, acostamentos e vias marginais.

A tecnologia utiliza software avançado de processamento de imagens para identificar automaticamente anomalias e incidentes viários, como veículos parados, colisões, congestionamentos atípicos ou obstruções da via, sem dependência exclusiva da observação humana. O sistema é capaz de analisar, processar e armazenar dados de múltiplas câmeras em tempo real, gerando alertas visuais e sonoros para operadores em centrais de controle, além de permitir o envio de mensagens e imagens para operadores remotos, via smartphones e tablets, e o acesso remoto às imagens em tempo real, ampliando a rapidez na tomada de decisão e no acionamento de respostas operacionais.

Relativo à aplicação ao Estado de São Paulo, no âmbito do Sistema Anchieta-Imigrantes, a Ecovias vem testando a plataforma SSTOM (*Smart System Traffic Operations Management)* da SpySkyTech, uma solução SaaS em nuvem voltada ao monitoramento rodoviário inteligente, que utiliza algoritmos para converter imagens captadas por câmeras fixas, móveis e drones em dados operacionais acionáveis em tempo real.

A plataforma é capaz de detectar automaticamente eventos como acidentes, veículos imobilizados, buracos na pista, presença de fumaça, objetos na via e outras condições anômalas, acionando o Centro de Controle Operacional por meio de alertas visuais, sonoros e envio de imagens. A solução opera na nuvem, eliminando a necessidade de processamento local, com benefícios de escalabilidade, disponibilidade e integração de múltiplos dispositivos. Existe a perspectiva de expansão para outras rodovias da Ecovias e demais concessões do Grupo EcoRodovias.

2.6.11 Pedágio eletrônico free flow

O Pedágio Eletrônico Free Flow é um sistema de cobrança de tarifa rodoviária em livre passagem, que elimina praças físicas, cabines e cancelas, permitindo que os veículos trafeguem na velocidade da via sem necessidade de parada ou redução significativa de velocidade, eliminando pontos de congestionamento, acidentes e emissões de gases de efeito estufa. A cobrança é realizada de forma automática e eletrônica por meio de pórticos instalados ao longo da rodovia, equipados com sensores, antenas de radiofrequência e câmeras inteligentes.

O sistema opera a partir de dois mecanismos principais de identificação veicular: leitura de TAG eletrônica (transponder) instalada no veículo, que possibilita a cobrança automática vinculada a conta pré-paga ou pós-paga; e leitura automática de placas (ANPR – *Automatic Number Plate Recognition*), utilizada quando o veículo não possui TAG, permitindo a posterior emissão da cobrança ao usuário por meios digitais ou canais disponibilizados pela concessionária.

A tarifação no modelo Free Flow pode ser estruturada de forma proporcional ao uso da infraestrutura, considerando o trecho efetivamente percorrido e a categoria do veículo, em substituição à cobrança fixa concentrada em praças de pedágio. Aplicada pela primeira vez no Brasil na BR 101/RJ, atualmente já se encontram pontos na Rodovia Laurentino Mascari (SP-333), em Itápolis, na Rodovia Carlos Tonani (SP-333), em Jaboticabal, em parte da RMSP na BR-116, além da substituição das praças de pedágio das rodovias Anchieta e Imigrantes prevista para julho. São planejados ao menos 58 pórticos de free flow funcionando nas rodovias estaduais até 2030.

2.6.12 Sistema de pesagem dinâmica de veículos em velocidade da via (HS-WIM)

O Sistema de Pesagem Dinâmica de Veículos em Velocidade da Via (*High Speed Weigh-In-Motion* – HS-WIM) é uma tecnologia de fiscalização e monitoramento rodoviário que permite a medição automática do peso bruto total e das cargas por eixo de veículos comerciais em fluxo livre, sem necessidade de redução de velocidade ou parada dos veículos. O sistema é composto por sensores de pesagem instalados na pista de rolamento, associados a laços indutivos, câmeras e equipamentos de processamento eletrônico, capazes de identificar o veículo, classificar sua tipologia, registrar imagens, horário, local e parâmetros de peso em tempo real, com nível de precisão compatível com balanças rodoviárias convencionais.

O HS-WIM foi implementado em caráter experimental no âmbito do Sandbox Regulatório da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), inicialmente nas rodovias BR-364 e BR-365, com o objetivo de avaliar sua aplicação como alternativa aos Postos de Pesagem Veicular (PPV) com balanças lentas. A tecnologia, homologada pelo Inmetro em 2024, demonstrou capacidade de identificar excessos de peso por eixo e no peso bruto total sem interferir na fluidez do tráfego, com a vantagem da alta eficiência do sistema funcionando em ambiente fiscalizatório, mas ainda necessitando de alguns ajustes na aferição de alguns parâmetros.

Além da função fiscalizatória, o sistema HS-WIM permite gerar uma base contínua e automatizada de dados sobre o tráfego pesado, fornecendo informações estratégicas para o planejamento e a gestão da infraestrutura rodoviária, definição de políticas públicas, apoio à regulação econômica e ambiental, e avaliação de investimentos em manutenção e expansão da malha.

2.6.13 Platooning

O *Platooning* consiste na operação coordenada de múltiplos veículos em comboio, com curta distância entre si, controlados por um veículo líder (geralmente com um motorista) e por sistemas de direção automatizada e comunicação V2V, permitindo que os outros veículos sigam com controle autônomo para manter espaçamento e sincronizar movimentos.

A tecnologia apresenta ganhos potenciais em eficiência energética (redução do consumo de combustível pelo efeito aerodinâmico), segurança viária (menor variabilidade de manobras e resposta mais rápida) e capacidade da via (melhor uso do espaço), com aplicações prioritárias no transporte de cargas em corredores de alto fluxo. Adicionalmente, a integração do *platooning* a ITS e a modelagens de tráfego regionais permitirá quantificar benefícios de forma constante,

como a economia de combustível alcançada, emissões evitadas, confiabilidade do sistema e segurança viária.

Sua viabilidade operacional depende de infraestruturas e sistemas confiáveis de V2V com baixa latência, além de algoritmos de controle robustos para manutenção do comboio no tráfego e sistemas de sinalização, alinhamento lateral, integração aos sensores (radares, LiDAR, câmeras) e a sistemas de apoio à condução.

Ainda existem desafios relevantes, como a padronização tecnológica, interoperabilidade entre frotas e fabricantes, segurança cibernética, marcos regulatórios e responsabilidades legais perante acidentes, assim como qualidade da infraestrutura rodoviária e de gestão de tráfego que assegurem condições consistentes para operação automatizada, o que por si só é um desafio no contexto nacional com a pluralidade de atores responsáveis pelas rodovias e distintas qualidades de pistas.

Segundo a WIPO (2025), as pesquisas em *platooning* estão em crescimento desde 2018, com foco em comunicações V2V/ITS, controle cooperativo e avaliação de impactos sobre dinâmica do tráfego e consumo energético, sinalizando estágio de maturação tecnológica seletiva e priorização de casos de uso com melhor relação custo-benefício.

Sugere-se a adoção escalonada em locais onde a coordenação operacional é mais factível, por exemplo em corredores logísticos consolidados, mas com ressalvas no futuro próximo dentro do contexto do Estado de São Paulo, dada a falta de diversos quesitos de infraestrutura para a segurança de operação; ainda assim, iniciativas como o Free Flow incorporado gradualmente na região se configuram como pré-requisitos para operações em comboio.

2.6.14 Avaliação da equidade de acesso ao transporte

A incorporação sistemática da equidade no planejamento de mobilidade é condição necessária para enfrentar desigualdades socioespaciais e aprimorar a qualidade de vida nas regiões metropolitanas. Parte-se da definição de acessibilidade como a capacidade de conectar pessoas a oportunidades essenciais (emprego, educação, saúde e serviços), resultante da interação entre proximidade urbana (densidade e diversidade de usos) e desempenho do sistema de transporte (cobertura, frequência, confiabilidade e amplitude de operação).

Historicamente, as políticas e projetos que privilegiaram a expansão viária e o uso intensivo do automóvel, como o caso de São Paulo e o Brasil como um todo, reforçam a dependência do transporte individual, ampliam tempos e custos sociais (congestionamentos, emissões e sinistros) e penalizam de forma desproporcional grupos sem acesso a veículo, em especial mulheres, idosos e recortes populacionais de menor poder aquisitivo e/ou minorias, principalmente em áreas periféricas e periurbanas. Em contrapartida, áreas com redes estruturadas de transporte público, integradas a padrões urbanos compactos e de uso misto, tendem a oferecer níveis de acessibilidade equivalentes ao automóvel, além de favorecer a mobilidade ativa e reduzir desigualdades no acesso.

Neste contexto, qualquer plano de mobilidade necessita incorporar a avaliação da equidade dos modais, com vistas a: (i) orientar políticas e investimentos por indicadores de acessibilidade e equidade, com uso de dados desagregados e métricas territorializadas; (ii) promover integração entre transporte, habitação e uso do solo, priorizando adensamento qualificado em eixos de transporte e realocação de espaço viário em favor de modos coletivos e ativos; (iii) adotar intervenções de custo eficiente (corredores e faixas prioritárias, qualificação de calçadas, redes cicláveis de conexão fina) ancoradas em diagnósticos de acessibilidade; e (iv) estruturar mecanismos de financiamento e seleção de projetos com base em metas de redução de desigualdades de acesso.

A expansão e alteração no planejamento da mobilidade regional deve ainda levar em conta como o avanço tecnológico pode apresentar desdobramentos para a eficácia dos modais para os distintos recortes populacionais. As tecnologias ADAS podem desempenhar um papel estratégico ao reduzir desigualdades associadas à idade e às limitações funcionais, permitindo que pessoas idosas mantenham autonomia, mobilidade e participação social por mais tempo.

Ao compensar déficits sensoriais e cognitivos, esses sistemas reduzem a necessidade de estratégias compensatórias restritivas, como evitar dirigir à noite ou em áreas desconhecidas, ampliando o acesso seguro a oportunidades de trabalho, serviços de saúde, lazer e redes sociais. Tecnologias como navegação assistida e visão noturna diminuem barreiras associadas ao ambiente viário complexo, enquanto sistemas de emergência automática aumentam a segurança percebida e real, especialmente para condutores que se sentem vulneráveis, com mecanismos embarcados de suporte, como monitoramento de ocupantes com inteligência artificial e sistemas automáticos de alerta de emergência.

Tais recursos são particularmente relevantes para passageiros com condições médicas como epilepsia ou diabetes, permitindo a detecção em tempo real de sinais de sofrimento ou incapacidade e o acionamento imediato de equipes de apoio ou serviços de emergência.

Já os AV ainda apresentam outras nuances para pessoas com deficiência (PCD), onde o bem-estar é um determinante central da escolha modal. Como apresenta Sharma et al (2025), enquanto para usuários sem deficiência o bem-estar está mais associado a fatores como conforto, custo ou impacto ambiental, para PCD ele se relaciona a preocupações com segurança, dignidade, previsibilidade e controle. Ainda, usuários com deficiências físicas, os veículos devem incorporar soluções de acessibilidade universal, incluindo rampas de embarque, interiores amplos com pontos de ancoragem para cadeiras de rodas, assentos ergonômicos e espaços adequados para cuidadores e cães-guia.

No caso de pessoas com transtornos de saúde mental, o conceito tradicional de acessibilidade mostra-se insuficiente, e adequações ambientais como baixa estimulação sensorial, interfaces homens–máquina personalizáveis, comunicação transparente do sistema, modos silenciosos, tom comunicacional amigável e previsibilidade visual são diferenciais.

O autor destaca que pessoas com deficiências físicas demonstram preferência por táxis autônomos e ônibus autônomos, enquanto indivíduos com condições de saúde mental tendem a favorecer táxis autônomos operados remotamente, uma vez que fatores associados à segurança psicológica, conforto emocional e percepção de controle durante a viagem influenciam tanto quanto questões logísticas.

Este panorama aponta como as tecnologias devem ser consideradas em todas as etapas de planos de mobilidade, como o caso do PLI-SP 2050, e como podem ser decisivas na inclusão ou segregação de parcelas da população.

2.6.15 Zonas de baixa emissão

As Zonas de Baixa Emissão (ZBE) são instrumentos de política pública orientados à qualidade do ar e à saúde, concebidos como áreas urbanas contíguas e geograficamente delimitadas nas quais o acesso e a circulação de veículos são condicionados a critérios ambientais explícitos. Elas surgiram como resposta direta aos elevados níveis de poluição atmosférica urbana e aos impactos associados à saúde pública, iniciados com a restrição à circulação de veículos pesados altamente poluentes, especialmente caminhões comerciais, nos centros urbanos.

Estas zonas se materializam por meio de proibições diretas ou pela cobrança de tarifas para acesso às áreas delimitadas, e passaram a incorporar também veículos leves, considerando

níveis de emissão, padrões tecnológicos e tipos de combustível. Atualmente, tais zonas são frequentemente combinadas com outras medidas de gestão, como a priorização de pedestres, delimitação de zonas pedonais e áreas livres de carros, além de políticas de incentivos econômicos para substituição de frota.

Na região do PLI-SP 2050, o Rodízio Municipal de Veículos de São Paulo constitui instrumento de gestão de demanda de tráfego voltado primordialmente à melhoria das condições de circulação no perímetro do Centro Expandido pela redução do volume de veículos automotores em horários de pico. O rodízio gera efeitos colaterais positivos sobre emissões e consumo de combustível, sem, contudo, incorporar padrões de desempenho veicular, de modo que não se classifica como ZBE. Existe proposta oriunda da consulta pública para o Programa de Metas 2025-2028, PPA e PAS 2026-2029 para transformar o Centro Expandido em ZBE, mas ainda carecem estudos sobre como seria sua viabilização.

2.6.16 Impacto da idade média e fatores de renovação de Frota

Um dos elementos chave na priorização de componentes do PLI-SP 2050 constitui o impacto ambiental do programa em sua íntegra. A potencial substituição do modal rodoviário pelo modal ferroviário ou hidroviário tem por objetivo racionalizar a rede de transporte, reduzir custos logísticos, promover o desenvolvimento de polos regionais e, em paralelo, produzir impactos ambientais importantes, voltados à redução dos gases efeito estufa.

Não obstante, nos termos desenvolvidos no restante deste Produto D-11, os resultados almejados estão condicionados ao perfil de frota substituída, que deverá variar ao longo do horizonte de análise de acordo com variáveis como uso de combustíveis de baixo carbono, eletrificação e mudança no perfil veicular.

A idade da frota é um determinante estrutural das emissões no transporte rodoviário porque combina três efeitos: tecnologias antigas (fases anteriores de controle de emissões) com fatores de emissão muito superiores para NOx e material particulado (MP); uso intensivo, especialmente em caminhões e ônibus, que sustenta elevada quilometragem anual mesmo em idades avançadas; e deterioração e manutenção inadequada, que ampliam o risco de "superemissores" e reduzem o desempenho de sistemas de controle, agravado pela ausência ou insuficiência de programas abrangentes de inspeção ambiental em uso[99].

No Estado de São Paulo, a frota circulante estimada para fevereiro de 2026 inclui 735.588 caminhões e 315.888 ônibus (somando as categorias ônibus e microônibus), em um total de 35.484.973 veículos (todas as categorias)[100]. O inventário estadual aponta que os caminhões são o maior contribuinte de NOx, MP é relevante em CO2 equivalentes, com aproximadamente 19 milhões de toneladas de CO2 equivalentes em um total de aproximadamente 45 milhões de toneladas de CO2 equivalentes. Embora representem fração pequena do total de veículos, o uso intensivo e o perfil a diesel elevam seu impacto. A renovação/focalização em caminhões velhos produz ganhos muito expressivos em poluentes locais (NOx e MP) por unidade substituída, enquanto os ganhos em CO2 equivalentes por troca por veículo diesel novo tendem a ser modestos.

[99] https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2024/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2023.pdf

[100] https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2024/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2023.pdf

Esta seção técnica tem três objetivos operacionais:

- Caracterização da idade da frota no Brasil e no Estado de São Paulo e explicação das razões pelas quais caminhões velhos carregam um "peso emissor" desproporcional, principalmente para NOx e MP.

- Proposição de um método replicável de modelagem de renovação por cortes para projetar renovação e emissões, coerente com metodologias oficiais e de referência, em particular o inventário nacional e CETESB, explicitando premissas e incertezas.

- Quantificar, por simulação ilustrativa, o impacto de cenários de renovação (Tendencial, Acelerado, Direcionado) nos horizontes 2032, 2038, 2043 e 2050, e derivar parâmetros prontos para alimentar os modelos de cenários do D-11.

Como ponto de partida são avaliadas as bases oficiais mensais com frota por Estado e município, considerando o ano de fabricação, publicadas pela SENATRAN[101] (Ministério dos Transportes), que permitem obter a distribuição etária específica do Estado de São Paulo. Nesta seção utiliza-se dados oficiais/estaduais da CETESB para frota e emissões em São Paulo, dados setoriais baseados em registros agregados (Sindipeças/Abipeças) para distribuição etária nacional como proxy; e parâmetros metodológicos e fatores como curvas de sucateamento, intensidade de uso, fatores de emissão e CO2, do inventário nacional ano-base 2024 como referência de modelagem.

O inventário de emissões veiculares de São Paulo utiliza o conceito de frota circulante como "o conjunto de veículos que se estima estarem efetivamente sendo utilizados" — distinta da frota registrada, que não desconta integralmente veículos que saíram de circulação por sucateamento, perda total, entre outros.

Para o ano 2023, a CETESB estima que no Estado de São Paulo circulam 9.913.686 automóveis, 1.631.944 comerciais leves, 453.057 caminhões, 105.175 ônibus e 2.768.216 motocicletas. Apesar de caminhões serem numericamente minoritários, o inventário indica que eles são dominantes em NOx e MP é maior contribuinte de emissões veiculares de GEE no Estado (CO2e), com ordem de grandeza de 19 milhões de tCO2e em 2023.

Este resultado decorre da combinação do combustível diesel, que possui maior intensidade de carbono por km, alta intensidade de uso e, principalmente, presença significativa de veículos em fases antigas de controle e/ou com deterioração/manutenção inadequada, elevando emissões locais e risco de superemissão.

No Brasil, o Anuário do Sindipeças registra para 2023 idade média da frota circulante total de 10 anos e 10 meses, com automóveis (11 anos e 1 mês), comerciais leves (8 anos e 11 meses), caminhões (12 anos e 2 meses), ônibus (11 anos e 4 meses) e motocicletas (8 anos e 4 meses)[102]. Para o Estado de São Paulo, a série oficial de idade média no Plano de Controle de Poluição Veicular (PCPV 2023–2025) da CETESB estabelece valores por tipologia até 2021[103]. Exemplos para caminhões a diesel em 2021 são: semileves 17,8 anos, leves 15,2, médios 17,3, semipesados 11,4 e pesados 9,7. Para ônibus a diesel, em 2021, a idade média dos veículos urbanos era de 12,6, micro-ônibus 11,0 e rodoviários 12,9 anos. O PCPV também registra que,

[101]https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2023/11/DECISAO-DE-DIRETORIA-No-139-2022-E-DE-23-DE-DEZEMBRO-DE-2022.pdf
[102] https://virapagina.com.br/sindipecas2024/62/
[103]https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2023/11/DECISAO-DE-DIRETORIA-No-139-2022-E-DE-23-DE-DEZEMBRO-DE-2022.pdf

em 2021, circulavam no Estado 15,0 milhões de veículos e que 6,9 milhões tinham mais de 10 anos, evidenciando peso relevante de veículos antigos.

Ainda que a "idade média" seja um indicador sintético e possa ocultar caudas longas, ela aponta para o fato de que veículos pesados, caminhões e ônibus, permanecem em faixas etárias elevadas e, portanto, representam forte alavanca de política pública para emissões locais.

A distribuição etária importa porque emissões não crescem linearmente com idade. Em veículos leves, a CETESB mostra que faixas mais antigas podem contribuir com parcela desproporcional das emissões, especialmente quando manutenção é precária e inexiste inspeção ambiental abrangente.

Para caminhões no Brasil, a distribuição reportada indica envelhecimento significativo. 22,9% dos veículos possuem até 5 anos, 48,4% entre 6 e 15 anos, e 28,7% acima de 16 anos. Em outro recorte, 58% dos caminhões tinham mais de 10 anos em 2022. Esse perfil sustenta a relevância de políticas de renovação e focalização em caminhões velhos, sobretudo em usos urbanos/regionais, onde a exposição populacional é maior.

No Estado de São Paulo, além do envelhecimento médio, a CETESB destaca que a renovação de caminhões é mais lenta (comparativamente a ônibus, cujos contratos impõem limites etários), resultando em presença relevante de fases antigas (P4 e anteriores), com maior carga poluidora.

Tabela 2-8: Frotas e indicadores-chave[104]

Indicador	Valor	Observação
Caminhões (frota circulante, SP 2023)	453.057	Inventário CETESB 2023
Ônibus (frota circulante, SP 2023)	105.175	Inventário CETESB 2023
Frota total (todas categorias, SP 2023)	14.872.079	Inventário CETESB 2023
Idade média caminhões (Brasil 2023)	12 anos e 2 meses	Proxy Sindipeças
Distribuição etária caminhões (Brasil 2022)	22,9% (≤5), 48,4% (6–15), 28,7% (≥16)	Proxy Sindipeças/Abipeças

Fonte: CETESB e Sindipeças/Abipeças. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Para realizar a projeção da evolução de emissões por renovação da frota o inventário estadual trabalha com frota circulante (em uso), distinta de frota registrada. Essa distinção é crucial para o D-11 porque cenários de emissões dependem de "o que circula" (atividade e tecnologia), e não apenas do cadastro.

- Coorte é o conjunto de veículos emplacados em um ano-modelo (ou faixa de anos), acompanhados ao longo do tempo. Um modelo stock-flow por coortes permite: (i) converter vendas/entradas em frota circulante; (ii) aplicar curvas de sucateamento (sobrevivência S(t)); (iii) atribuir fatores de emissão por tecnologia (fases) e efeitos de deterioração/uso; e (iv) projetar renovação.

[104] São Paulo, 2023; Brasil, 2023/2022 como proxies.

- Vida útil e sucateamento (S(t)). No inventário nacional, para automóveis/comerciais leves (Otto) e motocicletas utiliza-se função Gompertz, e para veículos do ciclo Diesel (caminhões, ônibus e comerciais leves diesel) utiliza-se função Logística, com parâmetros explícitos.

- Taxa de mortalidade. A taxa de mortalidade anual (probabilidade de saída da frota entre t e t+1) pode ser derivada da curva S(t) como:

$$h_t = 1 - \frac{S_{t+1}}{S_t}$$

Essa taxa é a "alavanca" de políticas de renovação: aumentá-la para idades altas acelera o desaparecimento de tecnologias antigas (maiores emissoras).

O inventário nacional descreve a evolução da frota por aplicação de taxa de sucateamento sobre veículos novos vendidos e apresenta a estrutura de cálculo por ano-modelo. No anexo de parametrização, a função Gompertz é apresentada como:

$$S_t = 1 - \exp(-\exp(a + bt))$$

Como exemplo, utiliza-se a=1,798 e b=-0,096 para automóveis e valores específicos para comerciais leves e motocicletas. Para o ciclo diesel (incluindo caminhões), o inventário nacional adota função logística com parâmetros t_0=19,1 e a=0,08 para caminhões. Usando os parâmetros de caminhões (a=0,08; t0=19,1), obtém-se uma vida média implícita aproximada de 24,5 anos (cálculo por soma/integral discreta de S(t)), e uma taxa de mortalidade que cresce com a idade: da ordem de 2,4%/ano em idades muito baixas para 4–6%/ano em idades acima de 20–35 anos.

Emissões são proporcionais à atividade. O inventário nacional fornece valores de referência de intensidade de uso (km/veículo/ano) por idade e categoria, incluindo caminhões. Para caminhões semipesados e pesados, por exemplo, há valores da ordem de 116 mil km/ano em idade 1 e ainda 88 mil km/ano em idade 20, sugerindo que caminhões velhos podem continuar altamente utilizados. Isso explica por que "caminhões velhos" seguem relevantes: mesmo com alguma redução de uso, os fatores de emissão (NOx/MP) de tecnologias antigas podem ser dezenas de vezes maiores do que tecnologias recentes.

Há dois mecanismos distintos que explicam a mudança nos padrões de emissão:

- Mudança tecnológica (fases PROCONVE): veículos mais novos cumprem limites mais restritivos e têm sistemas de pós‑tratamento que derrubam NOx/MP. O inventário nacional traz fatores de emissão em g/km para caminhões por ano-modelo/fase; por exemplo, para caminhões semipesados/pesados, NOx em torno de 5 g/km em P4/P5 (anos 2006–2011) versus 0,13 g/km em 2023 (P8), e MPcomb em torno de 0,078–0,10 g/km (P4/P5) vs ~0,003 g/km (P8). Se ambos rodam 100.000 km/ano (ordem de grandeza coerente com referência de uso intensivo), um caminhão antigo pode emitir 40 vezes mais NOx do que um caminhão novo (mesma quilometragem). Para MPcomb, a diferença pode ser da ordem de 25 a 35 vezes (ex.: ~0,078–0,10 g/km em P4/P5 vs ~0,003 g/km em P8). Em CO2, por outro lado, a diferença de eficiência (km/L) entre períodos pode ser muito menor: semipesados/pesados passam de 3,45 km/L (até 2011) para 3,61 km/L (2012–2024), e o fator de CO2 do diesel no período recente é 2,63 kg/L. Isso significa

- CO2 por km no antigo ≈ 2,63/3,45 = 0,762 kg/km

- CO2 por km no novo ≈ 2,63/3,61 = 0,729 kg/km

- Redução de apenas ~4,4% em CO2 por km — motivo pelo qual renovação "diesel por diesel novo" é potentíssima para NOx/MP, mas limitada para CO2e sem outras medidas.

- Deterioração por uso/idade: a CETESB registra que, para automóveis (gasolina/etanol), há incrementos médios adicionados aos fatores de emissão a cada 80.000 km para CO, NOx, NMHC e RCHO; porém, não se empregam fatores de deterioração para veículos do ciclo diesel e motocicletas por falta de dados/estudos validados. [31] Essa lacuna reforça a necessidade de sensibilidade e de políticas de inspeção e fiscalização para diesel em uso.

Para a simulação do peso emissor dos caminhões velhos e a magnitude de benefícios de sua renovação natural quando a NOx e MP são consideradas as seguintes premissas para o Estado de São Paulo:

- Frota circulante total de caminhões em 2023: 453.057.

- Composição por subcategoria (2021, proxy estadual): semipesados 116.194 e pesados 147.153 dentro de um total aproximado de 446.801 caminhões.

- Composição tecnológica inicial (proxy por fases do PROCONVE em 2023 para caminhões no estado): 23% antes da fase P5, 26% na fase P5, 41% na fase P7 e 10% na fase P8.

- Curva de sucateamento para caminhões (ciclo diesel): função logística com t0=19,1 e a=0,08.

- Intensidade de uso (VKT) por idade: valores de referência fornecidos pelo inventário nacional para caminhões (incluindo semipesados/pesados), com patamares ainda elevados em idades avançadas.

- Fatores de emissão (g/km) por ano-modelo/fase para caminhões: valores no inventário nacional.

- CO2 por litro e autonomia (km/L): inventário nacional fornece fatores de CO2 (kg/L) e km/L para veículos pesados diesel (semipesados/pesados: 3,45 km/L até 2011; 3,61 km/L de 2012–2024; diesel ~2,63 kgCO2/L no período recente).

Com base nestes parâmetros são traçados os cenários a seguir:

- Cenário Tendencial (renovação natural). Mantém a curva logística de sucateamento do inventário nacional para caminhões e supõe que a melhoria tecnológica ocorre via entrada de veículos novos (padrão P8) ao longo do tempo, sem incentivos adicionais.

- Cenário Acelerado (incentivos amplos). Representa políticas que aumentam a renovação ao reduzir a permanência de veículos (vida efetiva menor), aproximado por deslocamento moderado da curva de sucateamento (ex.: redução de ~2 anos no parâmetro t0, de 19,1 para ~17,1), elevando a taxa anual de reposição.

- Cenário Direcionado (focalização em caminhões velhos e usos urbanos). Representa programas de substituição com foco em caminhões mais antigos (por idade ou por tecnologia), combinando instrumentos regulatórios (restrições de circulação em zonas urbanas, exigências em concessões/contratos) e econômicos (bônus de sucateamento, linhas de crédito, retrofit em transição). A simulação implementa aumento forte de sucateamento em idades altas (ex.: políticas que tornam economicamente e operacionalmente inviável operar veículos acima de 20–25 anos sem retrofit).

A seguir, apresenta-se uma simulação ilustrativa para 267 mil caminhões semipesados + pesados em São Paulo (proxy a partir de composição estadual 2021 e frota total 2023), mantendo atividade total (VKT) constante para isolar efeito tecnológico/renovação para os anos 2033, 2038, 2043, 2050.

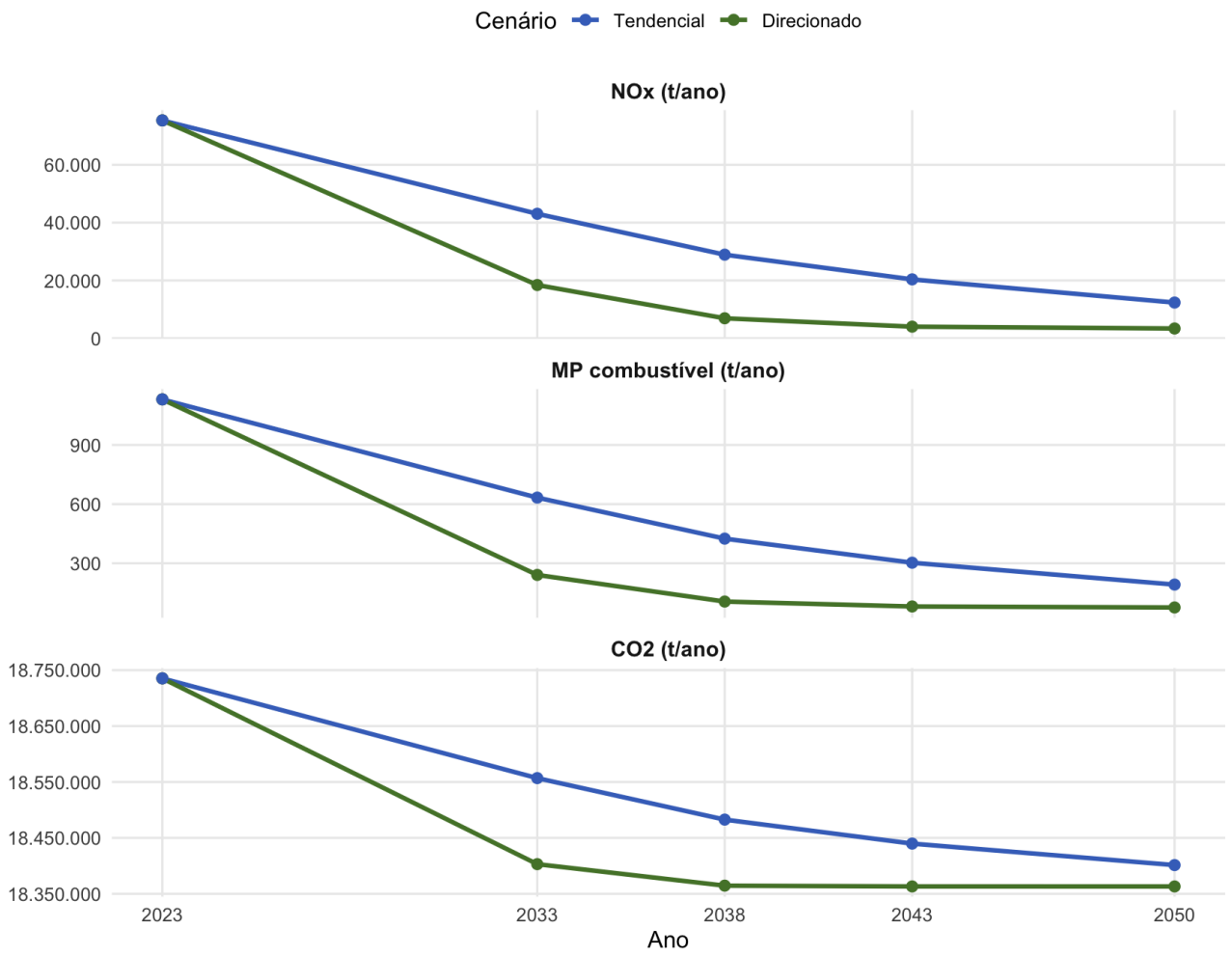
Tabela 2-9: Simulação de redução de emissão de CO2 com substituição de frota por idade

Ano	Cenário	NOx (t/ano)	Redução NOx vs 2023	MPcomb (t/ano)	Redução MP vs 2023	CO2 (t/ano)	Redução CO2 vs 2023
2023	Base	75.362	–	1.131	–	18.735.315	–
2033	Tendencial	43.060	−42,9%	633	−44,0%	18.556.904	−1,0%
2033	Acelerado	41.798	−44,5%	616	−45,5%	18.550.790	−1,0%
2033	Direcionado	18.409	−75,6%	241	−78,7%	18.403.031	−1,8%
2038	Tendencial	28.908	−61,6%	425	−62,4%	18.482.674	−1,3%
2038	Acelerado	27.568	−63,4%	407	−64,0%	18.476.529	−1,4%
2038	Direcionado	6.906	−90,8%	106	−90,6%	18.364.569	−2,0%
2043	Tendencial	20.363	−73,0%	303	−73,2%	18.439.762	−1,6%
2043	Direcionado	4.003	−94,7%	81	−92,8%	18.363.178	−2,0%
2050	Tendencial	12.345	−83,6%	192	−83,1%	18.401.345	−1,8%
2050	Direcionado	3.372	−95,5%	76	−93,3%	18.363.148	−2,0%

Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Na tabela acima, conforme exposto, os fatores de emissão (NOx/MP) por fase/ano-modelo para caminhões estão no inventário nacional e mostram a transição P4/P5 para P7 e posteriormente para P8 com reduções muito expressivas em NOx/MP. A intensidade de uso (km/ano por idade) usada como referência vem do inventário nacional. A parte de CO2 reflete melhoria limitada de km/L na passagem para veículos mais novos (semipesados/pesados 3,45→3,61 km/L) e fator de emissão do diesel (~2,63 kgCO2/L).

Figura 2-14: Evolução das Emissões por Cenário de Renovação de Frota



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Observa-se, como resultado, que a renovação direcionada em caminhões velhos tem potencial de reduzir NOx e MP em 70–95% no recorte de caminhões semipesados+pesados ao longo do horizonte, mesmo sem troca de combustível. Para CO2, o ganho estimado por um veículo novo a diesel novo é pequeno, entre 1 e 2% no horizonte, o que reforça a necessidade de combinar renovação com combustível/tecnologia, biocombustíveis avançados, eletrificação onde aplicável, hidrogênio, quando o objetivo é descarbonização profunda.

Como principais observações, deve-se ter em conta que variações moderadas em parâmetros de sucateamento afetam resultados de NOx/MP de forma tipicamente baixa a moderada no agregado, uma vez que o determinante maior é a diferença de fatores de emissão por tecnologia e a velocidade com que veículos muito antigos desaparecem.

Sobre deterioração/ "superemitters" em diesel, a CETESB explicita que não aplica fatores de deterioração para diesel por falta de dados validados; ao mesmo tempo, reconhece que manutenção inadequada e deterioração avançada agravam poluição local em corredores de ônibus e caminhões. [42] Uma sensibilidade simples, multiplicando fatores de emissão de caminhões antigos por +30%, pode elevar NOx em ~20% e MP em ~23% em horizontes próximos (exemplo ilustrativo), o que reforça o valor de inspeção/fiscalização e integridade dos pós-tratamento.

2.6.17 Estruturação da rede de carregamento elétrico

A criação de uma rede de recarga em rodovias poderá ou não ser uma decisão de mercado ou uma decisão induzida por atores públicos. A implantação acelerada de uma rede com capacidade de dar suporte a uma transição energética relevante envolve coordenação de corredores, padrões mínimos de potência, disponibilidade e pagamento, e a superação de um problema clássico de mercado nascente, qual seja, baixa utilização início, que resulta em receita insuficiente, combinado a elevado custo e prazo de conexão elétrica. *Benchmarks* internacionais mostram que, quando governos destravam a infraestrutura, em geral o fazem de três maneiras: (i) metas obrigatórias e padrões de serviço (ex.: União Europeia e Estados Unidos); (ii) licitações/contratos para cobrir "vazios" de mercado (ex.: Alemanha); e (iii) subsídios direcionados para locais com baixa atratividade econômica (ex.: Noruega)[105].

No Brasil, do ponto de vista regulatório, a recarga pública é tratada como uma atividade permitida a qualquer interessado, com preços livremente negociados, e a regulação federal foca em requisitos de conexão e impacto na rede, não em "conceder" o serviço. Assim, a outorga posta não se vincula à ANEEL como se fosse um serviço público de distribuição. O papel do setor elétrico é garantir regras de acesso e adequação da rede e de relação com a distribuidora.

Neste contexto o Estado de São Paulo pode exercer liderança sobretudo via política pública e via governança de rodovias concedidas, tendo como exemplo a inserção de obrigações em contratos, autorização de ocupação em áreas de serviço e faixa de domínio, padronização, metas e fiscalização. A regulação e fiscalização das rodovias concedidas estaduais é um ativo institucional importante porque alcança mais de 11,7 mil km sob governança da Artesp[106].

A evidência comparada sugere que a infraestrutura de recarga é tratada como um sistema. O sucesso não depende apenas de instalar carregadores, mas de garantir interoperabilidade, confiabilidade, disponibilidade, transparência de preços e capacidade de expansão do "*backhaul* elétrico" (subestações, transformadores e conexões) para evitar congestionamento e filas. Essa lógica aparece tanto em regulações mandatórias quanto em programas de investimento e de contratação pública[107].

- União Europeia: metas mandatórias (AFIR) como "espinha dorsal" de corredores. A União Europeia adotou um regulamento vinculante (AFIR) que exige, por exemplo, a implantação de "pools" de recarga ao longo da rede TEN-T: até 2025, um pool com mínimo de 400 kW a cada 60 km na rede principal, evoluindo para 600 kW e exigência de múltiplos pontos de alta potência; além de metas nacionais proporcionais ao tamanho da frota de veículos elétricos (kW por veículo). O AFIR também reforça requisitos de interoperabilidade e de informação e pagamento ao usuário. A lição principal é que, em corredores, a política pública frequentemente define um nível mínimo de serviço (distância/potência) para evitar "vazios" que travam a adoção.

- O modelo dos Estados Unidos conta com financiamento federal somado ao padrão operacional detalhado (NEVI e 23 CFR 680). O programa federal NEVI provê recursos aos Estados, US$ 1 bilhão ao ano por cinco anos, para estabelecer uma rede conectada e

[105] Deployment of alternative fuels infrastructure | EUR-Lex: https://eur-lex.europa.eu/EN/legalcontent/summary/deployment-of-alternative-fuels-infrastructure.html
[106] CFR § 680.116 - Information on publicly available electric vehicle charging infrastructure locations, pricing, real time availability, and accessibility through mapping. | Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR) | US Law | LII / Legal Information Institute
[107] Outlook for electric vehicle charging infrastructure – Global EV Outlook 2024 – Analysis – IEA: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-electric-vehicle-charging-infrastructure

confiável de recarga. Mais importante que o valor é o padrão mínimo do que será implantado. O regulamento federal exige ao menos quatro portas DCFC, cada uma capaz de entregar 150 kW contínuos simultaneamente em estações de corredor, impõe disponibilidade 24/7 em corredores, exige pagamento sem adesão a planos com método *contactless* e cria métricas duras de qualidade como disponibilidade anual média maior do que 97% por porta, além de obrigações de dados, interoperabilidade e roaming (ex.: OCPP/OCPI e requisitos ISO 15118). Esses elementos tratam diretamente de problemas comuns de fracasso, tais como a rede fragmentada por aplicativos, baixa confiabilidade, preços opacos e baixa disponibilidade operacional[108].

- A Alemanha realizou uma licitação com o objetivo de cobrir "white spots" e garantir operação (Deutschlandnetz). A Alemanha decidiu ir além de subsídios dispersos ao estruturar uma contratação pública em larga escala para construir e operar cerca de 1.000 locais e aproximadamente 9.000 pontos HPC de alta potência, combinando 900 áreas regionais e 200 localizações em rodovias. Há duas lições de desenho: (i) o modelo de licitação busca eliminar "white spots" ao exigir cobertura em áreas menos atrativas, não apenas em locais lucrativos; (ii) o processo adota instrumentos de governança de operação (obrigação contratual de construir/operar) e, em versões reportadas do desenho, inclui mecanismos de política de preço (como teto de preço por kWh nos editais) e pacote de investimento público significativo (ordem de € 2 bilhões anunciada em comunicações do programa). Em termos práticos, a Alemanha tratou recarga como infraestrutura essencial para mobilidade de média/longa distância e usou contratação pública para forçar cobertura[109].

- A Noruega adotou a política de subsídios direcionados para viabilizar locais não lucrativos no início. Este país é referência em adoção de veículos elétricos e entendeu cedo que a recarga rápida fora dos grandes centros poderia ser temporariamente inviável. Um mecanismo citado recorrentemente é o papel da agência Enova em cobrir parte do investimento em carregadores rápidos em municípios com baixa cobertura, com percentuais e tetos de apoio (ex.: cobertura de parte relevante do CAPEX por carregador em áreas de baixa demanda). Em outro exemplo de corredor, há casos de concessão de recursos para instalar dezenas de carregadores em trechos rodoviários, direcionando recursos a gargalos de conectividade entre cidades. A lição é: subsídio por "lacuna de viabilidade" (viability gap funding) pode ser mais eficiente do que subsídio generalizado, desde que atrelado a critérios de desempenho e cobertura[110].

- O Reino Unido desenvolveu um modelo focado no gargalo de rede e desenho de incentivo como risco, sendo uma lição de sucesso apenas parcial. Relatórios oficiais apontam que a implantação de recarga rápida em rodovias e grandes vias pode travar não por falta de tecnologia, mas por capacidade elétrica e prazos de conexão, além de dificuldades de coordenação entre governo, operadores de áreas de serviço e utilities. O National Audit Office descreveu o problema de garantir capacidade elétrica suficiente para a implantação em vias estratégicas e registrou programas públicos, incluindo fundos para apoiar infraestrutura local e fundos anunciados para conexões em rodovias. Os fundos anunciados para recarga rápida em rodovias enfrentaram atrasos, críticas de desenho,

[108] Infrastructure Investment and Jobs Act - National Electric Vehicle Infrastructure (NEVI) Formula Program Fact Sheet | Federal Highway Administration
https://www.fhwa.dot.gov/infrastructure-investment-and-jobs-act/nevi_formula_program.cfm/fact_sheets.cfm
[109] Deutschlandnetz | Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur
https://nationale-leitstelle.de/en/deutschlandnetz/
[110] Enova splashes out on fast charging - Norway Today https://norwaytoday.info/finance/enova-splashes-fast-charging

colapso e necessidade de redirecionamento posterior. A lição é que "fundos para conexão" precisam de governança clara, elegibilidade bem desenhada e alinhamento com contratos de áreas de serviço[111].

- A China possui um programa de eletrificação de frota estabelecido em escala massiva como parte de uma política industrial mais ampla e foco em infraestrutura como base do mercado. A China ampliou rapidamente a infraestrutura de recarga, com números reportados de 12,82 milhões de "charging poles" no fim de 2024, incluindo cerca de 3,58 milhões públicos. Em paralelo, análises internacionais destacam que a China concentra grande parte do estoque global de carregadores públicos e que o crescimento de recarga rápida é parte central do ecossistema[112].

- O modelo dos Países Baixos é caracterizado por concessões locais e padronização do "direito de operar" em espaço público. Em mercados europeus maduros, é comum que municípios ou regiões realizem licitações para concessão de direito de instalar e operar carregadores em ativos públicos como ruas, estacionamentos públicos, garagens e outros. Um exemplo recente descreve concessão regional para instalação e operação de até 1.000 pontos em garagens municipais por horizonte plurianual[113].

As lições dos benchmarks internacionais são de relevância ímpar para o Governo do Estado de São Paulo. Em corredores rodoviários, há cinco gargalos recorrentes.

- O primeiro é cobertura e capilaridade mínima, de forma a evitar trechos longos sem recarga, frequentemente tratada com metas de distância/potência (ex.: 60 km no AFIR, 24/7 e potência mínima em NEVI).

- O segundo é confiabilidade e experiência do usuário: requisitos como uptime (97% no padrão federal americano), preço exibido antes da sessão, pagamento sem assinatura e interoperabilidade de rede (OCPP/OCPI/ISO 15118) aparecem como resposta a falhas de mercado onde redes privadas fragmentadas geram "fricção" e desconfiança.

- O terceiro é custo e prazo de conexão elétrica, particularmente em recarga rápida e hubs de alta potência. O caso britânico mostra que, mesmo quando existe intenção de financiar upgrades, podem ocorrer atrasos e falta de conversão em entrega se o mecanismo não estiver alinhado com a realidade contratual e com as concessionárias/operadores locais.

- O quarto é economia do investimento no começo do mercado. Estudos de referência de custos indicam que um ponto DCFC 150 kW pode ter custo de hardware e instalação da ordem de US$ 69 mil somados a US$ 36 mil por porta, e que a utilização típica assumida para DCFC público pode estar na casa de 8% em cenários "atuais", o que eleva o custo por kWh entregue se não houver volume de uso relevante. Isso explica por que países

[111] A picture of the National Audit Office logo https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2024/12/public-chargepoints-for-electric-vehicles.pdf
[112] China sees robust increase in electric vehicle charging facilities https://english.www.gov.cn/archive/statistics/202501/28/content_WS6798b11ac6d0868f4e8ef3e4.html
[113] Qwello wins North Holland contract for up to 1,000 charge points - electrive.com https://www.electrive.com/2025/05/12/qwello-wins-north-holland-contract-for-up-to-1000-charge-points

com bons resultados usam leilões com obrigação de operar (Alemanha) ou subsídios de viabilidade (Noruega)[114].

- O quinto é equidade territorial. a tendência do mercado é instalar primeiro onde há maior fluxo e renda. Quando a política requer cobertura em áreas médias, rodovias secundárias e regiões menos densas, torna-se necessário o estabelecimento de mecanismos explícitos para que o operador aceite o investimento, tais como pacote de lotes, subsídio ou obrigação em contrato de concessão[115].

Do ponto de vista do setor elétrico brasileiro, a ANEEL considerou a recarga pública como atividade regulada de forma mínima, com foco em evitar impactos indesejáveis na rede e em evitar que tarifas reguladas dos consumidores sejam afetadas quando distribuidoras atuem em recarga. A agência também explicita que é "permitida a qualquer interessado" a realização de atividades de recarga, inclusive exploração comercial com preços livremente negociados, e que a regulação anterior específica (REN 819/2018) foi consolidada/absorvida na REN 1.000/2021, que contém capítulo específico sobre instalações de recarga (comunicação à distribuidora em caso de nova conexão, aumento/redução de carga, alteração de nível de tensão; e condições para equipamentos e funcionamento)[116].

Isso gera, como consequência institucional, a inexistência de outorga setorial de energia para operação de carregadores como se estes fossem distribuição de energia. O operador de estação de recarga atua como um agente econômico que instala equipamento e presta serviço, observando regras de conexão e obrigações técnicas. A porta de entrada regulatória compreende (i) cumprir requisitos técnicos e de conexão definidos na relação com a distribuidora (REN 1.000/2021), incluindo comunicação prévia quando aplicável; e cumprir licenças e autorizações de uso do solo e de instalação (município, segurança, normas técnicas).

O Estado de São Paulo, pela via do transporte rodoviário, possui instrumentos diretos para viabilizar rede em corredores. A regulação e fiscalização das rodovias concedidas estaduais, exercida pela Artesp cobre mais de 11,7 mil km de rodovias concedidas e envolve contratos onde o poder concedente define requisitos de serviço, investimentos e obrigações do concessionário. Em outras palavras, se a política pública for usar áreas de serviço, postos e faixas de domínio das concessões como locais preferenciais para recarga, o Estado pode: exigir infraestrutura mínima por contrato em relicitações ou em reequilíbrios, autorizar e padronizar instalações em ativos concedidos, e fiscalizar desempenho e disponibilidade de serviço associado ao usuário da rodovia. Complementarmente, há rodovias federais concedidas em São Paulo, cuja regulação é exercida pela ANTT.

Do ponto de vista de política pública, o Estado poderá atuar via incentivos financeiros (fundos, crédito, garantias); incentivos tributários e simplificação de licenciamento; e coordenação de planejamento de rede com distribuidoras e com o setor de infraestrutura. A exigência, como exemplo, de um posto a cada 100 km é menos densa que padrões europeus recentes, que

[114] https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-03/2024.03.18%20NREL%20LBNL%20Kevala%20DOE%20Multi-State%20Transportation%20Electrification%20Impact%20Study%20FINAL%20DOCKET.pdf

[115] Deutschlandnetz: Federal Transport Minister Scheuer presents 1,000 locations for fast charging points and pricing model - NOW GmbH https://www.now-gmbh.de/en/news/pressreleases/deutschlandnetz-federal-transport-minister-scheuer-presents-1000-locations-for-fast-charging-points-and-pricing-model/

[116] https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html

considera 60 km na TEN-T para recarga de veículos leves, com potência agregada mínima, mas pode ser parametrizado como um patamar inicial razoável para uma rede mínima em um território vasto e heterogêneo, desde que os postos sejam dimensionados para evolução e que existam regras de desempenho e confiabilidade.

A título meramente ilustrativo, a adoção de um padrão de posto rodoviário de recarga inspirado em requisitos mínimos de corredor usados em benchmarks (NEVI), por serem objetivos e auditáveis, envolvem a estação com ao menos 4 portas DCFC com potência contínua mínima de 150 kW cada, capacidade de atender 4 veículos simultaneamente, e metas de confiabilidade, com uptime anual maior do que 97% e de transparência/pagamento, pois esses requisitos atacam diretamente o risco de reputação e o risco de fragmentação.

Além do mínimo, recomenda-se que a especificação paulista para rodovias inclua desde o início infraestrutura elétrica preparada para expansão; layout com pelo menos uma vaga "pull-through" quando houver perfil provável de veículos com reboque/serviço; cobertura/segurança/iluminação; e exigência de dados de disponibilidade em tempo real (para navegação e gestão), porque esses elementos são recorrentes nos padrões federais de boa prática.

Uma simulação financeira de implantação de um posto a cada 100 km nas rodovias do Estado resulta em um dimensionamento preliminar de custos de investimentos envolvidos na transição energética.

- Seleção de rodovias: Como base mensurável e institucionalmente governável, a simulação tomou por base a extensão aproximada de 11,7 mil km de rodovias concedidas sob regulação estadual. Isso exclui rodovias federais relevantes, rodovias estaduais não concedidas e rodovias vicinais municipais. Contudo, constitui um ponto de partida operacional para um programa liderado pelo Estado.

- Regra de espaçamento. Um posto a cada 100 km significa, na aproximação mais simples, cerca de 1 estação por 100 km de extensão linear. Na prática, ao tratar rodovias por corredores distintos e não como "um único fio", o número real tende a ser significativamente maior por efeito de rodovias duplicadas, pontas e ramificações. Para refletir o efeito "corredores múltiplos", várias rodovias separadas, recomenda-se aplicar um fator de ajuste por pontas e ramificações. Assim, o intervalo operacional será de aproximadamente 200 a 250 postos.

- Padrão de estação e custo unitário. Para CAPEX, usam-se custos de referência internacionais de tabela de premissas de estudo técnico para DCFC de 150 kW considerando o custo com hardware de US$ 69 mil por porta e instalação de US$ 36 mil por porta;

- A estação padrão adotada é de 4 carregadores de 150 kW, portanto o custo direto de hardware mais instalação é de US$ 420 mil, sem contabilizar terrenos, obras civis, transformador, cabine, cobertura, telecom, projeto e eventuais upgrades da rede de distribuição. A taxa assumida de conversão cambial é de R$ 5,0 para US$ 1. Face às evidências de que gargalos de conexão e custos de infraestrutura além do equipamento são relevantes (e podem travar programas), o CAPEX deve ser tratado como faixa e não como ponto. O CAPEX por ponto deverá variar, portanto, de R$ 4,5 a R$ 8,5 milhões, sendo utilizado o custo médio de R$ 6,5 milhões por estação.

- Utilização e risco de demanda. Para representar utilização inicial, adota-se como referência que estudos nacionais nos EUA trabalham com utilização típica de DCFC público

em torno de 8% (tabela de premissas do setor energético), o que é coerente com a realidade de corredores em estágio inicial de adoção.

As considerações acima consolidam uma perspectiva de investimento de R$ 1,65 a R$ 2,00 bilhões para implantação da rede de recarga nas rodovias concedidas pela ARTESP. Esses valores dão uma ordem de grandeza plausível para um programa estadual-rodoviário de recarga rápida em corredores, antes de considerar eventuais sinergias (uso de áreas já eletrificadas, contratos de conexão em pacote, padronização de projeto) ou custos adicionais (aquisição de terrenos quando não houver área pública/concedida disponível).

A economia de um "posto rodoviário" é altamente sensível a utilização e a tarifas/encargos elétricos. Para mostrar isso de forma transparente, usa-se aqui um cálculo simplificado de energia anual entregue:

Energia anual (kWh/ano) ≈ Potência total (kW) × 8.760 × fator de utilização.

- Para 4×150 kW: potência total = 600 kW. Com 8%: energia ≈ 600 × 8.760 × 0,08 = 420.480 kWh/ano. Com 15%: 788.400 kWh/ano. Esses fatores são consistentes com premissas de utilização usadas em estudos de custo de recarga.

Estes investimentos per si não representam custos disruptivos para um planejamento amplo de eletrificação de frota. Contudo, podem representar custos importantes caso um investidor privado interessando não encontre perspectiva de uso com escala suficiente para justificar o investimento. Em rodovias principais, a utilização tende a subir mais rápido, reduzindo o custo por kWh e aproximando viabilidade privada.

Em rodovias de menor fluxo, contudo, a utilização pode permanecer baixa por mais tempo. Sem mecanismos compensatórios os operadores tenderão a atrasar a implantação, criando um impedimento para o avanço do programa de eletrificação de frota. Assim, os casos descritos, em particular os programas como AFIR/ Deutschlandnetz/Enova tornam-se paradigmáticos sobre as alternativas de políticas públicas.

Em síntese, a simulação indica que o investimento não deve ser entendido como um gasto para compra de carregadores, mas como um desenho de política para reduzir custo de capital, garantir conexão, mitigar subutilização inicial e impor padrão de serviço. O padrão de confiabilidade, por exemplo, é um ponto central: a exigência de mais de 97% de disponibilidade em um benchmark regulatório transforma "carregador instalado" em "serviço de recarga entregue".

A experiência internacional sugere que a estratégia mais robusta é combinar três camadas: (i) obrigação/nível de serviço em corredores, (ii) instrumentos financeiros para "fechar a conta" em locais não atrativos, e (iii) padrões mínimos de interoperabilidade, dados e confiabilidade.

- Camada de obrigação: tornar a rede "inevitável" onde o mercado não coordena. São Paulo pode adotar, em suas concessões (e em novas licitações), exigência progressiva de recarga rápida em áreas de serviço e pontos estratégicos, com espaçamento máximo (100 km) e requisitos mínimos de potência por local — analogamente ao que AFIR faz (60 km, com potência agregada mínima) e ao que NEVI específica como padrão de corredor (mínimo de portas e potência). A vantagem do veículo contratual (concessão) é que ele permite exigir implantação e operação com prazos e métricas de desempenho.

- Camada financeira: investir onde o risco está, não aonde o mercado já iria. O maior candidato a investimento público não é necessariamente o carregador, mas sim:

    - conexão e upgrades elétricos (subestações/ramais);

- viabilização de "white spots" em rodovias médias;
- financiamento de longo prazo (redução do custo de capital).

- O caso britânico mostra que o gargalo de capacidade elétrica em vias estratégicas é real e que programas específicos tentaram endereçar "future-proofing" de conexões. A Alemanha escolheu licitação em larga escala para fechar lacunas e a Noruega usou subsídios direcionados para lugares onde recarga rápida seria temporariamente deficitária.

- Camada de padrão e governança do serviço: evitar fragmentação. Uma rede rodoviária só funciona bem se o usuário puder carregar "sem surpresa": pagamento simples, preço transparente, disponibilidade confiável e interoperabilidade de informação. Benchmarks regulatórios detalham requisitos mínimos (preço exibido antes, proibição de exigir membership, pagamento contactless, dados para mapas/capacidade de roaming e padrões de protocolo). Um programa paulista pode "tropicalizar" esses requisitos como padrão contratual para concessões e como diretriz para convênios/incentivos, evitando que recursos públicos gerem redes "fechadas" e pouco confiáveis.

Considerando quanto exposto, o Estado de São Paulo pode assumir quatro funções concretas:

- Planejador de rede e definidor de nível de serviço: publicar um "Plano Estadual de Corredores de Recarga" com alvo de espaçamento (100 km), potência por local (mínimo e expansão), e requisitos de confiabilidade e dados, inspirado em boas práticas internacionais.

- Contratante/indutor por concessões: inserir obrigação de implantação/operar recarga rápida em contratos de rodovias concedidas e fiscalizar cumprimento via Artesp, que já tem mandato de regulação/fiscalização de rodovias concedidas.

- Cofinanciador de conectividade elétrica e de "white spots": estruturar apoio público (subsídio ou financiamento) para custo de conexão e para eixos de menor tráfego, com cláusulas de desempenho (uptime, capacidade, preço transparente).

- Coordenador institucional com setor elétrico e municípios: promover instâncias de coordenação com distribuidoras e licenciadores para acelerar prazos e padronizar projetos, considerando que a regulação federal já define a obrigação de comunicação e critérios de adequação de rede quando se instala estação de recarga.

2.6.18 Implicações para cenários futuros

O modal rodoviário ocupa posição singular na construção de cenários prospectivos para o Estado de São Paulo e para o Brasil, uma vez que combina elevada capilaridade territorial, grande diversidade de usos e forte dependência tecnológica, energética e regulatória. Diferentemente de outros modais, sua transformação futura não depende de uma única rota tecnológica dominante, mas da coexistência de diferentes soluções aplicáveis a segmentos distintos, como automóveis, motocicletas, ônibus, veículos comerciais leves, caminhões de média e longa distância e frotas de serviços públicos e urbanos.

Essa heterogeneidade implica que a transição do setor tenderá a ocorrer de forma desigual, com ritmos distintos conforme o tipo de veículo, a finalidade de uso, a renda dos usuários, a disponibilidade de infraestrutura e o ambiente regulatório.

No horizonte do PLI-SP 2050, a eletrificação tende a se consolidar como a principal trajetória de descarbonização para parte relevante do transporte rodoviário, sobretudo em segmentos de veículos leves, frotas urbanas e serviços com rotas mais previsíveis. Em cenários de transição mais acelerada, a expansão dos veículos elétricos pode reduzir significativamente as emissões locais, o ruído urbano e o consumo energético do setor, além de estimular ganhos de eficiência operacional.

Contudo, a velocidade dessa difusão dependerá da superação de restrições importantes, como o alto custo inicial dos veículos, a concentração espacial da infraestrutura de recarga, a necessidade de reforços no sistema elétrico e a formulação de políticas estáveis de incentivo à demanda, à produção local e à implantação de eletropostos.

Nesse processo, o Estado de São Paulo apresenta vantagens relativas importantes, como maior densidade econômica, concentração da indústria automotiva, maior presença de infraestrutura de recarga e maior capacidade institucional para estruturação de políticas e projetos piloto. Ainda assim, mesmo em cenários otimistas, a eletrificação não deverá ocorrer de forma homogênea no território. A tendência é que sua adoção seja mais rápida em áreas metropolitanas, corredores concessionados e frotas empresariais ou públicas, enquanto regiões de menor renda, áreas rurais e corredores secundários poderão apresentar transição mais lenta, preservando por mais tempo a dependência de motores a combustão ou de soluções híbridas.

Para o transporte pesado de cargas e para aplicações de longa distância, os cenários futuros tendem a ser mais diversificados. Embora a eletrificação por baterias possa avançar em nichos específicos, especialmente em logística urbana, distribuição regional e operações com rotas previsíveis, outras soluções energéticas devem manter relevância no médio prazo. O biometano desponta como alternativa particularmente promissora no contexto paulista e nacional, dadas as vantagens associadas à disponibilidade de matéria-prima, à experiência já em curso com projetos-piloto e à maior aderência operacional em segmentos pesados.

De forma complementar, veículos a célula de combustível abastecidos com hidrogênio e, em menor medida, e-fuels, podem compor cenários tecnológicos de transição para rotas de longa distância e operações intensivas, embora ainda condicionados por desafios de custo, escala e infraestrutura de abastecimento.

Além da transição energética, os cenários futuros do rodoviário serão fortemente influenciados pela digitalização do sistema de mobilidade e logística. Ferramentas como Mobility-as-a-Service (MaaS), Vehicle-as-a-Service (VaaS), Battery-as-a-Service (BaaS), Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), pedágio eletrônico free flow, detecção automática de incidentes, pesagem dinâmica em velocidade e integração de dados operacionais tendem a ampliar a eficiência do uso da infraestrutura existente, reduzir tempos de viagem, melhorar a gestão do tráfego e aumentar a produtividade logística. Em cenários mais avançados, a crescente integração entre veículos, infraestrutura e plataformas digitais poderá alterar não apenas a operação do sistema, mas também os próprios modelos de negócios e a relação entre usuários, operadores e poder público.

No campo da segurança viária, tecnologias como ADAS, C-ITS e, em horizonte mais longo, veículos autônomos, tendem a ganhar centralidade na transformação do modal rodoviário. Em um cenário incremental, a difusão de sistemas avançados de assistência ao condutor pode gerar reduções importantes de acidentes, fatalidades e custos sociais associados ao trânsito, especialmente se acompanhada por melhorias na sinalização, padronização da infraestrutura e modernização regulatória.

Em cenários mais transformadores, a comunicação cooperativa veículo-infraestrutura e o uso seletivo de automação em corredores logísticos, áreas urbanas específicas ou ambientes

controlados podem abrir novas possibilidades de operação, com ganhos de segurança, eficiência energética e confiabilidade. Entretanto, a disseminação mais ampla dessas tecnologias dependerá de avanços em cibersegurança, interoperabilidade, qualidade da infraestrutura digital, aceitação social e adaptação do marco regulatório.

A evolução do transporte rodoviário também terá implicações relevantes sobre o sistema elétrico e sobre a infraestrutura urbana e rodoviária. Em cenários de elevada penetração de veículos elétricos, a demanda adicional por energia exigirá planejamento integrado entre transportes e setor elétrico, com reforços em redes de distribuição, maior uso de carregamento inteligente, desenvolvimento de smart grids e eventual adoção de soluções como vehicle-to-grid (V2G). Esses elementos podem transformar a frota eletrificada de mero consumo adicional em ativo energético distribuído, contribuindo para o balanceamento de carga, a integração de renováveis e a resiliência do sistema. No entanto, tais benefícios dependerão de forte coordenação institucional, de regulação adequada e de investimentos em infraestrutura física e digital.

Do ponto de vista territorial e social, os cenários futuros do rodoviário não podem ser avaliados apenas por critérios de eficiência tecnológica ou redução de emissões. A acessibilidade econômica e a equidade de acesso constituem dimensões centrais da trajetória futura do setor. Há risco de que a transição energética e digital ocorra de forma concentrada nos segmentos de maior renda, em grandes centros urbanos e em frotas corporativas, ampliando desigualdades regionais e sociais caso não sejam implementados instrumentos de inclusão, financiamento e regulação apropriados.

Da mesma forma, tecnologias como ADAS e veículos autônomos podem gerar ganhos expressivos de acessibilidade para idosos, pessoas com deficiência e grupos com restrições de mobilidade, mas esses benefícios dependerão do desenho inclusivo das soluções adotadas e de sua acessibilidade econômica.

No âmbito ambiental e regulatório, a adoção de instrumentos como Zonas de Baixa Emissão, restrições ambientais seletivas e políticas de renovação de frota poderá reconfigurar o uso do espaço viário, influenciar decisões de investimento e acelerar a substituição tecnológica em áreas urbanas densas. Em cenários de maior ambição climática, essas medidas podem reforçar a convergência entre descarbonização, melhoria da qualidade do ar e reorganização da mobilidade urbana. Já em cenários mais conservadores, a ausência de coordenação regulatória e de incentivos adequados pode prolongar a convivência de tecnologias mais poluentes com padrões operacionais pouco eficientes.

Tabela 2-10: Síntese das principais tecnologias para cenários futuros - Modal rodoviário

Vetor tecnológico	Escala de imapcto	Horizonte temporal*
Eletrificação de veículos leves	Estadual	Curto a médio prazo (2028–2043)
Eletrificação de ônibus	Local	Curto a médio prazo (2028–2043)
Eletrificação de caminhões e veículos pesados	Nacional	Médio a longo prazo (2033–2050)
Baterias avançadas, incluindo estado sólido	Global	Médio a longo prazo (2033–2050)
Infraestrutura de recarga e carregamento inteligente	Estadual	Curto a médio prazo (2028–2043)

Vetor tecnológico	Escala de imapcto	Horizonte temporal*
Smart grids e V2G	Estadual	Médio a longo prazo (2033–2050)
Biometano	Nacional	Curto a médio prazo (2028–2043)
Hidrogênio em célula a combustível	Nacional	Médio a longo prazo (2033–2050)
E-fuels	Global	Longo prazo ou pós-PLI (2043–após 2050)
ADAS	Nacional	Curto prazo (até 2033)
ITS, DAI, free flow e HS-WIM	Regional	Curto prazo (até 2033)
C-ITS e V2X	Regional	Médio prazo (2033–2043)
Veículos autônomos	Local	Longo prazo ou pós-PLI (2043–após 2050)
Platooning	Local	Médio a longo prazo (2033–2050)
MaaS, VaaS e BaaS	Local	Curto a médio prazo (2028–2043)
Zonas de Baixa Emissão	Local	Médio prazo (2033–2043)

*Nota: * Os horizontes indicam o período provável de adoção comercial relevante e de difusão da tecnologia no modal rodoviário, e não sua data de surgimento ou de realização dos primeiros projetos-piloto. Foram considerados os marcos temporais do PLI-SP 2050: curto prazo = até 2033; médio prazo = de 2033 a 2043; longo prazo = de 2043 a 2050; e horizonte pós-PLI = após 2050. Tecnologias classificadas em mais de um horizonte podem apresentar adoção inicial em nichos, frotas cativas ou corredores específicos antes de sua disseminação em maior escala. Fonte: Estudos mercadológicos.*

Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Dessa forma, os cenários futuros do transporte rodoviário no PLI-SP 2050 podem ser organizados em torno de três trajetórias gerais. Em um cenário tendencial, predominam melhorias incrementais de eficiência, renovação parcial da frota convencional, adoção limitada de eletrificação e digitalização concentrada em nichos.

Em um cenário acelerado, observa-se expansão mais robusta da eletromobilidade em veículos leves, ônibus e frotas urbanas, aumento do uso de biometano e digitalização crescente da gestão viária e logística. Em um cenário direcionado, a eletrificação se dissemina amplamente, combinada com infraestrutura inteligente, integração energética, maior automação, políticas de equidade e reconfiguração regulatória do uso do sistema viário. A materialização de cada uma dessas trajetórias dependerá, em última instância, da capacidade de coordenação entre políticas industriais, energéticas, ambientais, urbanas, logísticas e de inovação.

3 IMPACTOS DA ADOÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A adoção das tecnologias e fontes de energia analisadas nos capítulos anteriores pode modificar os custos e o desempenho ambiental do sistema de transportes. Seus efeitos variam conforme o modo, o tipo de operação, o ritmo de renovação dos ativos e a disponibilidade da infraestrutura necessária. Avaliar essas diferenças é fundamental para construir hipóteses consistentes para os cenários futuros do PLI-SP 2050.

Este capítulo examina os qualitativamente os potenciais impactos econômicos dessas transformações e suas implicações para as emissões de gases de efeito estufa. A análise considera os investimentos e custos operacionais associados às alternativas tecnológicas, bem como os parâmetros utilizados para estimar as emissões do transporte de passageiros e cargas, fornecendo subsídios para a comparação dos cenários nos produtos subsequentes.

3.1 Impactos econômicos

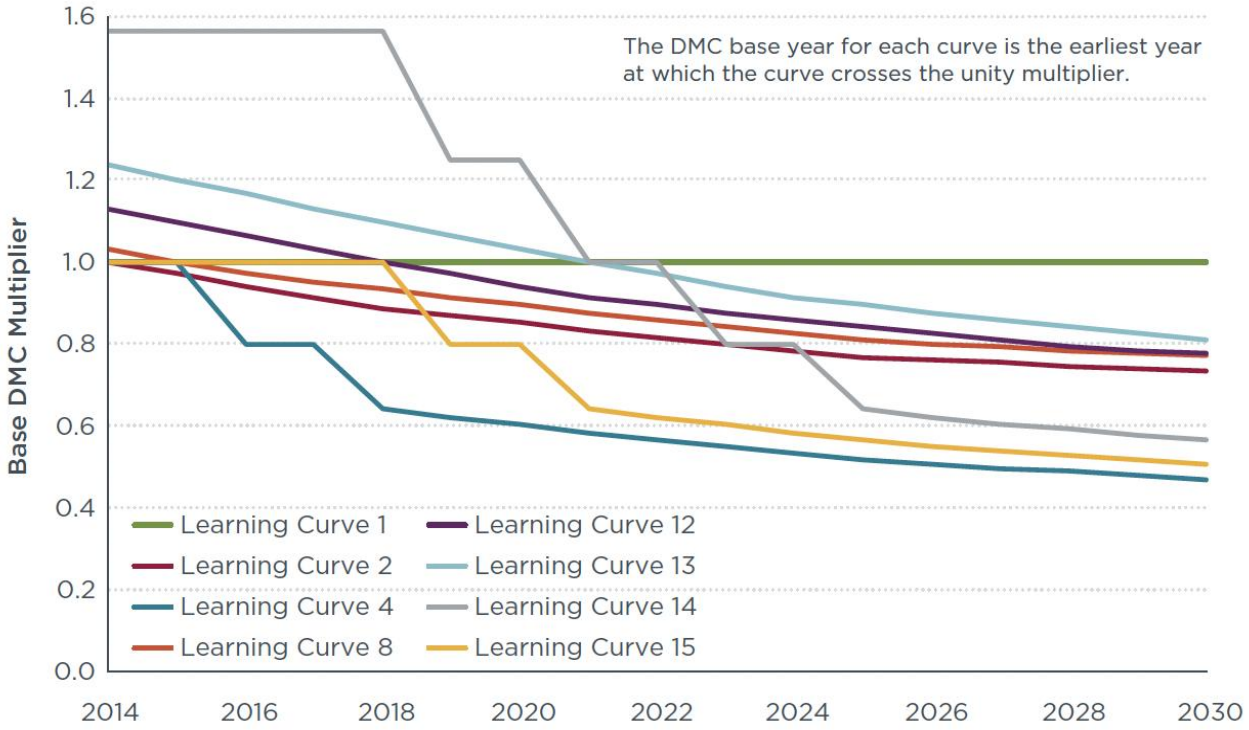
A adoção de novas tecnologias energéticas e operacionais nos sistemas de transporte e logística exerce impactos econômicos relevantes que se manifestam de forma diferenciada ao longo do tempo, entre modais e conforme o grau de maturidade tecnológica, institucional e regulatória. No horizonte do PLI-SP 2050, tais impactos não se limitam à comparação direta de custos unitários entre tecnologias alternativas, mas envolvem transformações estruturais nos padrões de investimento, nos custos operacionais, na competitividade modal, na organização das cadeias logísticas e no papel relativo do investimento público e privado em infraestrutura.

Do ponto de vista analítico, a avaliação econômica dessas transformações exige uma abordagem dinâmica, que considere não apenas os custos iniciais de implantação (CAPEX), mas também os custos operacionais e de manutenção (OPEX), o custo total de propriedade ao longo do ciclo de vida dos ativos (*Total Cost of Ownership* – TCO), os efeitos de aprendizado e escala, bem como os riscos regulatórios e de coordenação associados à difusão tecnológica. Nesse contexto, os impactos econômicos da transição energética e da incorporação de novas tecnologias nos transportes devem ser compreendidos como trajetórias, e não como mudanças discretas ou instantâneas.

Um primeiro vetor central de impacto econômico refere-se ao perfil de investimentos requerido pelas novas tecnologias. De maneira geral, tecnologias em estágios iniciais ou intermediários de maturidade apresentam custos de capital significativamente mais elevados do que as soluções convencionais baseadas em combustíveis fósseis, refletindo a ausência de economias de escala consolidadas, incertezas tecnológicas e riscos regulatórios. Esse padrão é particularmente evidente em soluções como eletrificação pesada em determinados modais, uso de hidrogênio de baixo carbono, combustíveis sintéticos e sistemas avançados de automação e digitalização integrados.

Por outro lado, a literatura econômica e a evidência empírica internacional indicam que esses custos tendem a declinar de forma não linear ao longo do tempo, ou seja, seu custo tende a reduzir cada vez mais rápido ao longo do tempo, à medida que ocorre aprendizado tecnológico, padronização de equipamentos, expansão da base instalada e amadurecimento dos marcos regulatórios. Curvas de aprendizado observadas em setores como energia solar, eólica e baterias sugerem reduções de custo da ordem de 15% a 30% a cada duplicação da capacidade acumulada, padrão que começa a se reproduzir, ainda que de forma heterogênea, em aplicações no setor de transportes.

Figura 3-1: Curvas de aprendizado de custo direto de manufatura para reduções de custo de tecnologia ao longo do tempo



Fonte: Meszler et al.: European Heavy-Duty Vehicles: Cost-effectiveness of Fuel efficiency Technologies for Long-Haul Tractor-Trailers in The 2025-2030 Timeframe (2018).

Esse comportamento implica que os impactos econômicos das novas tecnologias diferem substancialmente entre o curto, o médio e o longo prazo. Nos primeiros anos, a incorporação tecnológica tende a pressionar os custos médios do sistema, exigindo maior esforço de investimento e, em alguns casos, apoio público ou mecanismos de mitigação de risco. Em horizontes mais longos, entretanto, a convergência de custos operacionais mais baixos e ganhos de eficiência tende a compensar, total ou parcialmente, os custos iniciais mais elevados.

Além do investimento inicial, os impactos econômicos mais persistentes decorrem das alterações nos custos operacionais dos sistemas de transporte. Tecnologias associadas à eletrificação, ao uso de biocombustíveis avançados e à digitalização das operações apresentam, em geral, potencial significativo de redução de OPEX, seja por menor custo energético por unidade transportada, seja por ganhos de eficiência operacional, redução de falhas e menor necessidade de manutenção corretiva.

No transporte ferroviário e hidroviário, por exemplo, a eletrificação e a adoção de sistemas híbridos tendem a reduzir custos variáveis associados a combustível e manutenção, ao mesmo tempo em que aumentam a previsibilidade operacional. No transporte rodoviário, embora a eletrificação plena de veículos pesados ainda enfrente desafios econômicos e de infraestrutura, observa-se potencial relevante de redução de custos operacionais em aplicações específicas, como distribuição urbana e regional, especialmente quando combinada com ganhos de eficiência logística e gestão de frotas baseada em dados.

No modal aeroviário e nas operações aeroportuárias, os impactos econômicos da transição tecnológica manifestam-se de forma particularmente clara por meio da digitalização, automação e uso de inteligência artificial. Esses vetores não apenas reduzem custos diretos, como combustível e manutenção, mas também custos indiretos associados a atrasos, cancelamentos, uso ineficiente da frota e gargalos operacionais. Estudos internacionais apontam que ganhos

acumulados de 10% a 20% nos custos totais de manutenção e operação são plausíveis em horizontes de médio prazo para operadores com elevado grau de maturidade digital[117] [118] [119].

Quando analisados sob a ótica do custo total de propriedade, esses ganhos operacionais assumem papel central na avaliação econômica das novas tecnologias. Em muitos casos, tecnologias com CAPEX inicial mais elevado tornam-se economicamente competitivas ao longo do ciclo de vida do ativo, sobretudo em cenários de aumento do preço relativo dos combustíveis fósseis, internalização de custos ambientais e maior exigência regulatória.

Os efeitos econômicos da adoção de novas tecnologias refletem-se, ainda, nos preços finais dos serviços de transporte, tarifas de passageiros e fretes de carga, e consequentemente, na competitividade relativa entre modais. No curto prazo, a incorporação de tecnologias mais custosas pode gerar pressões pontuais sobre tarifas e fretes, especialmente em segmentos nos quais a repasse de custos é mais direto e a sensibilidade do consumidor a variações no preço, elasticidade-preço da demanda, é elevada.

Entretanto, no médio e longo prazo, os ganhos de eficiência operacional, a redução de custos variáveis e a maior confiabilidade dos serviços tendem a produzir efeitos compensatórios, mitigando pressões tarifárias e, em alguns casos, reduzindo o custo logístico total das cadeias produtivas. Esse efeito é particularmente relevante em sistemas logísticos integrados, nos quais atrasos, ineficiências e incertezas representam parcela significativa do custo econômico total, mesmo quando os custos diretos de transporte são relativamente baixos.

Esses impactos econômicos variam conforme a trajetória tecnológica adotada. No cenário Tendencial, no qual a incorporação tecnológica ocorre de forma lenta e limitada, os custos permanecem mais próximos aos padrões atuais, mas o sistema torna-se mais vulnerável a choques de preços energéticos, restrições ambientais e perda de competitividade relativa. No cenário Acelerado, a adoção gradual de novas tecnologias tende a estabilizar custos ao longo do tempo, com ganhos incrementais de eficiência. Já no cenário direcionado, embora o esforço de investimento inicial seja maior, os ganhos estruturais de eficiência e confiabilidade tendem a reduzir o custo logístico sistêmico no longo prazo.

Outro impacto econômico central da transição tecnológica nos transportes refere-se à redefinição do papel do investimento público e privado. A incorporação de novas tecnologias frequentemente requer investimentos em infraestrutura complementar, redes elétricas, pontos de abastecimento, sistemas digitais, adaptação de terminais e interfaces multimodais, cujo retorno econômico depende fortemente de coordenação entre agentes, previsibilidade regulatória e escala de adoção.

Nesse contexto, o investimento público assume papel estratégico como indutor e coordenador, reduzindo riscos iniciais e viabilizando a entrada do investimento privado. Instrumentos como concessões, parcerias público-privadas, contratos de longo prazo e mecanismos de

[117] McKinsey & Company (2024). Aircraft MRO 2.0: The digital revolution. Disponível em: https://www.mckinsey.com/industries/travel/our-insights/aircraft-mro-2-point-0-the-digital-revolution. Acesso em: 05/02/2026.
[118] Flight Engineering Solutions (2025). Artificial Intelligence and Big Data: Transforming Aeronautical Maintenance. Disponível em: https://flightesolutions.com/en/2025/01/28/artificial-intelligence-and-big-data-transforming-aeronautical-maintenance/. Acesso em: 05/02/2026.
[119] IATA (2024). Digital Aircraft Operations / Digital Transformation. Disponível em: https://www.iata.org/en/programs/ops-infra/techops/digital-aircraft-operations/. Acesso em: 05/02/2026.

compartilhamento de risco tornam-se particularmente relevantes para alinhar incentivos e assegurar a viabilidade econômica das trajetórias tecnológicas desejadas.

Tecnologias com elevado potencial econômico e ambiental, como biocombustíveis avançados e ganhos de eficiência operacional, tendem a apresentar maior aderência às condições locais, enquanto soluções mais intensivas em capital e infraestrutura exigem priorização seletiva e análise criteriosa de custo-benefício.

A estrutura produtiva e energética do Brasil confere vantagens comparativas importantes na transição tecnológica dos transportes, com reflexos econômicos diretos. A ampla disponibilidade de biocombustíveis, a experiência acumulada em sua produção e uso, e a existência de infraestrutura parcialmente adaptada reduzem custos de transição e riscos econômicos associados à adoção dessas soluções, especialmente nos modais rodoviário, ferroviário e aéreo.

Além disso, a difusão de novas tecnologias no setor de transportes não ocorre de forma isolada, mas sim por meio de trajetórias concorrentes e, em muitos casos, mutuamente excludentes. A existência de múltiplas rotas tecnológicas, como eletrificação direta, uso de biocombustíveis, gás natural/biometano, hidrogênio e combustíveis sintéticos, implica que os investimentos realizados hoje influenciam de maneira decisiva o padrão tecnológico dominante no futuro. Esse fenômeno, frequentemente descrito como *lock-in* tecnológico, pode levar à consolidação de determinadas soluções em detrimento de outras, ainda que estas últimas venham a se mostrar mais eficientes no longo prazo.

Nesse contexto, a escalabilidade das tecnologias assume papel central. Soluções que conseguem atingir rapidamente escala produtiva e difusão no mercado tendem a reduzir custos de forma mais acelerada, consolidando vantagens competitivas e criando barreiras à entrada para tecnologias alternativas. Por outro lado, tecnologias que demandam infraestrutura específica intensiva ou apresentam elevada incerteza regulatória podem enfrentar trajetórias mais lentas de adoção, mesmo quando apresentam elevado potencial econômico e ambiental no longo prazo.

A competição entre essas trajetórias tecnológicas também introduz um elemento adicional de incerteza econômica, tanto para agentes privados quanto para o setor público. Decisões de investimento em ativos de longa duração, como frotas, infraestrutura de abastecimento e redes logísticas, passam a incorporar o risco de obsolescência tecnológica, o que pode elevar o custo de capital e retardar decisões de investimento. Nesse ambiente, políticas públicas que favoreçam neutralidade tecnológica, interoperabilidade e flexibilidade de infraestrutura tendem a reduzir riscos e evitar aprisionamento prematuro em soluções subótimas.

A escolha entre diferentes vetores energéticos, como eletrificação ou uso de gás (incluindo biometano), ilustra de forma clara esse trade-off. A eletrificação apresenta elevado potencial de eficiência energética e redução de emissões no longo prazo, especialmente em contextos com matriz elétrica limpa, mas exige investimentos significativos em infraestrutura de recarga e adaptação de frotas. Já soluções baseadas em gás podem apresentar custos iniciais mais baixos e maior compatibilidade com a infraestrutura existente, funcionando como tecnologias de transição, ainda que com menor potencial de descarbonização no longo prazo. A viabilidade econômica relativa dessas alternativas depende de fatores como preços relativos de energia, evolução tecnológica, políticas ambientais e características específicas de cada modal e aplicação.

No Estado de São Paulo, essas vantagens são amplificadas pela escala do mercado, pela densidade da infraestrutura logística e pela presença de cadeias produtivas integradas. Do ponto de vista econômico, isso sugere que os impactos positivos da adoção de novas tecnologias tendem a se materializar de forma mais rápida e robusta em corredores estratégicos, áreas metropolitanas e polos logísticos, com potencial de difusão gradual para outras regiões.

Em síntese, os impactos econômicos da adoção de novas tecnologias e da transição energética nos transportes devem ser compreendidos como um processo gradual, heterogêneo e fortemente dependente de decisões de política pública, coordenação institucional e escolhas de investimento. Embora o curto prazo possa ser marcado por aumento de custos e necessidade de investimentos adicionais, o médio e o longo prazo indicam potencial significativo de redução do custo logístico sistêmico, aumento da eficiência econômica e fortalecimento da competitividade do sistema de transportes.

3.2 Impactos em emissões de GEE

O setor de transportes responde por aproximadamente um sétimo das emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE), conforme apresentado na 4ª Comunicação Nacional (2020). Em São Paulo, esse percentual é significativamente mais elevado: o setor responde por 29% das emissões estaduais de GEE — mais que o dobro da participação nacional —, refletindo o perfil de emissões do Estado, no qual agropecuária, florestas e uso do solo (principal fonte de emissões no Brasil, com 62%) correspondem a apenas 28% (PAC 2050, Governo de São Paulo)120. Dada a relevância desse setor, busca-se integrar as proposições do PLI-SP às estratégias de mitigação de GEE, conforme já descrito anteriormente.

Este tópico tem como objetivo analisar o impacto da eletrificação da frota e da utilização de biocombustíveis sobre as emissões de gases de efeito estufa, apresentando uma comparação entre diferentes opções. Abaixo são destacados os fatores de emissão unitários de diferentes tecnologias, como veículos a combustão e veículos elétricos. É importante ressaltar que este levantamento não é finalístico ainda, nem se propõe a calcular o total de redução de emissões, que será objeto de uma análise futura. Aqui, o foco é identificar quais tecnologias apresentam os menores fatores de emissão, a fim de embasar propostas de substituição para um cenário mais sustentável. No Produto D-13, o cálculo total da redução de emissões será abordado de forma mais detalhada.

Para a elaboração da metodologia de cálculo das estimativas de emissões de GEE nos cenários analisados — construídos a partir de premissas distintas relativas à evolução das infraestruturas, ao quantitativo de veículos em circulação, à composição da frota e aos combustíveis utilizados no Brasil entre 2025 e 2050 — foram consultadas diversas referências nacionais e internacionais. Entre elas, destacam-se: o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC); o Programa Brasileiro *GHG Protocol*[121] [122]; o Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA); o Balanço Energético Nacional (BEN); a metodologia de cálculo do inventário de emissões veiculares do Estado de São Paulo[123]; os relatórios de emissões veiculares do Estado de São Paulo; o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários[124]; o relatório TRUE (2025) sobre emissões reais de veículos em São

[120] SEMIL – Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (2022). Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo.
[121] WRI BRASIL. Entenda o que é GHG Protocol. Porto Alegre: World Resources Institute, 2024.
[122] GHG PROTOCOL BRASIL. Planilha de cálculo de emissões – edição 2026. São Paulo: Fundação Getulio Vargas (FGV), 2026. Disponível em: https://ghgprotocolbrasil.org.
[123] COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2024. São Paulo: CETESB, 2025. (Série Relatórios).
[124] SÃO PAULO (ESTADO). Inventários de Emissões de Poluentes Atmosféricos e Gases de Efeito de Estufa por Veículos Automotores no Estado de São Paulo: Produto 2 – Relatório Final. São Paulo: Secretaria de Logística e Transportes: Departamento de Estradas de Rodagem, 2023. (Elaborado por IDAD, TTC e Green Domus).

Paulo; o Inventário CNT de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor de Transporte[125]; a metodologia de inventário de emissões da aviação civil[126]; Modelo de Caminho e a nota técnica do ICCT[127] "Rumo à Mobilidade Zero Emissões: Avaliação de Cenários para a Descarbonização do Transporte Rodoviário no Brasil".

As estimativas de emissões consideram exclusivamente duas categorias: (i) as emissões resultantes da queima direta de combustíveis em veículos de todos os modos do setor de transportes e (ii) as emissões associadas ao uso de energia elétrica em veículos eletrificados. Para a contabilização do uso de combustíveis, foram adotadas duas abordagens metodológicas complementares.

A abordagem *top-down* utiliza dados agregados de consumo de combustíveis do estado combinados com fatores médios de emissão, utilizada quando existe uma falta de granularidade dos dados dos veículos. Já a abordagem *bottom up* utiliza dados desagregados sobre frota, quilometragem percorrida, número de passageiros, quantidade de carga média, consumo energético específico e características tecnológicas de cada categoria de veículo, proporcionando maior detalhamento e aderência à realidade operacional.

Para 2025, o cálculo das emissões será iniciado com a determinação da frota circulante por tipo e ano modelo no Estado de São Paulo. Na sequência, essa frota é multiplicada pela quilometragem média percorrida no território estadual e pelo consumo energético específico correspondente à tecnologia e ao combustível utilizado. Posteriormente, aplicam-se os fatores de emissão expressos em massa emitida por quilômetro percorrido.

Esse procedimento é repetido para todos os segmentos veiculares e para cada ano analisado, permitindo a consolidação das emissões totais anuais no período. O fator de emissão considerado está atrelado à idade média da frota por tipo do veículo, quando for pertinente. Algumas simplificações foram realizadas para realizar os cenários, com as premissas indicadas por veículo-tipo de cada modal.

Os fatores de emissão são majoritariamente advindos da ferramenta de cálculo do Programa Brasileiro *GHG Protocol,* uma vez que esta metodologia é amplamente difundida no país e constantemente atualizada. Ainda, os valores apresentados, quando necessário, foram complementados pelo Balanço Energético Nacional (2025), o Inventário Nacional Rodoviário (2025) e outras referências mencionadas[128] [129] [130], como os fatores de emissão da geração elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A equação geral utilizada no cálculo das emissões de GEE para cada modal é:

$$E_m = \Sigma(Fr_i \times Iu_i \times Fe_i)$$

[125] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Inventário CNT de Emissões de Gases do Efeito Estufa do Setor de Transporte. Brasília: Ambipar: CNT, 2025.
[126] AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Metodologia do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas: Aviação Civil. 2. ed. Brasília: ANAC, 2024.
[127] INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). Rumo à mobilidade zero emissões: cenários para a descarbonização do transporte rodoviário no Brasil. ICCT, 2025.
[128] Department for Energy Security and Net Zero (DEFRA/DESNZ). 2025. 2025 Government greenhouse gas conversion factors for company reporting: Methodology paper. UK Government.
[129] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). Cálculo dos custos dos serviços de transporte público por ônibus elétrico. São Paulo: ANTP, 2023.
[130] GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Plano Estadual de Energia 2050 (PEE 2050). São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, 2024.

Onde:

- E_m representa a emissão anual do modal m em carbono equivalente (CO2_eq ou CE), considerando os gases CO_2 (fóssil e biogênico), CH_4 e N_2O em (g/ano);
- Fr_i corresponde à frota circulante do veículo-tipo i (número de veículos);
- Iu_i refere-se à intensidade de uso, expressa como quilometragem anual percorrida (km/ano);
- Fe_i é o fator de emissão do poluente (g/km), específico para o ano modelo (veículo-tipo) e para o combustível utilizado.

A frota circulante, a intensidade de uso e os veículos-tipo considerados para os modais de estudo, rodoviário, ferroviário, hidroviário, portuário e aeroviário, foram elencados de acordo com as premissas detalhadas junto aos fatores de emissão no Apêndice A. A tabela abaixo apresenta os fatores de emissão de cada veículo tipo a ser considerado e o resumo da metodologia de cálculo.

Tabela 3-1: Resumo do cálculo dos fatores de emissão de combustão dos Veículos-Tipo considerados nos cenários do PLI-SP 2050[131]

Veículo-Tipo	Resumo da metodologia de cálculo	Fator de emissão
R1 – Automóvel médio a combustão (2025)	Emissões médias considerando composição da frota por combustíveis e fatores GHG Protocol para veículos 2013 (gasolina, flex-gasolina, flex-etanol).	0,180 kg CO_2e/km
R2 – Automóvel médio elétrico	Emissões baseadas no consumo elétrico médio (0,207 kWh/km) e fator de emissão do SIN 2025 (0,0461 kg CO_2/kWh).	0,00952 kg CO_2e/km
R3 – Automóvel médio a combustão (2050)	Projeção futura alinhada às metas europeias de emissão para 2030 (adaptada para 2050).	0,0495 kg CO_2e/km
R4 – Ônibus de viagem	Emissões por passageiro-quilômetro para transporte intermunicipal (GHG Protocol 2026).	0,0283 kg CO_2e/PKM
R5 - Ônibus elétrico	Emissões baseadas no consumo elétrico médio do ITDP132, 2025 (1,2 kWh/km) , fator de emissão do SIN 2025 (0,0461 kg CO_2/kWh), ocupação média de 40 passageiros	0,001383 kg CO_2e/PKM
R6 – Caminhão rígido (3,5–7,5 t)	Emissões do transporte de cargas por caminhão rígido segundo GHG Protocol 2026.	0,539 kg CO_2e/TKM
R7 – Automóvel a GNV	Emissões calculadas com fator de emissão do GNV (BEN 2023: 2,0005 kg CO_2e/m³) e consumo médio de 12 km/m³ (CETESB 2023 e MMA 2014).	0,167 kg CO_2e/km

[131] Os fatores apresentados nesta tabela consideram apenas as emissões diretas de combustão (escapamento). É importante destacar isso especialmente para análise de emissão de combustão do biometano. Embora o biometano apresente fator de emissão semelhante ao do GNV nesse critério, sua origem renovável pode resultar em emissões significativamente menores quando avaliado o ciclo de vida completo do combustível (well-to-wheel). Para mais detalhes, consultar o Apêndice A.

[132] ITDP – Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento. Acelerando a transição: estratégia para eletrificar a frota brasileira de ônibus até 2030. 2025.

Veículo-Tipo	Resumo da metodologia de cálculo	Fator de emissão
R8 – Automóvel a Biometano	Emissões calculadas com fator de emissão do Biometano (DEFRA 2024: 1,9944 kg CO_2e/m^3) e consumo médio de 12 km/m^3 (CETESB 2023 e MMA 2014).	0,166 kg CO_2e/km
R9 – Automóvel flex (gasolina comercial)	Emissões calculadas com fator de emissão da Gasolina Comercial (70%; BEN 2023: 2,1124 kg CO_2e/L) e consumo médio de 14,93 km/L (CETESB 2023). Conforme Resolução CNPE nº 9/2025 (30% de etanol anidro).	0,141 kg CO_2e/km
R10 – Automóvel flex (etanol hidratado)	Emissões calculadas com fator de emissão do Etanol Hidratado (BEN 2023: 1,5565 kg CO_2e/L) e consumo médio de 10,46 km/L (CETESB 2023).	0,149 kg CO_2e/km
R11 – Veículo comercial leve a diesel (2025)	Emissões calculadas com fator de emissão do Diesel B15 (BEN 2023: 2,6203 kg CO_2e/L) e consumo médio de 11,15 km/L (CETESB 2023 e MMA 2014). Percentual vigente conforme Resoluções CNPE nº 6 e 8/2025.	0,235 kg CO_2e/km
R12 – Ônibus urbano a diesel (2025)	Emissões calculadas com fator de emissão do Diesel B15 (BEN 2023: 2,6203 kg CO_2e/L) e consumo médio de 2,1 km/L (CETESB 2023 e MMA 2014). Percentual vigente conforme Resoluções CNPE nº 6 e 8/2025.	1,248 kg CO_2e/km
F1 – Transporte ferroviário de carga – locomotivas a diesel	Emissões ferroviárias da malha paulista (ALLMP) por tonelada-quilômetro útil.	29,16 kg CO_2/1.000 TKU
F2 – Transporte ferroviário de passageiros – rede aérea, catenária, eletrificação	Emissões definidas pelo consumo energético (0,1616 kWh/PKM) e SIN 2025.	0,0075 kg CO_2e/PKM
F3 – Transporte metroviário	Emissões por PKM conforme dados informados pelo Metrô SP na ferramenta GHG Protocol.	0,003 kg CO_2e/PKM
F4 – Ferroviário Biodiesel (Híbrido)	Emissões estimadas com base nos dados do Projeto CPTM Santos-Cajati para tração a biodiesel em modo híbrido. Consumo energético médio de 32,5 kWh/km; faixa de emissões de 2,5 a 3,0 kg CO_2/km.	2,75 kg CO_2/km (média)
F5 – Ferroviário Etanol	Emissões estimadas com base nos dados do Projeto CPTM Santos-Cajati para tração a etanol. Consumo energético médio de 35,0 kWh/km; faixa de emissões de 1,4 a 1,6 kg CO_2/km. Alternativa sustentável com ampla disponibilidade de insumo no Estado de São Paulo.	1,50 kg CO_2/km (média)
F6 – Ferroviário Elétrico (Bateria)	Emissões estimadas com base nos dados do Projeto CPTM Santos-Cajati. Consumo energético médio de 27,5 kWh/km (faixa de 25 a 30 kWh/km). Emissão direta (tank-to-wheel) nula, conforme informado pela CPTM.	0 kg CO_2/km

Veículo-Tipo	Resumo da metodologia de cálculo	Fator de emissão
F7 – Ferroviário Hidrogênio Verde	Emissões estimadas com base nos dados do Projeto CPTM Santos-Cajati. Consumo energético médio de 26,0 kWh/km (faixa de 24 a 28 kWh/km). Emissão direta (tank-to-wheel) nula, assumindo produção de hidrogênio 100% renovável.	0 kg CO_2/km
H1 – Hidroviário (Carga a diesel)	Emissões calculadas a partir do consumo de 1,8 L/1.000 TKU de diesel (Hidrovia Tietê-Paraná) via GHG Protocol.	5,81 kg CO_2e/1.000 TKU
H2 – Hidroviário (Embarcações a HVO)	Emissões considerando aumento de consumo (1,86 L/1.000 TKU) devido ao menor PCI do HVO.	4,52 kg CO_2e/1.000 TKU
H3 – Hidroviário (Embarcações eletrificadas)	Emissões baseadas na demanda estimada (12 GWh) e consumo médio (6 kWh/1.000 TKU).	0,277 kg CO_2/1.000 TKU
A1 – Aeroviário (Passageiros)	Emissões por PKM para voos de curta distância (GHG Protocol 2026).	0,136 kg CO_2e/PKM
A2 – Aeroviário (Carga)	Emissões para voos domésticos de carga dedicada (DEFRA-UK 2025).	2,52 kg CO_2e/TKM

Fonte: Consórcio Concremat-Transplan.

3.2.1 Transporte de passageiros

Quanto ao modo rodoviário individual, observa-se que a renovação da frota já contribui para a redução das emissões de GEE. Mantida a tendência de atualização tecnológica dos veículos, mesmo em um cenário sem interferência do PLI-SP 2050, projeta-se uma diminuição das emissões associadas aos automóveis a combustão até 2050 (R1 e R3). Ainda assim, a adoção de veículos elétricos (R2) apresenta potencial significativamente superior de mitigação, resultando em reduções mais expressivas.

A análise comparativa por passageiro-quilômetro indica que um automóvel a combustão apresenta emissões superiores às de um ônibus a combustão por passageiro transportado. Da mesma forma, o desempenho ambiental do automóvel elétrico com baixa ocupação é inferior ao de sistemas de transporte público de alta capacidade baseados em eletrificação, como os modos ferroviários e os próprios ônibus elétricos.

Considerando os fatores de emissão estimados neste estudo, um ônibus elétrico (0,001383 kg CO_2e/PKM, com ocupação média de 40 passageiros) apresenta emissão por passageiro-quilômetro cerca de sete vezes menor do que um automóvel elétrico com ocupação unitária (0,00952 kg CO_2e/km) — evidenciando que a eletrificação do transporte coletivo amplia, e não reduz, a vantagem ambiental do ônibus frente ao automóvel individual.

Entretanto, é importante destacar que a avaliação ambiental do sistema de transportes não deve se restringir às emissões de GEE. Aspectos como eficiência no uso do espaço viário são igualmente relevantes: o transporte coletivo apresenta maior capacidade de movimentação de passageiros por unidade de infraestrutura, reduzindo a necessidade de expansão do sistema viário e os impactos associados. Dessa forma, a menor emissão por passageiro em veículos individuais elétricos não implica, necessariamente, maior eficiência sistêmica quando comparada ao transporte coletivo.

Por fim, o transporte aeroviário de passageiros apresenta intensidade de emissões relativamente elevada. Ainda assim, quando comparado ao transporte rodoviário individual a combustão com

baixa ocupação, pode, em determinados casos, apresentar emissões inferiores por passageiro-quilômetro, evidenciando a importância de considerar simultaneamente fatores como tecnologia, ocupação e distância na análise comparativa entre modos.

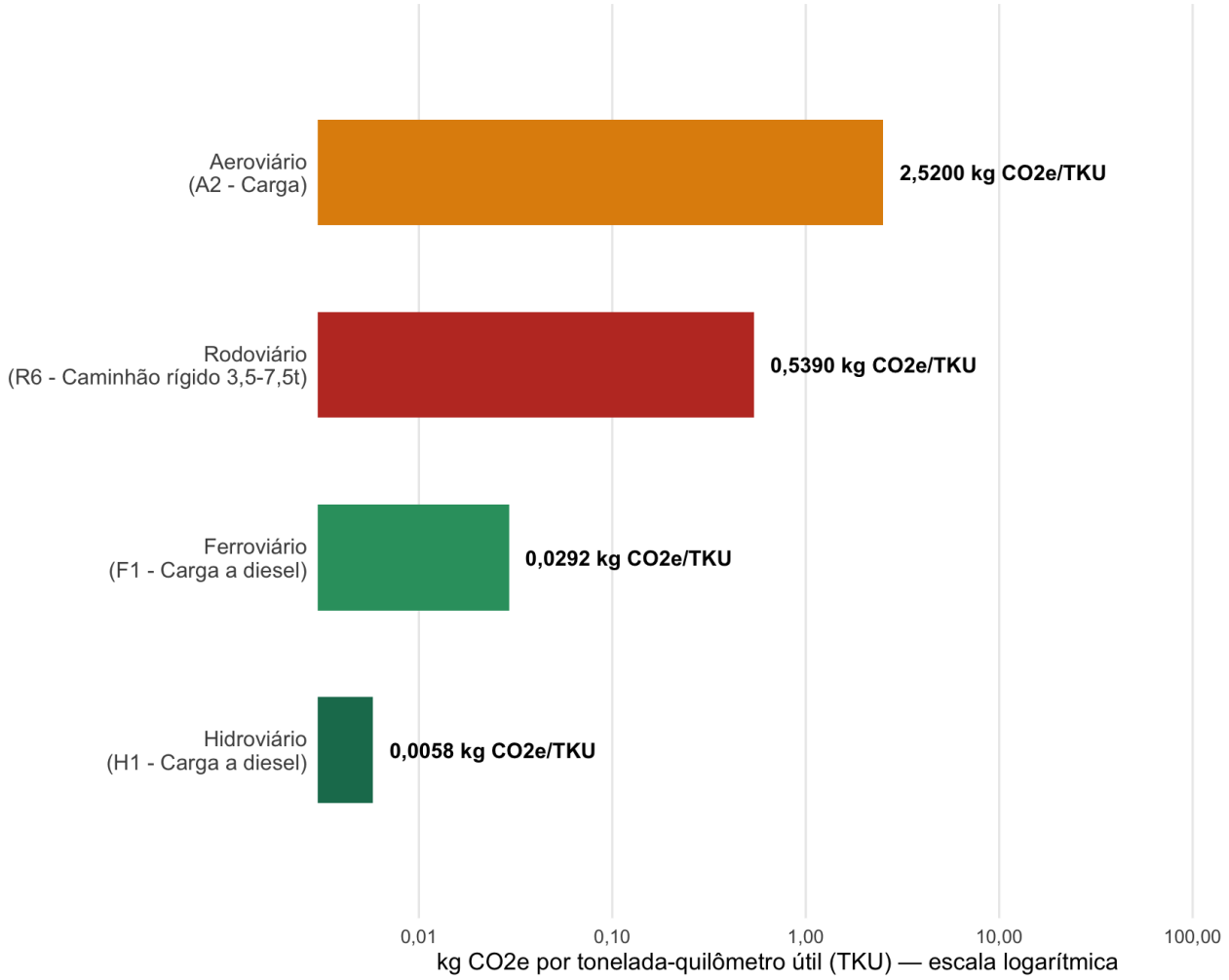
3.2.2 Transporte de cargas

Quanto ao transporte rodoviário de cargas, observa-se que este apresenta elevada intensidade de emissões de GEE por tonelada-quilômetro, conforme indicado para o caminhão (R6). Esse resultado está associado, principalmente, à menor eficiência energética do modal e à dependência de combustíveis fósseis. Ainda que avanços tecnológicos, a renovação da frota e a substituição de combustíveis, como biometano, biodiesel e HVO (diesel verde), possam contribuir para reduções graduais ao longo do tempo, o transporte rodoviário tende a permanecer como uma das alternativas mais emissoras no horizonte do PLI-SP 20250 (2026-2050), sobretudo enquanto essas soluções não atingirem escala equivalente à observada em iniciativas já em operação, como o programa BioRota (Copersucar) e a adoção de biometano por transportadoras associadas à Iconic.

Em contraste, o transporte ferroviário de cargas (F1) apresenta emissões apresenta emissões cerca de 18,5 vezes inferiores por tonelada-quilômetro em relação ao caminhão rígido (R6) — 0,029 kg CO_2/TKM contra 0,539 kg CO_2e/TKM, respectivamente, evidenciando maior eficiência energética e operacional. Essa vantagem estrutural reforça o papel estratégico do modal ferroviário em cenários de descarbonização do setor de transportes, especialmente para fluxos de média e longa distância e grandes volumes de carga.

O transporte hidroviário também se destaca como uma alternativa de menor intensidade de emissões, sobretudo quando comparado ao modal rodoviário. No caso de embarcações movidas a diesel (H1), já se observam valores relativamente reduzidos, que podem ser ainda mais mitigados com a adoção de combustíveis de baixo carbono, como o HVO (H2), ou com a eletrificação das embarcações (H3). Esses resultados indicam o potencial do modal hidroviário para contribuir de forma relevante na redução das emissões do transporte de cargas, especialmente em corredores com condições operacionais favoráveis.

Figura 3-2: Intensidade de Emissões de CO2 por Modal — Transporte de Cargas



Fonte: Consórcio Concremat-Transplan.

Por outro lado, o transporte aeroviário de cargas (A2) apresenta a maior intensidade de emissões entre os modos analisados, sendo significativamente mais emissor por tonelada-quilômetro. Essa característica compromete o desempenho ambiental do modal frente aos demais. Já sua aplicação restrita a cargas de alto valor agregado, urgência elevada ou contextos sem alternativas logísticas viáveis decorre, na verdade, de sua competitividade econômica, o custo do transporte aéreo de cargas é significativamente superior ao dos demais modais, o que naturalmente limita seu uso a segmentos capazes de absorver esse custo, independentemente do desempenho ambiental.

De forma geral, a análise evidencia que modos de transporte de maior capacidade e eficiência energética, como o ferroviário e o hidroviário, tendem a apresentar menores emissões específicas, enquanto o transporte rodoviário e, sobretudo, o aeroviário, apresentam maiores intensidades de emissão. Nesse sentido, estratégias que promovam a mudança da matriz de transporte de cargas, com maior participação de modos mais eficientes, aliadas à adoção de tecnologias de baixo carbono, são fundamentais para a redução das emissões de GEE no setor.

4 SÍNTESE NOVAS FONTES DE ENERGIA E TECNOLOGIAS NOS TRANSPORTES

A análise desenvolvida nas seções anteriores evidencia que a transição energética e a incorporação de novas tecnologias nos sistemas de transporte e logística não devem ser tratadas como vetores isolados, mas como processos interdependentes, marcados por diferentes graus de maturidade tecnológica, necessidades de coordenação institucional e impactos econômicos heterogêneos ao longo do tempo. Nesse contexto, a construção de cenários futuros no âmbito do PLI-SP 2050 exige a seleção criteriosa de tecnologias com potencial transformacional, isto é, aquelas capazes de alterar estruturalmente padrões de custo, organização logística, uso de infraestrutura e competitividade modal.

De forma geral, as tecnologias analisadas podem ser organizadas em três grandes grupos para fins de simulação: (i) tecnologias de difusão mais imediata, com impactos incrementais, (ii) tecnologias em processo de consolidação, com potencial de reconfiguração relevante no médio prazo, e (iii) tecnologias emergentes, com elevado grau de incerteza, mas potencial disruptivo no longo prazo. A definição dos cenários deve refletir essas diferentes trajetórias de difusão, incorporando hipóteses consistentes sobre custos, escalabilidade, infraestrutura necessária e restrições regulatórias.

No primeiro grupo, destacam-se os biocombustíveis, em especial o etanol, já amplamente consolidado na frota brasileira, a eletrificação de veículos leves e ônibus, os sistemas inteligentes de transporte (ITS), tecnologias de gestão logística digital e medidas de eficiência operacional. Essas tecnologias apresentam elevada maturidade e já vêm sendo incorporadas de forma progressiva, com impactos relativamente previsíveis sobre redução de custos operacionais, eficiência energética e emissões. Nos cenários, seu papel é fundamental para capturar ganhos de eficiência incremental e melhorias na gestão da demanda e da oferta de transporte.

No segundo grupo, encontram-se tecnologias com maior potencial de transformação estrutural no médio prazo, como a eletrificação de veículos pesados, o avanço das baterias (incluindo estado sólido), o desenvolvimento de infraestrutura de recarga e a integração com *smart grids*. Nesse conjunto, destaca-se de forma particular o biometano, que emerge como uma das principais alternativas para descarbonização do transporte de cargas no Brasil, especialmente em segmentos de difícil eletrificação.

O biometano apresenta características singulares que justificam seu destaque na construção de cenários. Em primeiro lugar, trata-se de uma tecnologia já disponível comercialmente, com compatibilidade com motores a gás e potencial de uso em frotas pesadas, o que reduz significativamente barreiras tecnológicas à sua adoção. Em segundo lugar, sua produção a partir de resíduos agroindustriais e urbanos permite a internalização de externalidades ambientais positivas, contribuindo simultaneamente para a gestão de resíduos e para a redução de emissões. Em terceiro lugar, o biometano possui elevada aderência às condições brasileiras, dada a disponibilidade de insumos e a estrutura produtiva existente.

Do ponto de vista logístico, o biometano pode gerar impactos transformacionais relevantes. Sua adoção em larga escala pode alterar a geografia da oferta de energia para transporte, promovendo maior descentralização e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis importados ou distribuídos por longas cadeias logísticas. Além disso, pode induzir investimentos em infraestrutura dutoviária e em sistemas de distribuição regionais, com efeitos sobre a integração entre modais e sobre a organização das cadeias de suprimento.

Nos cenários futuros, portanto, o biometano deve ser tratado como um vetor estruturante de reorganização logística, especialmente no transporte rodoviário de cargas e em segmentos com forte conexão com a produção agroindustrial. Sua penetração deve ser modelada considerando

diferentes ritmos de expansão da oferta, disponibilidade de infraestrutura e evolução do ambiente regulatório.

No terceiro grupo, situam-se tecnologias emergentes, como hidrogênio de baixo carbono, e-*fuels*, veículos autônomos, sistemas avançados de conectividade (C-ITS e V2X) e soluções de mobilidade como serviço (MaaS, VaaS e BaaS). Embora ainda apresentem elevada incerteza quanto a custos e escalabilidade, essas tecnologias possuem potencial disruptivo significativo, podendo redefinir completamente padrões de operação logística, uso de ativos e organização dos mercados de transporte no longo prazo.

A incorporação dessas tecnologias nos cenários deve ser feita por meio de hipóteses alternativas (cenários exploratórios), que capturem diferentes trajetórias possíveis de desenvolvimento tecnológico e institucional. Em particular, tecnologias como o hidrogênio e os e-*fuels* podem desempenhar papel relevante na descarbonização de modais de difícil abatimento, como o transporte marítimo e aéreo, enquanto veículos autônomos e sistemas conectados podem alterar profundamente a produtividade do capital e do trabalho no setor de transportes.

Por fim, é importante destacar que os impactos dessas tecnologias dependem fortemente de fatores complementares, como regulação, coordenação entre agentes, disponibilidade de financiamento e planejamento de infraestrutura. Assim, os cenários futuros devem incorporar não apenas trajetórias tecnológicas, mas também hipóteses institucionais e de política pública, refletindo diferentes graus de coordenação e eficiência na implementação dessas transformações.

As simulações de emissões utilizaram os fatores calculados de acordo com os tipos de veículos, modais e tecnologias apresentados na Tabela 3-1. Para a construção dos cenários prospectivos, serão realizadas simulações adicionais no Produto D-13 incorporando diferentes trajetórias de difusão tecnológica ao longo do horizonte do PLI-SP 2050, refletindo distintos graus de maturidade, adoção e coordenação institucional.

Ademais, serão conduzidas análises de sensibilidade com base em combinações alternativas de rotas tecnológicas — incluindo, entre outras, eletrificação, biometano, hidrogênio e combustíveis sintéticos — de modo a capturar a robustez dos resultados frente a incertezas quanto à evolução dos custos, da infraestrutura e do ambiente regulatório. Essa abordagem permitirá avaliar não apenas os impactos médios esperados, mas também a variabilidade dos resultados e os trade-offs associados a diferentes estratégias de descarbonização do setor de transportes.

Em síntese, a construção de cenários no PLI-SP 2050 deve priorizar tecnologias com potencial de transformação estrutural, com destaque para os biocombustíveis, em especial o etanol, e o biometano no curto e médio prazo em transporte de cargas, e a eletrificação de veículos leves e ônibus, incluindo, nesta última, as soluções híbridas como etapa intermediária do processo de eletrificação, ao mesmo tempo em que incorpora, de forma consistente, tecnologias emergentes que podem redefinir o sistema de transportes no longo prazo.

PARTE II – ANÁLISE DOS CONTATOS SETORIAIS

A elaboração do Plano de Logística e Investimentos do Estado de São Paulo (PLI-SP 2050) incorporou, desde suas etapas iniciais, um processo estruturado de escuta a agentes públicos, operadores, associações setoriais, empresas e instituições técnicas. Essas contribuições foram coletadas por meio de contatos setoriais, reuniões técnicas e eventos públicos realizados ao longo do processo participativo do Plano, com subsídios adicionais fornecidos pelo Produto D5 – Ações Regionais de Divulgação.

A partir desse processo de escuta, esta Parte II sistematiza os problemas, questões e percepções apresentados pelos agentes consultados, constituindo uma etapa central para a transição entre o diagnóstico da infraestrutura existente e a construção de cenários prospectivos para o sistema de transporte e logística do Estado de São Paulo. Essa sistematização permite identificar os vetores estruturais, as restrições operacionais e as incertezas que o mercado enxerga e que condicionam a evolução futura da logística estadual.

Os elementos levantados nas interações com agentes públicos, operadores, associações setoriais, empresas e instituições de pesquisa evidenciam que o conjunto de iniciativas não pode ser interpretado como uma carteira homogênea de investimentos. Trata-se, na realidade, de um sistema complexo de transformações em curso, no qual diferentes projetos, agendas regulatórias e inovações tecnológicas interagem e produzem efeitos sistêmicos sobre a organização da rede logística.

Nesse contexto, a principal contribuição desta Parte II não reside na priorização isolada de projetos, mas na interpretação integrada desses elementos como determinantes da dinâmica futura da oferta e do uso da infraestrutura. Essa abordagem permite deslocar a análise de uma lógica de inventário para uma perspectiva estrutural, na qual o foco passa a ser a compreensão de como a interação entre investimentos, tecnologia, regulação e território altera o desempenho, a eficiência e a resiliência do sistema logístico ao longo do tempo. A partir dessa interpretação, são examinadas alternativas de solução e definidos os encaminhamentos pertinentes para seu aprofundamento nos produtos subsequentes.

A articulação com o Produto 10 – Caracterização da Oferta Futura é relevante nesse processo. O D10 estabelece a base física da expansão e reconfiguração da infraestrutura, enquanto os elementos analisados no presente capítulo introduzem condicionantes, incertezas e vetores de transformação que determinam se, como e com que intensidade essa oferta se materializará e será efetivamente utilizada.

A partir dessa leitura integrada, observa-se que os temas analisados convergem para três vetores estruturais que orientam a construção dos cenários prospectivos:

A partir dessa leitura integrada, os temas analisados são organizados em seis eixos que orientam a sistematização das contribuições setoriais e sua consideração nas etapas subsequentes do PLI-SP 2050:

- O primeiro eixo, **Transição Energética e Combustíveis**, reúne as questões relacionadas aos incentivos para o uso de combustíveis de baixo impacto ambiental no transporte de cargas e ao desenvolvimento de dutovias para movimentação de biocombustíveis. A análise considera a articulação entre oferta de combustível, infraestrutura de transporte e abastecimento e condições econômicas de adoção, com destaque para as possibilidades associadas ao biometano no contexto paulista.

- O segundo eixo, **Integração Modal e Novos Serviços**, aborda as conexões com o transporte marítimo, as relações entre transporte ferroviário de cargas e passageiros, as áreas de desenvolvimento ao longo de ferrovias e a manutenção dos serviços inter-regionais de passageiros. Também contempla os sistemas intermodais no interior do Estado, a ampliação da capacidade da Hidrovia Tietê-Paraná, o transporte aquaviário de passageiros e o uso de plataformas digitais para otimização do transporte de cargas.
- O terceiro eixo, **Infraestrutura e Gestão Rodoviária**, compreende as demandas por novas rodovias, ampliação e modernização da capacidade existente, segurança viária, regulação e priorização de solicitações e melhoria das condições das rodovias em áreas rurais. Esses temas envolvem tanto intervenções físicas quanto procedimentos de gestão capazes de relacionar os investimentos às necessidades de circulação, acessibilidade e segurança.
- O quarto eixo, **Mobilidade e Desenvolvimento do Setor Aéreo**, reúne o apoio ao Plano Cicloviário do Estado de São Paulo, às rotas cicloturísticas e religiosas e as estratégias para o desenvolvimento do setor aéreo. Embora associados a diferentes escalas de deslocamento, esses temas convergem para a ampliação das opções de transporte, a melhoria das condições de acesso e o fortalecimento da conectividade regional.
- O quinto eixo, **Planejamento Territorial e Desenvolvimento Regional**, trata das retroáreas e bases de apoio offshore para o pré-sal, da articulação com os municípios e da geração de polos de desenvolvimento associados às novas ofertas de infraestrutura logística. A análise considera as relações entre acessibilidade, uso do solo, disponibilidade de áreas, restrições ambientais e instrumentos de planejamento, reconhecendo que os benefícios territoriais dos investimentos dependem de condições complementares à implantação da infraestrutura.
- O sexto eixo, **Segurança, Tecnologia, Governança, Resiliência e Financiamento**, contempla a segurança e a conectividade no transporte de cargas, a adoção de novas tecnologias nas contratações estaduais, o fortalecimento institucional da área de logística e transportes, a adaptação às mudanças climáticas e a avaliação de incentivos fiscais e fundos setoriais. Esses elementos constituem condições transversais para o funcionamento do sistema, a continuidade dos serviços e a implementação das propostas do Plano.

Esses seis eixos não atuam de forma isolada, mas interdependente. A efetividade da expansão da oferta depende de condicionantes institucionais e financeiros; a adoção de novas tecnologias está vinculada à disponibilidade de infraestrutura energética; e a reorganização territorial dos fluxos logísticos depende da capacidade de articulação entre infraestrutura, planejamento urbano e desenvolvimento econômico. Da mesma forma, segurança, conectividade e resiliência influenciam o desempenho dos diferentes modos e a continuidade das operações.

A leitura transversal das contribuições setoriais revela, adicionalmente, que os temas discutidos apresentam diferentes níveis de maturidade, prioridade e viabilidade. Questões associadas a gargalos existentes exigem respostas mais imediatas, enquanto outras iniciativas dependem da evolução da demanda, da difusão tecnológica ou de aprofundamento técnico, regulatório e econômico. Essa diferenciação orienta a análise das alternativas e sua consideração nos horizontes de planejamento do PLI-SP 2050.

Em cada tema, a análise parte da contextualização do problema, examina as possíveis soluções e apresenta encaminhamentos em projetos, programas, medidas ou estudos. Essa estrutura busca preservar a relação entre a necessidade identificada e a resposta proposta, permitindo distinguir as alternativas passíveis de representação na rede de transportes daquelas que demandam avaliações complementares.

A proposição de soluções para os problemas apresentados não se esgota, entretanto, neste produto. Os projetos indicados constituem um conjunto inicial de alternativas para

aprofundamento, que poderá ser complementado, reformulado ou ampliado nos produtos subsequentes. Os resultados das simulações, a identificação de pontos de atenção e o desenvolvimento das avaliações técnicas poderão revelar necessidades adicionais e fundamentar a inclusão de novos projetos para análise, inclusive de soluções não identificadas nesta etapa.

Dessa forma, a análise dos contatos setoriais cumpre papel metodológico essencial ao fornecer insumos para a definição de hipóteses de cenários, parâmetros de simulação, critérios de sensibilidade e avaliações fora da rede. As alternativas pertinentes poderão subsidiar as simulações do Produto D-12, a identificação de pontos de atenção no Produto D-13 e o aprofundamento de projetos e intervenções no Produto D-14, em articulação com o exame dos aspectos jurídicos, institucionais e regulatórios previsto no Produto D-18.

Por fim, esta Parte II organiza e aprofunda os temas identificados nos contatos setoriais, explicitando suas implicações para o planejamento até 2050. A estrutura adotada contribui para a construção de cenários consistentes e para a formulação de respostas aos desafios do sistema logístico paulista, mantendo aberta a possibilidade de incorporar novas alternativas à medida que as análises do Plano avancem.

5 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E COMBUSTÍVEIS

A transição energética no transporte depende de condições econômicas, logísticas e institucionais que permitam ampliar o uso das alternativas tecnológicas examinadas na Parte I. Nos contatos setoriais, essa questão se expressou em duas frentes complementares: os incentivos ao uso de combustíveis de baixo impacto ambiental no transporte de cargas e a infraestrutura necessária para movimentar biocombustíveis entre as áreas produtoras e os mercados consumidores.

Este capítulo analisa essas duas frentes, com destaque para o biometano e sua relação com a base agroindustrial paulista. A primeira seção examina instrumentos capazes de reduzir as barreiras econômicas à adoção desses combustíveis, considerando os custos dos veículos, de sua operação e da infraestrutura de abastecimento. A segunda aborda o desenvolvimento de dutovias, contemplando tanto a implantação de novas conexões quanto o aproveitamento das redes existentes, conforme as características dos combustíveis, a localização da produção e as necessidades dos consumidores.

As análises buscam identificar em quais condições os incentivos e os investimentos em infraestrutura podem se complementar, ampliando a disponibilidade dos combustíveis e a viabilidade de sua utilização. A partir dessa avaliação, são organizados as alternativas e os critérios de aprofundamento no Produto D-14, com atenção aos custos, aos benefícios ambientais e aos condicionantes técnicos, regulatórios e institucionais de sua eventual implementação.

5.1 Incentivos para uso de combustíveis com baixo impacto ambiental no transporte de cargas

a) Contextualização

O transporte rodoviário de cargas ainda depende predominantemente de combustíveis fósseis. Embora existam alternativas de menor impacto ambiental, sua adoção enfrenta barreiras econômicas e operacionais. No caso do biometano, destacam-se o custo de aquisição dos veículos, a disponibilidade limitada de pontos de abastecimento, a concentração espacial da oferta do combustível e a incerteza dos transportadores quanto ao retorno do investimento.

Essas barreiras são mais relevantes para empresas de pequeno e médio porte, que operam com margens reduzidas e apresentam maior sensibilidade aos custos fixos e variáveis da atividade. Ao mesmo tempo, parte dos benefícios ambientais decorrentes da substituição do diesel, como a redução das emissões de gases de efeito estufa e o aproveitamento energético de resíduos, não é apropriada diretamente pelo transportador. Sem incentivos econômicos, a renovação da frota pode ocorrer em ritmo inferior ao necessário para o cumprimento das metas estaduais de descarbonização.

O Estado de São Paulo apresenta condições favoráveis ao uso do biometano no transporte de cargas, em razão da produção agroindustrial, da disponibilidade de resíduos orgânicos e da existência de corredores rodoviários com grande concentração de fluxos. No entanto, o aproveitamento desse potencial depende da combinação entre oferta de combustível, infraestrutura de abastecimento e medidas que reduzam o custo de adoção e operação dos veículos.

b) Análise

A análise dos incentivos a combustíveis de baixo impacto ambiental deve partir das diferenças de maturidade tecnológica, estrutura de custos e competência governamental existentes entre os modais. No transporte rodoviário de cargas, o biometano já apresenta condições técnicas de utilização e potencial de produção relevante em São Paulo, mas sua expansão depende da redução do custo relativo dos veículos, da disponibilidade de combustível e da previsibilidade econômica das operações. Nos modais aeroviário e ferroviário, o combustível sustentável de aviação, SAF, o biodiesel e o diesel verde também podem contribuir para a descarbonização, mas sua adoção está mais condicionada à regulamentação federal, à disponibilidade de combustível em escala comercial e à evolução dos custos de produção.

As três alternativas enfrentam um problema comum. Os benefícios ambientais associados à substituição dos combustíveis fósseis não são integralmente incorporados ao preço pago pelo transportador. A redução das emissões de gases de efeito estufa, o aproveitamento energético de resíduos e a diversificação da matriz energética produzem benefícios coletivos, enquanto o custo da mudança tecnológica recai inicialmente sobre operadores, transportadores e proprietários das frotas. Essa diferença entre custo privado e benefício social justifica a avaliação de instrumentos públicos de incentivo, desde que sua concessão esteja associada a resultados ambientais verificáveis e a limites fiscais e orçamentários definidos.

Os instrumentos possíveis atuam em diferentes componentes do custo. A isenção ou redução de pedágio diminui o custo variável da operação e beneficia com maior intensidade os veículos que percorrem longas distâncias em corredores concedidos. A isenção de IPVA reduz o custo fixo anual de propriedade. Linhas de financiamento e subsídios à aquisição podem reduzir o investimento inicial necessário para a renovação da frota. Certificados e créditos associados aos atributos ambientais dos combustíveis podem criar uma remuneração complementar para produtores ou usuários. Por fim, investimentos em infraestrutura de abastecimento atuam sobre uma barreira física que não é resolvida pelos incentivos fiscais ou tarifários.

A experiência internacional indica que os incentivos à adoção de veículos e combustíveis de menor impacto ambiental produzem melhores resultados quando combinam medidas incidentes sobre o custo de aquisição dos veículos, o custo de sua utilização e a disponibilidade da infraestrutura de abastecimento. Os casos examinados também mostram que o desenho dos incentivos precisa considerar as características de cada tecnologia, pois a redução das emissões não depende apenas do tipo de motor, mas a origem do combustível efetivamente utilizado.

Na União Europeia, a Diretiva 2022/362 reformou o sistema Eurovinheta e estabeleceu a diferenciação das tarifas rodoviárias de veículos pesados segundo classes de emissão de CO_2[133]. Em 2025, a Comissão Europeia propôs estender até 2031 a possibilidade de isenção de pedágio para veículos pesados de emissão zero. A proposta foi apresentada diante da participação ainda reduzida dessas tecnologias nos novos registros e da necessidade de manter incentivos durante o período de transição[134] [135].

A Alemanha incorporou uma componente de CO_2 ao sistema Maut de cobrança por distância percorrida. As tarifas passaram a variar segundo a classe de emissão dos veículos pesados, com tratamento mais favorável para veículos de emissão zero e para determinadas categorias de

[133] EUROPEAN PARLIAMENT; COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive 2022/362/EU of 24 February 2022. Official Journal of the European Union, L 69, 4 mar. 2022. Acesso em: 12/09/2026.
[134] European Commission (2025). Commission proposes toll exemptions to boost demand for zero-emission lorries and buses. Press release, 27 June 2025. Disponível em: transport.ec.europa.eu. Acesso em: 12/09/2026.
[135] European Alternative Fuels Observatory — EAFO (2025). EU backs extended toll exemption for zero emission trucks. October 2025. Disponível em: alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu. Acesso em: 12/09/2026.

caminhões a gás[136] [137]. A experiência alemã, contudo, evidencia uma limitação relevante para a formulação da política paulista. A classificação baseada na tecnologia do veículo pode não distinguir adequadamente o gás natural fóssil do biometano. Caminhões com a mesma motorização podem apresentar desempenhos ambientais distintos conforme a origem do combustível utilizado. A elegibilidade para um incentivo dirigido ao biometano deve, portanto, incluir mecanismos de certificação ou rastreabilidade do combustível, e não somente a identificação do veículo.

Na Suécia, o desenvolvimento do mercado de biometano foi apoiado por uma combinação de isenção tributária sobre o combustível, subsídios à aquisição de veículos pesados e estímulos à expansão da produção. A Agência de Energia sueca estabeleceu meta de aumento da produção de biometano de 1,4 TWh em 2020 para 10 TWh em 2030, articulando a política de oferta com a formação de demanda no setor de transportes[138]. A experiência do corredor Suécia–Noruega, com caminhões movidos a bio-GNL em operações regulares de longa distância, indica que o combustível pode ser empregado em rotas de carga de grande extensão. O caso também mostra que a viabilidade da operação depende da existência de pontos de abastecimento ao longo do corredor[139].

Na Noruega, o sistema eletrônico AutoPASS aplica tarifas diferenciadas segundo características ambientais, peso e configuração dos veículos[140]. A adoção de biogás líquido por operadores logísticos noruegueses reforça a importância da combinação entre disponibilidade comercial do combustível, vantagem econômica na operação e planejamento da renovação da frota[141].

Na Itália, as concessionárias responsáveis pelos corredores A35 e A58 oferecem desconto de 30% no pedágio para veículos elétricos e veículos pesados movidos a gás natural liquefeito[142] [143]. A aplicação do benefício em corredores determinados, e não em toda a rede, oferece uma referência útil para São Paulo. A focalização territorial permite concentrar o incentivo em rotas de maior movimentação, coordenar sua implantação com a infraestrutura de abastecimento e limitar a exposição financeira inicial.

Na Califórnia, a política de transição das frotas pesadas combina instrumentos voltados ao veículo, ao combustível e à infraestrutura. O programa Hybrid and Zero-Emission Truck and Bus Voucher Incentive Project concede apoio financeiro à aquisição de caminhões de emissão zero e de veículos a gás que atendam a padrões específicos de emissão[144]. O estado também utiliza créditos vinculados à intensidade de carbono dos combustíveis e mantém programas de financiamento da infraestrutura de abastecimento[145]. Essa combinação procura reduzir

[136] DHL Freight Connections (2023). Changes to German Truck Toll 2023 and 2024. Disponível em: dhl-freight-connections.com. Acesso em: 12/09/2026.
[137] Toll Collect GmbH (2023). Toll reform is coming — new rates published. Press release, 1 December 2023. Disponível em: toll-collect.de. Acesso em: 12/09/2026.
[138] Energy Post / European Biogas Association (2022). Biomethane for decarbonising transport: the Swedish example. Angela Sainz Arnau, EBA. Disponível em: energypost.eu. Acesso em: 12/09/2026.
[139] AltFuels Communications Group (2023). Nordic companies bet on bio-LNG vehicles for long-haul route between Norway and Sweden. August 2023. Disponível em: altfuelscg.com. Acesso em: 12/09/2026.
[140] AutoPASS / Tolls.eu (2026). Rates and discounts — Norway toll system. Disponível em: autopass.no e tolls.eu. Acesso em: 12/09/2026.
[141] Gasum (2026). Norwegian REMA 1000 cuts emissions from the transport of goods with biogas. Customer story, February 2026. Disponível em: gasum.com. Acesso em: 12/09/2026.
[142] BREBEMI S.p.A. Sconti e agevolazioni tariffarie – Veicoli Green A35-A58. Disponível em: https://www.brebemi.it/sconti-e-agevolazioni-tariffarie/. Acesso em: 12/09/2026.
[143] TANGENZIALE ESTERNA S.p.A. Promozioni pedaggi – Green 30%. Disponível em: https://www.tangenziale.esterna.it/promozioni-pedaggi/. Acesso em: 12/09/2026.
[144] California Air Resources Board — CARB (2024). Hybrid and Zero-Emission Truck and Bus Voucher Incentive Project (HVIP). Disponível em: californiahvip.org. Acesso em: 12/09/2026.
[145] California Energy Commission (2023). Clean Transportation Program overview. Disponível em: energy.ca.gov. Acesso em: 12/09/2026.

simultaneamente o custo inicial dos veículos, melhorar a competitividade econômica dos combustíveis renováveis e ampliar sua disponibilidade.

Programas de desconto tarifário em New Jersey e Nova York demonstram, adicionalmente, que a identificação eletrônica dos veículos pode ser utilizada para operacionalizar benefícios em infraestruturas pedagiadas[146] [147]. Esses programas são dirigidos principalmente a veículos leves e, por isso, não constituem modelos diretamente transferíveis para o transporte pesado a biometano. Ainda assim, apresentam soluções administrativas que podem orientar o cadastramento, a identificação e o controle dos veículos elegíveis.

Tabela 5-1: Principais programas internacionais de incentivo tarifário para caminhões de baixo impacto ambiental.

País/Região	Programa	Tipo de Benefício	Combustível / Tecnologia	Desconto	Vigência
União Europeia	Eurovignette / Diretiva 2022/362	Isenção ou desconto de pedágio por classe de CO_2	ZEV (elétrico, H_2)	Isenção total → 75% até 2026	Desde 04/2023
Alemanha	Maut / BFStrMG	Isenção total; tarifa CO_2 diferenciada por classe de emissão	ZEV (elétrico, H_2)	100% isenção até 12/2025	2023–2025
Suécia	Klimatpremie + isenção de imposto	Prêmio de aquisição + isenção de imposto de energia sobre biometano	Biometano (CNG/LNG)	Isenção fiscal + prêmio €15–30k	Vigente (meta 10 TWh/2030)
Noruega	AutoPASS / ambiental	Desconto tarifário proporcional à classe de emissão	ZEV + biogás	50% desconto (carros ZEV); HDV: tarifa ambiental reduzida	Vigente 2026
Itália	A35/A58 (Brebemi/TEEM)	Desconto tarifário	Elétrico + GNL (veículos pesados)	30%	Até 12/2026
Califórnia (EUA)	HVIP + LCFS + HOT lanes	Voucher de compra + crédito de carbono + isenção de pedágio em faixas HOT	CNG, biometano, ZEV	Voucher até US$165k + isenção HOT	Vigente (prorrogado até 2035)
EUA – New Jersey	E-ZPass Green Vehicle Discount	Desconto em horário fora de pico	Elétrico (45+ mpg, SULEV)	10%	Vigente
EUA – Nova York	Port Authority Green Pass Discount Plan	Tarifa reduzida	Plug-in elétrico e híbrido	Variável (tarifa reduzida)	Vigente

[146] NEW JERSEY TURNPIKE AUTHORITY. Toll Discounts – Green Pass Discount. Disponível em: https://www.njta.gov/toll-discounts/. Acesso em: 12/09/2026.
[147] Discount Plans – The Port Authority Green Discount Plan; Thruway Green Discount Plan. Disponível em: https://www.e-zpassny.com/ezpass/plans. Acesso em: 12/09/2026.

Fontes: Comissão Europeia (2022/362/EU; 2025); Toll Collect GmbH (2023–2025); Energy Post / EBA (2022); AutoPASS/Gasum (2026); CARB/HVIP (2024); AFDC California (2024). Elaboração: Consorcio Concremat/Transplan.

A comparação das experiências internacionais permite extrair cinco orientações para o desenho da política paulista. A primeira é que incentivos tarifários somente produzem resultados consistentes quando há disponibilidade regular e competitiva do combustível ao longo das rotas. A segunda é que a elegibilidade deve considerar a origem renovável do combustível, e não apenas a tecnologia do veículo.

A terceira é que instrumentos incidentes sobre aquisição, propriedade e operação tendem a ser complementares. A quarta é que a política deve prever prazo de vigência, limites financeiros, monitoramento e critérios de revisão. A quinta é que a aplicação inicial em corredores de grande movimentação pode concentrar os benefícios ambientais e reduzir a exposição fiscal ou tarifária.

Essas orientações são especialmente relevantes para o biometano. O desconto no pedágio pode reduzir o custo operacional e sinalizar uma orientação de longo prazo para transportadores, fabricantes e fornecedores de combustível. Entretanto, sua aplicação isolada não assegura a substituição da frota. A política deve ser articulada ao mapeamento da produção de biometano, das redes de distribuição e dos postos de abastecimento existentes ou planejados, com atenção aos corredores que conectam as regiões produtoras aos principais polos logísticos e destinos de carga do Estado.

A concessão do benefício também deve ser condicionada à comprovação do uso de combustível renovável. Um caminhão com motorização a gás pode ser abastecido com gás natural fóssil ou biometano. Se a identificação considerar apenas a tecnologia do veículo, o incentivo poderá produzir uma redução de emissões inferior à prevista. O desenho da política deverá avaliar mecanismos de certificação, rastreabilidade, registro das operações de abastecimento ou comprovação de consumo.

Por fim, as experiências internacionais indicam que os incentivos devem ser revistos à medida que a tecnologia se difunde. Na fase inicial, quando a frota elegível ainda é pequena, o custo fiscal ou tarifário tende a ser limitado e o benefício pode induzir decisões de investimento. Com o aumento da participação dos veículos beneficiados, a renúncia cresce e pode exigir a revisão do percentual de desconto, da abrangência territorial ou dos critérios de acesso. A política deve prever desde sua implantação mecanismos periódicos de avaliação e uma trajetória para redução, reformulação ou encerramento do benefício quando a tecnologia alcançar maior competitividade.

Para São Paulo, a focalização inicial em corredores logísticos verdes apresenta vantagens em relação à aplicação imediata do benefício em toda a malha concedida. A concentração em rotas de grande volume permite direcionar o incentivo aos veículos com maior quilometragem anual e, potencialmente, maior consumo de combustível. Também facilita a implantação coordenada de postos de abastecimento, a fiscalização dos veículos beneficiados e o acompanhamento dos resultados. A expansão para outros corredores poderia ocorrer gradualmente, de acordo com a evolução da frota, da oferta de biometano e dos benefícios ambientais observados.

A renúncia associada ao pedágio não corresponde diretamente a uma perda tributária. Como a cobrança integra a equação econômico-financeira dos contratos de concessão, a introdução do benefício pode exigir compensação às concessionárias ou revisão contratual. A análise deverá identificar quem suportará o custo da política, quais mecanismos de reequilíbrio poderão ser utilizados e como evitar que o benefício resulte em aumento tarifário para os demais usuários. Também deverão ser examinadas alternativas à isenção integral, como descontos graduais, limites anuais, aplicação em períodos determinados ou compensação vinculada ao desempenho ambiental.

A isenção de IPVA atua sobre uma dimensão diferente. A Lei Estadual nº 18.065/2024 já estabeleceu, para o período de 2025 a 2029, isenção para ônibus e caminhões movidos exclusivamente a hidrogênio ou gás natural, inclusive biometano. Por esse motivo, a análise não deve apresentar a isenção como uma política ainda inexistente. O objeto de avaliação é sua efetividade, seu custo fiscal, seus critérios de elegibilidade e as condições para eventual manutenção, revisão ou prorrogação após 2029.

Uma comparação adequada entre políticas deverá relacionar a despesa ou renúncia estimada aos resultados obtidos. Entre os indicadores relevantes estão o custo público por veículo adicional incorporado à frota, o custo por tonelada de CO_2 equivalente evitada, a quilometragem anual dos veículos beneficiados, a quantidade de diesel substituída, o consumo comprovado de biometano e a expansão da infraestrutura de abastecimento. Também deverá ser avaliada a adicionalidade da política, isto é, em que medida a renovação da frota decorre efetivamente do incentivo e não ocorreria nas mesmas condições sem o benefício.

Nos modais aeroviário e ferroviário, a atuação estadual apresenta limites distintos. A regulamentação do SAF e dos biocombustíveis ferroviários é predominantemente federal, especialmente após a Lei Federal nº 14.993/2024. Além disso, o regime nacional de tributação dos combustíveis restringe a adoção isolada de alguns instrumentos pelo Estado. A contribuição paulista tende a ocorrer por meio de políticas complementares, como condições associadas a benefícios sob competência estadual, apoio à produção, financiamento, certificação de atributos ambientais e articulação entre produtores e operadores. Essas possibilidades devem ser tratadas de forma qualitativa e condicionadas à evolução da regulamentação federal.

c) Encaminhamento

Os incentivos ao uso de combustíveis de baixo impacto ambiental serão encaminhados para análise fora da rede no Produto D-14. As alternativas examinadas não correspondem a intervenções na capacidade ou na configuração física da rede de transportes. Constituem projetos de política pública com efeitos sobre os custos operacionais e de propriedade dos veículos, a renovação da frota, a demanda por biometano, a disponibilidade de infraestrutura de abastecimento e as receitas públicas e tarifárias. No transporte rodoviário, a articulação entre benefícios de pedágio, isenção de IPVA e expansão dos pontos de abastecimento pode reduzir as barreiras à adoção do biometano. A efetividade e a viabilidade desses instrumentos dependerão da focalização dos benefícios, do monitoramento dos custos, da comprovação dos resultados ambientais e da definição de mecanismos de revisão. Por essa razão, suas implicações econômicas, fiscais, tarifárias, jurídicas, contratuais, operacionais e ambientais deverão ser aprofundadas no Produto D-14.

O Produto D-14 deverá analisar os seguintes projetos:

- Isenção integral de pedágio em toda a malha estadual concedida

Avaliação da concessão de isenção integral de pedágio para caminhões movidos a biometano em todas as rodovias estaduais concedidas sob regulação da ARTESP. A análise deverá estimar a receita tarifária potencialmente não arrecadada em diferentes cenários de participação da frota, os impactos por lote e concessionária e a eventual necessidade de reequilíbrio econômico-financeiro dos contratos.

- Isenção integral de pedágio nos corredores logísticos verdes

Avaliação de uma política focalizada em corredores logísticos selecionados, considerando volume de caminhões, conexão com polos logísticos, industriais, agroindustriais e portuários e possibilidade de abastecimento ao longo das rotas. O projeto deverá comparar seus custos e sua abrangência com a alternativa de isenção em toda a malha.

- Isenção de IPVA para caminhões movidos a biometano

Avaliação do benefício instituído pela Lei Estadual nº 18.065/2024, com vigência prevista entre 2025 e 2029. O estudo deverá estimar o custo fiscal para diferentes cenários de crescimento da frota, avaliar a efetividade do incentivo na decisão de aquisição dos veículos e examinar alternativas de manutenção, revisão ou prorrogação após 2029.

- Programa de infraestrutura de abastecimento nos corredores verdes

Avaliação das necessidades de implantação ou ampliação de postos de abastecimento de biometano nos corredores selecionados. O estudo deverá identificar a localização da oferta atual e potencial do combustível, as distâncias operacionais entre os pontos de abastecimento, as rotas com maior probabilidade de adoção e os instrumentos que o Estado poderá utilizar para apoiar ou induzir os investimentos.

A análise comparativa dos projetos deverá considerar as dimensões econômica, fiscal, tarifária, jurídica, contratual, operacional e ambiental. Entre os indicadores de comparação deverão constar o custo anual da política, o custo por veículo adicional incorporado à frota, o custo por tonelada de CO_2 equivalente evitada, a redução do custo total de propriedade, a cobertura territorial, a disponibilidade de abastecimento e os efeitos sobre os contratos de concessão.

O Produto D-11 registra o problema, apresenta os instrumentos possíveis e define seu encaminhamento. O Produto D-14 deverá aprofundar as alternativas, comparar seus resultados e indicar as condições necessárias para eventual implementação.

5.2 Fomento ao desenvolvimento de dutovias para transporte de biocombustíveis

a) Contextualização

O Estado de São Paulo apresenta elevado potencial de produção de biocombustíveis em razão da dimensão de sua agroindústria, da produção sucroenergética e da disponibilidade de resíduos agropecuários, agroindustriais, urbanos e de saneamento. Além da produção consolidada de etanol e biodiesel, o biometano vem adquirindo relevância como alternativa para o atendimento de consumidores industriais, geração de energia e abastecimento de veículos pesados.

O aproveitamento desse potencial depende da existência de meios eficientes para transportar o combustível entre as unidades produtoras e os mercados consumidores. Parte da produção potencial de biometano está localizada no interior do Estado, em unidades dispersas e com volumes individuais distintos. Os principais consumidores, por sua vez, concentram-se em polos industriais, termelétricas, bases de distribuição, terminais logísticos, instalações portuárias e corredores rodoviários de transporte de cargas. Essa separação territorial entre oferta e demanda pode limitar a viabilidade dos projetos, especialmente quando o transporte rodoviário do gás comprimido ou liquefeito apresenta custo elevado ou capacidade insuficiente para movimentar volumes maiores.

As dutovias podem reduzir os custos de movimentação em operações contínuas e de grande escala. Contudo, sua implantação exige investimentos elevados em tubulação, faixas de servidão, estações de compressão ou bombeamento, sistemas de medição, controle operacional e segurança. A viabilidade depende da concentração espacial da produção, da regularidade dos volumes, da distância aos mercados consumidores e da existência de contratos de fornecimento capazes de sustentar o investimento.

No caso do biometano, a avaliação deve considerar a infraestrutura de gás já existente. Quando o combustível atende às especificações estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP, ele pode receber tratamento regulatório equivalente ao gás

natural e, observadas as condições técnicas, ser injetado em redes compatíveis[148] [149]. Essa possibilidade cria uma alternativa à construção de dutovias próprias de longa distância: conectar as unidades produtoras ou redes coletoras regionais ao sistema de transporte e distribuição de gás existente.

O Gasoduto Bolívia-Brasil, GASBOL, constitui uma das principais infraestruturas a serem consideradas. Operado pela Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil, TBG, o sistema atravessa Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e se conecta a pontos de entrega destinados a distribuidoras, refinarias, termelétricas e consumidores industriais[150]. No território paulista, sua proximidade com áreas produtoras e consumidoras pode permitir a utilização da infraestrutura existente para movimentar biometano. Essa alternativa depende, entretanto, da existência de pontos tecnicamente viáveis de conexão, capacidade contratável, instalações de compressão e medição, atendimento às especificações de qualidade e contratação do serviço de transporte.

O problema a ser examinado não se limita, portanto, à identificação de novos traçados dutoviários. É necessário determinar em quais regiões uma dutovia dedicada constitui a alternativa mais eficiente, onde a conexão ao GASBOL ou às redes estaduais pode evitar investimentos redundantes e em que situações uma solução híbrida, formada por redes coletoras, ramais de conexão e infraestrutura existente, apresenta maior viabilidade.

b) Análise

As dutovias destinadas ao transporte de biocombustíveis devem ser diferenciadas segundo as características físicas do produto. Etanol, biodiesel, diesel verde e outros biocombustíveis líquidos exigem infraestrutura compatível com produtos líquidos e não podem ser movimentados pelo GASBOL. Para esses combustíveis, a relação com o sistema de gás limita-se à eventual competição territorial por faixas de servidão ou corredores de infraestrutura.

O biometano apresenta situação distinta. Por ser um biocombustível gasoso com características que podem ser compatíveis com as do gás natural, sua movimentação pode ocorrer por dutos dedicados, redes de distribuição ou gasodutos de transporte, desde que sejam atendidas as especificações da ANP e as condições técnicas e regulatórias aplicáveis. Por esse motivo, a análise do biometano deve comparar diferentes configurações de rede, em vez de pressupor a necessidade de uma dutovia exclusiva entre cada unidade produtora e o consumidor final.

A primeira alternativa corresponde à implantação de dutovias dedicadas. Nessa configuração, uma unidade produtora ou um conjunto de produtores seria conectado diretamente a consumidores industriais, termelétricas, bases de abastecimento veicular, terminais logísticos, instalações portuárias ou redes de distribuição. A solução oferece maior controle sobre origem, destino e condições de operação do produto. Também permite atender mercados que não possuem acesso ao sistema de gás existente. Em contrapartida, exige investimento próprio em infraestrutura e depende de volume regular durante período suficiente para amortizar os custos de implantação e operação.

[148] BRASIL. Decreto nº 10.712, de 2 de junho de 2021. Regulamenta a Lei nº 14.134/2021. O art. 4º estabelece tratamento regulatório equivalente ao gás natural para o biometano e outros gases intercambiáveis, desde que atendidas as especificações da ANP. Disponível em: https://www.presidencia.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/decreto/d10712.htm. Acesso em: 13 set. 2026.
[149] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Biometano e regulamentação das especificações e do controle da qualidade. Brasília: ANP. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano. Acesso em: 13 set. 2026.
[150] TRANSPORTADORA BRASILEIRA GASODUTO BOLÍVIA-BRASIL. Traçado do Gasoduto Bolívia-Brasil. Rio de Janeiro: TBG. Disponível em: https://www.tbg.com.br/tra%C3%A7ado-do-gasoduto. Acesso em: 13 set. 2026.

A segunda alternativa consiste na conexão das unidades produtoras ao GASBOL ou a redes estaduais de distribuição. Após o tratamento e a especificação do biometano, seriam implantados apenas os ramais necessários para conduzir o produto até um ponto de recebimento tecnicamente habilitado. A infraestrutura existente seria utilizada para transportar o gás até outros pontos do sistema. Essa solução pode reduzir a necessidade de novos dutos troncais, mas não elimina os investimentos em coleta, purificação, compressão, medição e conexão.

A utilização do GASBOL também não constitui um acesso automático ou gratuito. A Lei Federal nº 14.134/2021 atribui à ANP a regulação e a fiscalização do acesso de terceiros aos gasodutos de transporte e estabelece que a utilização da capacidade deve observar as condições técnicas e contratuais aplicáveis[151]A viabilidade depende da capacidade efetivamente contratável, e não apenas da capacidade física nominal do gasoduto. Também devem ser consideradas as tarifas de entrada, transporte e saída, as condições do fluxo, os investimentos necessários no ponto de conexão e as exigências operacionais da TBG.

A terceira alternativa é a formação de redes coletoras regionais. Nessa configuração, a produção de diversas unidades seria reunida em uma infraestrutura comum e conduzida até um ponto de conexão com o GASBOL, uma rede de distribuição ou um grande consumidor. O agrupamento pode produzir escala suficiente para viabilizar investimentos que não seriam sustentáveis para uma única usina. Essa alternativa apresenta interesse especial nas regiões sucroenergéticas, onde há concentração relativa de unidades produtoras, mas dispersão suficiente para tornar antieconômica a implantação de um ramal independente para cada instalação.

A solução híbrida combina essas alternativas. Redes coletoras e ramais dedicados atenderiam à primeira etapa da movimentação, conectando os produtores a uma infraestrutura troncal existente ou a consumidores estratégicos. Dutovias próprias de maior extensão seriam implantadas apenas onde o GASBOL e as redes de distribuição não oferecessem atendimento técnico ou econômico adequado. Essa configuração tende a reduzir a duplicação de infraestruturas, mas exige maior coordenação entre produtores, transportadores, distribuidoras, órgãos reguladores e consumidores.

Tabela 5-2: Alternativas de infraestrutura dutoviária para movimentação de biometano

Alternativa	Configuração	Vantagens	Condicionantes e limitações
Dutovia dedicada	Ligação direta entre produtor ou polo produtor e consumidor, terminal ou base de distribuição	Controle do traçado e da operação; atendimento a regiões fora da rede existente; possibilidade de preservar a identificação física do produto	Elevado investimento; necessidade de faixa de servidão; dependência de escala e contratos de longo prazo

[151] BRASIL. Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural. O art. 18 atribui à ANP a regulação e a fiscalização do acesso de terceiros aos gasodutos de transporte e da cessão de capacidade. Disponível em: https://www.presidencia.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14134.htm. Acesso em: 13 set. 2026.

Alternativa	Configuração	Vantagens	Condicionantes e limitações
Conexão ao GASBOL ou à rede de distribuição	Ramal entre a unidade produtora e um ponto habilitado de recebimento da infraestrutura existente	Redução da extensão de novos dutos; aproveitamento da rede instalada; acesso potencial a diferentes mercados	Dependência de capacidade contratável, tarifas, especificações de qualidade e condições operacionais
Rede coletora regional	Reunião da produção de diferentes unidades em uma infraestrutura comum	Ganho de escala; compartilhamento dos custos de conexão; integração de polos produtores	Necessidade de coordenação entre produtores, regularidade dos volumes e definição da governança da rede
Solução híbrida	Combinação de redes coletoras, ramais de conexão, infraestrutura existente e trechos dedicados	Redução de investimentos redundantes; adaptação às condições de cada região; expansão gradual	Maior complexidade institucional, contratual e operacional

Fontes: ANP, TBG e normas do DER-SP. Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

A comparação das alternativas deve começar pela análise territorial. O traçado atualizado do GASBOL, seus pontos de entrega e as redes estaduais de distribuição devem ser sobrepostos às unidades produtoras de etanol e biometano, ao potencial de produção de biogás, aos grandes consumidores industriais, às termelétricas, às bases de abastecimento de veículos pesados e aos principais corredores logísticos. Essa análise deverá identificar áreas nas quais a infraestrutura existente se aproxima da produção e dos mercados consumidores e regiões em que novos corredores dutoviários permanecem necessários.

A distância linear entre uma unidade produtora e o GASBOL não é suficiente para determinar a viabilidade da conexão. O estudo deverá identificar o ponto tecnicamente possível de recebimento, a pressão operacional, o sentido do fluxo, a necessidade de compressão, a existência de instalações de medição, a capacidade contratável e os reforços necessários. Também devem ser estimados os custos do ramal e das tarifas de movimentação. Uma unidade próxima ao traçado pode enfrentar custo elevado de conexão, enquanto um conjunto de produtores mais distante pode justificar uma rede coletora compartilhada.

A análise territorial deve considerar a possibilidade de utilização das faixas de domínio das rodovias estaduais. O aproveitamento de corredores existentes pode reduzir a necessidade de novas faixas de servidão e facilitar o acesso a áreas produtoras e consumidoras. Entretanto, a ocupação das faixas de domínio está sujeita a restrições técnicas e regulatórias.

A Norma DE 10/AFD-007 do DER-SP disciplina a implantação de dutos destinados a petróleo, combustíveis derivados e etanol. A norma estabelece tratamento preferencial para a travessia subterrânea da rodovia e admite a ocupação longitudinal apenas em caráter excepcional e por

pequenas extensões[152]. Essa restrição reduz a possibilidade de utilizar continuamente as faixas de domínio rodoviárias para dutovias de biocombustíveis líquidos.

Para gasodutos de gás natural, a Norma DE 16/AFD-011 admite a ocupação longitudinal, desde que o traçado seja compatibilizado com o funcionamento da rodovia, os dispositivos de segurança, os sistemas de drenagem e as futuras ampliações[153]. A infraestrutura deve ser implantada, sempre que tecnicamente possível, próxima ao limite da faixa de domínio. Como a norma menciona expressamente o gás natural, sua aplicação aos dutos destinados exclusivamente ao biometano deverá ser confirmada por análise jurídica e regulatória. O tratamento federal equivalente entre biometano e gás natural, quando atendidas as especificações da ANP, constitui fundamento relevante, mas não dispensa a manifestação dos órgãos responsáveis pela faixa de domínio.

Nos trechos concedidos, a análise deverá distinguir a titularidade pública da faixa de domínio da gestão cotidiana realizada pela concessionária. A implantação de dutos pode exigir anuência, compatibilização com projetos de ampliação, definição de responsabilidades pela manutenção e observância dos contratos de concessão. Também deverão ser examinados os riscos de interferência com pistas, dispositivos, obras de arte, redes de serviços públicos e áreas destinadas a futuras expansões.

Todas as alternativas deverão atender aos requisitos de segurança e integridade aplicáveis aos dutos terrestres. O traçado deverá considerar áreas urbanizadas, travessias de cursos d'água, unidades de conservação, áreas de risco geotécnico e proximidade de ocupações sensíveis. Sistemas de monitoramento, válvulas de bloqueio, planos de emergência e procedimentos de inspeção deverão integrar a estimativa dos investimentos e custos operacionais[154].

A competição com o GASBOL poderá ser classificada como alta quando houver ponto viável de conexão, capacidade contratável, acesso aos mercados de destino e custo de conexão e transporte inferior ao de uma dutovia dedicada. Nesses casos, a construção de um duto troncal paralelo poderá representar duplicação de infraestrutura, permanecendo necessários apenas os ramais de coleta e conexão.

A competição será moderada quando o GASBOL estiver relativamente próximo, mas forem necessários ramais extensos, reforços de capacidade ou investimentos elevados em compressão e medição. Nessa situação, deverão ser comparados o custo total da conexão e o custo de um corredor dedicado.

A competição será baixa quando as unidades produtoras e os consumidores estiverem distantes da malha existente, quando a capacidade ou as tarifas inviabilizarem a conexão, ou quando uma rede coletora dedicada puder reunir diversos produtores e atender diretamente a um mercado específico. Não haverá competição operacional direta com o GASBOL quando o produto transportado for etanol, biodiesel, diesel verde, SAF ou outro biocombustível líquido.

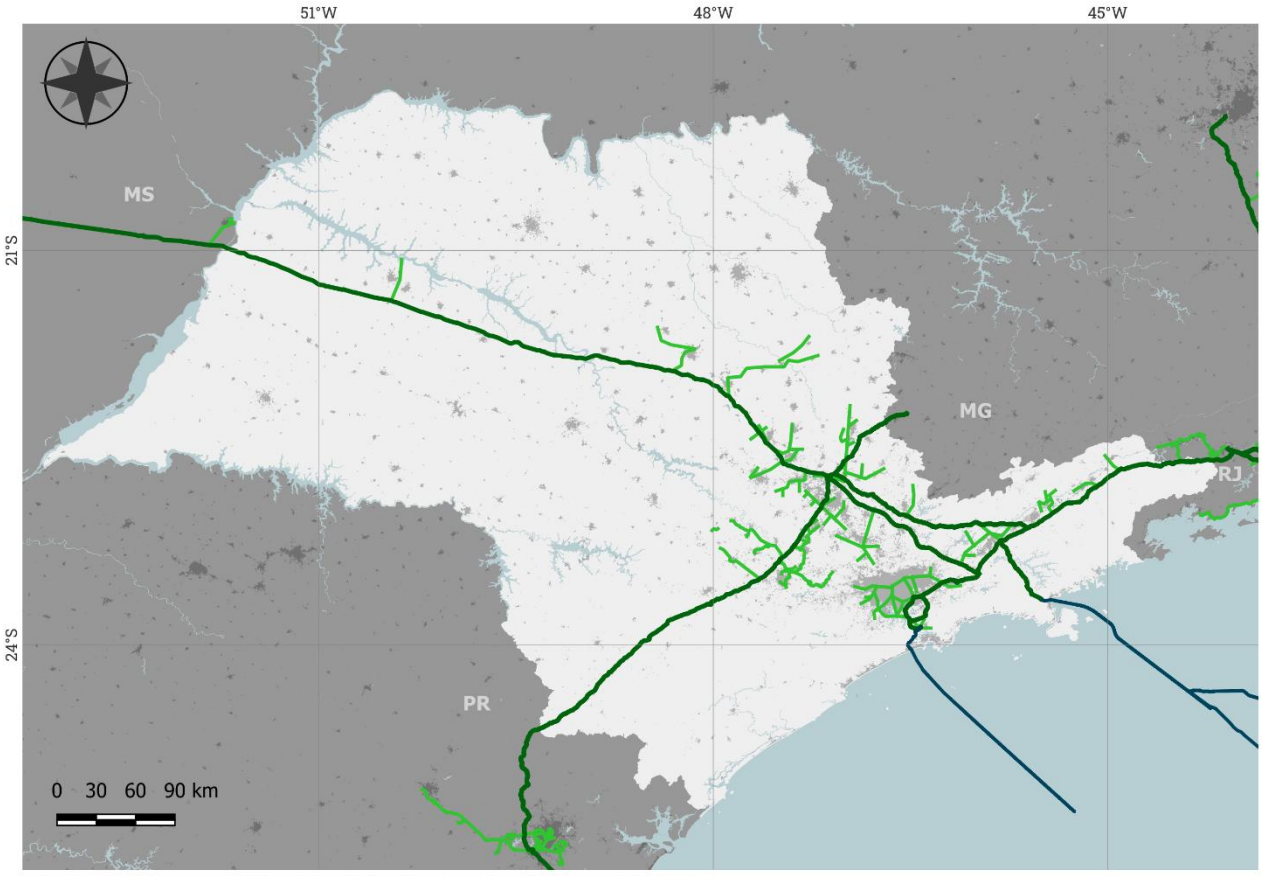
A leitura conjunta da distribuição dos gasodutos e da localização das usinas sucroenergéticas permite identificar diferentes condições territoriais para o desenvolvimento da infraestrutura de

[152] DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Norma DE 10/AFD-007. Administração da faixa de domínio: autorização para implantação de ductos para petróleo, combustíveis derivados e etanol. Aprovada pela Portaria SUP/DER-046, de 8 de junho de 2010.
[153] DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Norma DE 16/AFD-011. Administração da faixa de domínio: autorização para implantação de gasodutos de gás natural. Aprovada pela Portaria SUP/DER-020, de 6 de abril de 2016.
[154] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Regulamento Técnico de Dutos Terrestres. Brasília: ANP. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/regulamento-tecnico-de-dutos-terrestres-rtdt. Acesso em: 13 set. 2026.

movimentação de biometano. O problema consiste em conectar uma oferta potencial distribuída pelo interior paulista a redes e mercados consumidores cuja acessibilidade varia entre as regiões. Essa configuração exige avaliar onde o aproveitamento da infraestrutura existente pode reduzir os investimentos necessários e onde a distância entre produtores e redes demanda soluções próprias de coleta e transporte.

A abaixo apresenta uma rede de transporte que atravessa o território paulista e se articula com ramificações de distribuição mais densas na porção leste do Estado. Em grande parte do interior, a presença de gasodutos de transporte contrasta com a menor capilaridade das redes de distribuição representadas. Essa diferença é relevante para o planejamento: a passagem de um gasoduto por determinada região não significa que os produtores e consumidores próximos disponham de acesso à infraestrutura.

Figura 5-1: Distribuição de Gasodutos no Estado de São Paulo.



São Paulo, Brasil; SRC: EPSG:4674 - SIRGAS 2000; Elaboração: Consórcio Concremat Transplan

Legenda:

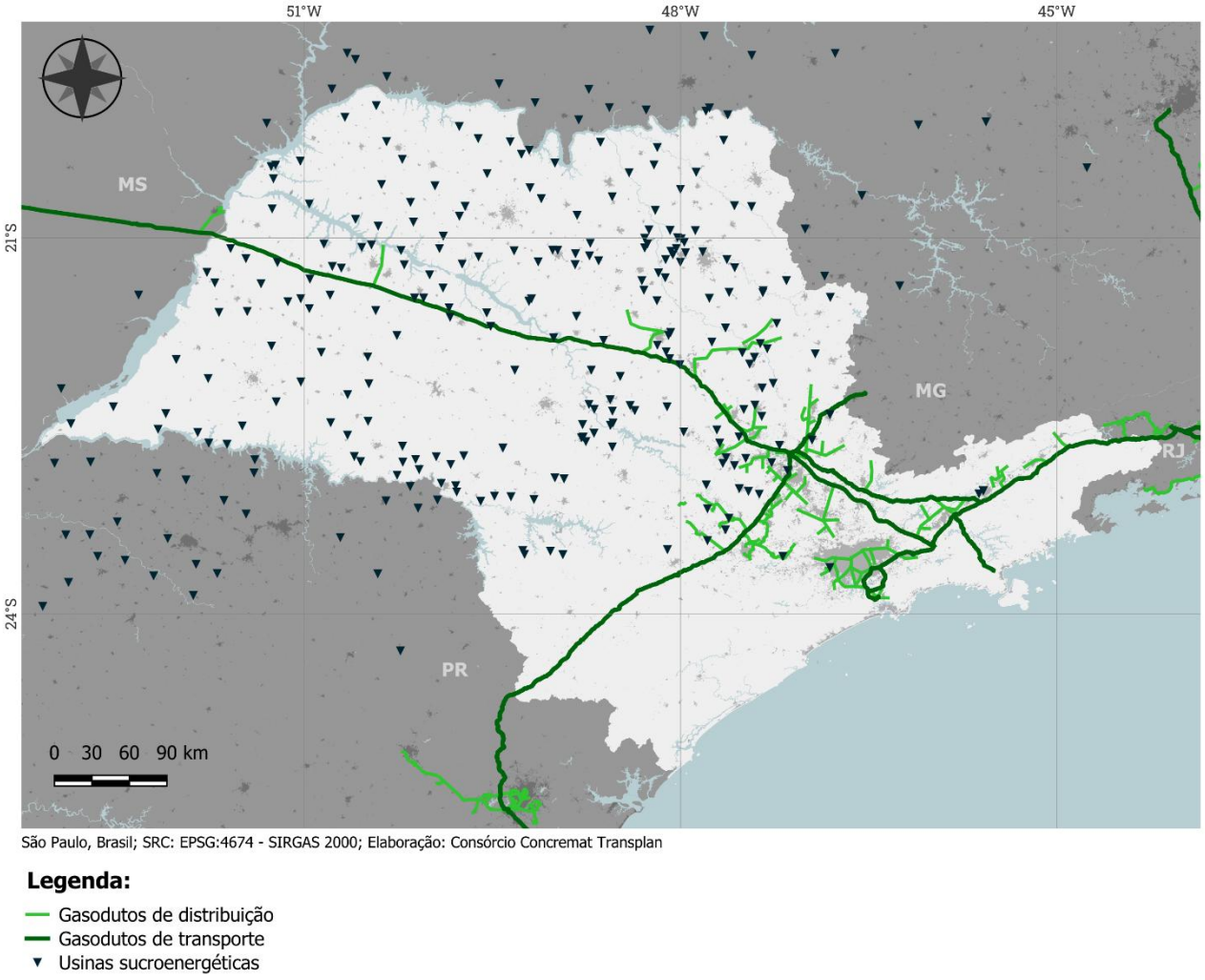
- Gasodutos de distribuição
- Gasodutos de transporte
- Gasodutos de escoamento

Para o aproveitamento dessa rede pelo biometano, devem ser identificados os pontos nos quais seria tecnicamente possível receber o combustível e as condições necessárias à conexão. O mapa permite reconhecer a proximidade territorial entre regiões e gasodutos, mas não informa a capacidade disponível, os pontos habilitados para injeção ou os custos de acesso. Além disso, a legenda distingue gasodutos de transporte, distribuição e escoamento, sem individualizar os

sistemas. A avaliação específica do GASBOL deverá, portanto, ser apoiada na identificação de seu traçado e de suas instalações, evitando atribuir a ele toda a malha de transporte representada.

O mapa baixo com a localização das usinas sucroenergéticas e evidencia sua presença disseminada pelo interior, com numerosos estabelecimentos nas porções norte e oeste e agrupamentos próximos a determinados trechos da rede. Observam-se tanto usinas situadas nas proximidades dos gasodutos quanto conjuntos localizados em áreas com menor cobertura da infraestrutura representada. A sobreposição permite, assim, reconhecer situações distintas de acesso potencial à rede, que devem orientar a comparação das alternativas de investimento.

Figura 5-2: Distribuição de Gasodutos no Estado de São Paulo e Usinas Sucroenergéticas



As usinas constituem uma referência territorial para investigar o aproveitamento de resíduos e subprodutos da atividade sucroenergética. Sua presença no mapa, entretanto, não comprova produção atual de biometano nem permite estimar o volume disponível para comercialização. A análise deverá diferenciar unidades com produção em operação, projetos em implantação e instalações com potencial ainda não desenvolvido. Também deverá considerar a disponibilidade de matéria-prima, a sazonalidade, o consumo próprio e os compromissos de fornecimento, pois

a quantidade de usinas de uma região não corresponde, necessariamente, à escala de oferta que poderá sustentar uma infraestrutura compartilhada.

A primeira situação a examinar corresponde às unidades próximas dos gasodutos de transporte ou das redes de distribuição. Nesses casos, a alternativa inicial é avaliar ramais de conexão aos pontos tecnicamente habilitados, comparando o investimento e o custo de utilização da rede com outras formas de atendimento aos consumidores. A proximidade cartográfica constitui um critério de triagem, mas a seleção dos projetos dependerá do percurso efetivo do ramal, das condições de recebimento e do volume que poderá ser movimentado.

A segunda situação corresponde aos agrupamentos de usinas cuja conexão individual exigiria a repetição de ramais e instalações. Para esses conjuntos, devem ser avaliadas redes coletoras regionais capazes de reunir a produção e conduzi-la a um ponto comum de conexão ou consumo. A solução poderá compartilhar investimentos e ampliar a escala de fornecimento, desde que haja compatibilidade entre os volumes, os prazos de implantação e os compromissos dos produtores. A definição dessas redes deverá esclarecer se a coleta ocorrerá antes ou depois do tratamento do gás, pois essa escolha altera as instalações necessárias e a organização operacional do projeto.

A terceira situação envolve agrupamentos afastados das redes existentes. Nessas áreas, a análise deverá verificar se há consumidores com demanda suficiente para justificar uma dutovia dedicada ou uma rede local. Na ausência dessas condições, o transporte rodoviário de gás comprimido ou liquefeito deverá integrar a comparação, inclusive como alternativa para uma etapa inicial de atendimento. A menor cobertura dutoviária, isoladamente, não constitui justificativa suficiente para a implantação de um novo duto.

A seleção dos corredores de abastecimento deverá considerar a localização da oferta efetiva ou prevista de biometano e as alternativas para fazê-lo chegar aos postos. De forma complementar, a demanda dos veículos beneficiados pelos incentivos poderá compor a avaliação dos projetos de distribuição. O planejamento conjunto dessas medidas permitirá verificar se a expansão da frota e os investimentos em suprimento apresentam volumes e cronogramas compatíveis.

As figuras sustentam, portanto, a investigação de uma combinação de ramais, redes coletoras e ligações dedicadas, adaptada às condições de cada região. A escolha entre essas configurações deverá resultar da comparação de oferta, demanda e custos.

c) Encaminhamento

O fomento ao desenvolvimento de dutovias para transporte de biocombustíveis de será encaminhado para análise fora da rede no Produto D-14. Embora as alternativas envolvam infraestruturas lineares e conexões territoriais, sua avaliação depende principalmente de estudos de viabilidade técnica, econômica, regulatória, institucional e ambiental. A análise deverá comparar o desenvolvimento de novas dutovias com o aproveitamento do GASBOL e das redes estaduais de distribuição. Também deverá considerar soluções híbridas, nas quais redes coletoras e ramais de conexão sejam combinados com a infraestrutura existente. O objetivo será identificar os projetos e corredores com condições suficientes para avançar para etapas posteriores de estruturação e viabilidade.

O Produto D-14 deverá analisar os seguintes projetos:

- Ramais de conexão das unidades produtoras ao GASBOL

Identificação das unidades produtoras com potencial de conexão, dos pontos tecnicamente possíveis de recebimento e dos investimentos necessários em ramais, compressão, medição e controle. A análise deverá considerar a capacidade efetivamente contratável, as tarifas de entrada, transporte e saída, as condições operacionais e os mercados consumidores que poderiam ser alcançados pelo sistema.

- Ramais de conexão às redes estaduais de distribuição de gás

Avaliação da ligação das unidades produtoras às redes de distribuição existentes ou planejadas. O projeto deverá comparar a conexão à rede estadual com a conexão direta ao sistema de transporte, considerando as condições técnicas, regulatórias e comerciais estabelecidas pelas distribuidoras e pela regulação estadual.

- Dutovias dedicadas para transporte de biometano

Avaliação de corredores próprios ligando polos produtores a consumidores industriais, termelétricas, bases de abastecimento de veículos pesados, terminais logísticos ou instalações portuárias não atendidas pela infraestrutura existente. A análise deverá considerar escala mínima, demanda potencial, custos de implantação e operação, faixas de servidão, requisitos de segurança e condicionantes territoriais e ambientais.

- Dutovias para biocombustíveis líquidos

Avaliação de corredores destinados à movimentação de etanol, biodiesel, diesel verde, combustível sustentável de aviação, SAF, ou outros biocombustíveis líquidos entre áreas produtoras, bases de distribuição, terminais intermodais, aeroportos e instalações portuárias. Esses projetos deverão ser analisados separadamente da infraestrutura destinada ao biometano, pois não apresentam competição operacional com o GASBOL.

- Corredores dutoviários associados às faixas de domínio rodoviárias

Avaliação da viabilidade técnica e jurídica da utilização das faixas de domínio das rodovias estaduais para travessias e, quando admitidas, ocupações longitudinais. O estudo deverá diferenciar os trechos administrados diretamente pelo DER-SP daqueles sob gestão de concessionárias, identificar interferências com a infraestrutura rodoviária existente e planejada e verificar a compatibilidade dos projetos com as normas aplicáveis.

A avaliação comparativa deverá considerar a produção atual e potencial de biometano, a regularidade da oferta, a localização dos consumidores, a extensão dos ramais e dutos, os investimentos em compressão e medição, a capacidade contratável da infraestrutura existente, as tarifas de transporte, os custos de implantação e operação, as interferências territoriais, os requisitos de licenciamento, os riscos operacionais e o potencial de redução de emissões e custos logísticos.

O Produto D-11 registra o problema, apresenta as configurações possíveis e define os critérios para seu encaminhamento. O Produto D-14 deverá aprofundar a viabilidade das alternativas, comparar seus custos e benefícios, identificar os principais entraves e indicar os corredores e projetos com condições para avançar para estudos de engenharia e estruturação.

6 INTEGRAÇÃO MODAL E NOVOS SERVIÇOS

A integração entre modos de transporte e a organização de novos serviços podem ampliar o aproveitamento da infraestrutura existente, melhorar a conectividade regional e reduzir custos e dificuldades de deslocamento de passageiros e cargas. Nos contatos setoriais, essas possibilidades foram associadas tanto à superação de gargalos nas conexões entre redes e terminais quanto à revisão das formas de prestação dos serviços, considerando mudanças na demanda e nas necessidades das cadeias produtivas.

Este capítulo reúne contribuições relacionadas às conexões com o transporte marítimo, ao transporte de cargas em corredores associados ao TIC, às áreas de desenvolvimento ao longo de ferrovias e à manutenção dos serviços inter-regionais de passageiros. Também examina sistemas intermodais no interior paulista, a ampliação do transporte de cargas pela Hidrovia Tietê-Paraná, novos serviços e instalações para o transporte aquaviário de passageiros e o uso de plataformas digitais para otimizar o transporte de cargas. Esses temas apresentam diferentes escalas e condições de implantação, exigindo avaliações específicas de demanda, capacidade, compatibilidade operacional e articulação entre os agentes envolvidos.

As análises procuram distinguir as propostas que apresentam condições para aprofundamento daquelas cujas continuidades encontra restrições técnicas ou depende de informações adicionais. Os encaminhamentos consideram a possibilidade de representação das alternativas na rede de transportes, para avaliação no Produto D-12, e a necessidade de estudos complementares no Produto D-14. Dessa forma, a discussão sobre integração modal e novos serviços contribui para qualificar as possibilidades de atuação do Plano, sem pressupor que todas as propostas levantadas devam resultar em novos projetos.

6.1 Conexões com transporte marítimo

a) Contextualização

A inserção do Estado de São Paulo no transporte marítimo depende de um sistema logístico formado pelos portos, seus canais de acesso, terminais, retroáreas, pátios reguladores e conexões rodoviárias, ferroviárias e dutoviárias com as regiões produtoras e consumidoras. O desempenho desse sistema não é determinado apenas pela capacidade de movimentação dos terminais. Restrições em qualquer um de seus componentes podem limitar o conjunto da operação, elevar os tempos de espera, reduzir a confiabilidade dos serviços e aumentar os custos das cadeias produtivas atendidas.

O sistema portuário paulista está fortemente concentrado no Porto de Santos, principal ponto de entrada e saída das cargas estaduais e um dos principais nós do comércio exterior brasileiro. Essa concentração oferece vantagens de escala, diversidade de serviços, frequência de linhas marítimas e conexão com uma ampla hinterlândia. Ao mesmo tempo, aumenta a exposição do Estado aos efeitos de interrupções, saturação ou perda de eficiência em um único complexo portuário.

Em Santos, a expansão da movimentação de contêineres, granéis sólidos, granéis líquidos e cargas gerais exerce pressão simultânea sobre os terminais, o canal de navegação, as ferrovias, o Sistema Anchieta-Imigrantes e os acessos urbanos de Santos, Cubatão e Guarujá. A capacidade de cais pode ser ampliada sem que os acessos terrestres cresçam no mesmo ritmo. De forma inversa, investimentos rodoviários ou ferroviários isolados podem transferir o gargalo para os pátios, portões de acesso aos terminais, linhas internas ou berços. A avaliação da capacidade portuária deve, portanto, considerar a operação integrada desses componentes.

A ligação entre o planalto e a Baixada Santista constitui um dos pontos mais sensíveis desse sistema. O transporte rodoviário depende principalmente do Sistema Anchieta-Imigrantes e de seus acessos complementares, sujeitos à concentração de fluxos de carga e passageiros, às restrições impostas pela Serra do Mar e aos conflitos com o tráfego urbano. No sistema ferroviário, a capacidade das descidas, a operação das concessionárias, a Ferrovia Interna do Porto de Santos e as conexões com terminais e retroáreas condicionam o volume que pode chegar ao porto com regularidade.

A operação do sistema de Santos também afeta diretamente a mobilidade urbana da Baixada Santista. A circulação de caminhões com destino aos terminais portuários compartilha trechos da rede viária com deslocamentos cotidianos de passageiros, transporte coletivo e atividades urbanas, especialmente em Santos, Cubatão e Guarujá. Filas, períodos de espera e concentração de chegadas podem provocar congestionamentos, aumentar os tempos de viagem e ampliar os conflitos entre o tráfego portuário e os usos locais das vias. Por essa razão, a avaliação dos acessos ao porto deve considerar não apenas a eficiência do transporte de cargas, mas também a segregação dos fluxos, a segurança viária e os efeitos das intervenções sobre a mobilidade da população.

Essas limitações afetam de maneira diferente as cadeias produtivas. Fluxos com grande escala, contratos de longo prazo ou terminais especializados podem apresentar maior capacidade de assegurar espaço na infraestrutura. Cargas industriais, contêineres e produtos com menor volume individual podem enfrentar custos adicionais, menor previsibilidade ou dificuldade de acesso às janelas operacionais. A perda de confiabilidade pode estimular a transferência de cargas ferroviárias para o transporte rodoviário ou o direcionamento de fluxos a portos de outros estados.

A carteira associada ao Porto de Santos reúne projetos com funções distintas e interdependentes. Estão incluídas novas ligações entre o planalto e a Baixada, ampliações e alternativas rodoviárias, novas conexões ferroviárias, dutovia para combustíveis, expansão de berços e terminais, implantação de terminais de uso privado, novas retroáreas e pátios reguladores. Também fazem parte do contexto intervenções já comprometidas ou conduzidas por entes federais e operadores externos, cujos efeitos deverão ser incorporados às condições futuras de oferta, ainda que sua decisão não pertença ao PLI-SP 2050.

A expansão de Santos também enfrenta limites territoriais. O porto está inserido em uma área urbana e industrial densamente ocupada, com presença de manguezais, estuários, mananciais, áreas contaminadas, comunidades e infraestruturas consolidadas. Novos acessos, terminais e retroáreas disputam espaço com usos urbanos, industriais e ambientais. Além dos custos de engenharia, os projetos devem considerar desapropriações, interferências com redes existentes, riscos de inundação e escorregamento, licenciamento costeiro e compatibilidade com o planejamento urbano e o Zoneamento Ecológico-Econômico.

Diante da concentração das operações em Santos e das limitações para sua expansão, o Porto de São Sebastião representa uma alternativa para diversificar territorialmente o sistema marítimo paulista. O porto dispõe de condições naturais favoráveis à navegação e pode ampliar sua participação na movimentação de contêineres, granéis, cargas especializadas e operações relacionadas às cadeias de energia e apoio offshore. Sua contribuição dependerá, entretanto, da capacidade dos terminais, das áreas de apoio disponíveis e da qualidade das conexões com o Vale do Paraíba, a Região Metropolitana de São Paulo e o interior do Estado.

Os projetos associados a São Sebastião incluem a ampliação do terminal SSB01, novos berços, intervenções na Baía do Araçá, dutovia de etanol, instalações para embarcações de apoio, retroáreas e estruturas logísticas em Caraguatatuba. A carteira considera ainda a duplicação de acessos rodoviários e uma possível ligação ferroviária entre Guararema e o Porto de São Sebastião. Esses projetos não devem ser avaliados isoladamente. A ampliação dos terminais

altera a demanda sobre a SP-099, o Contorno de São Sebastião, a SP-055 e a infraestrutura urbana do litoral norte, enquanto novos acessos podem não produzir benefícios portuários relevantes sem oferta correspondente de terminais e serviços marítimos.

O desenvolvimento de São Sebastião também envolve condicionantes territoriais e ambientais próprios. O litoral norte apresenta ocupação urbana concentrada, áreas protegidas, encostas suscetíveis a movimentos de massa, limitações de áreas planas e conflitos entre atividades portuárias, turísticas, residenciais e ambientais. A expansão deverá ser articulada aos planos diretores municipais, ao Zoneamento Ecológico-Econômico, ao licenciamento dos empreendimentos e às estratégias de desenvolvimento econômico de São Sebastião, Caraguatatuba e do Vale do Paraíba.

O terceiro conjunto corresponde à hipótese de implantação de um novo porto no litoral sul, tendo Peruíbe como referência inicial e mantendo-se aberta a avaliação de áreas alternativas. Essa possibilidade responde à necessidade de examinar soluções de longo prazo para a expansão da capacidade marítima paulista, sobretudo em cenários nos quais as ampliações de Santos e São Sebastião não sejam suficientes ou não atendam de maneira competitiva a determinados fluxos.

A implantação de um novo porto exigiria a formação de um sistema logístico praticamente novo. Além dos terminais marítimos, seriam necessários acessos rodoviários e ferroviários, retroáreas, pátios, conexões com as regiões produtoras e equipamentos para armazenagem e transbordo. Entre as intervenções associadas estão a duplicação da SP-079 entre Juquiá e Piedade, uma nova descida ferroviária por livre aderência em direção ao litoral, a conexão com Sorocaba e a extensão do sistema ferroviário em direção a Pederneiras e Araçatuba.

A viabilidade dessa alternativa depende da existência de demanda capturável suficiente e da possibilidade de oferecer custos e níveis de serviço competitivos em relação a Santos, São Sebastião, Paranaguá e outros portos. Também deverá ser definida sua vocação: cargas agrícolas, contêineres, granéis, cargas atualmente marginalizadas ou uma combinação desses segmentos. Sem essa definição, não é possível dimensionar adequadamente o canal, os berços, os terminais, as retroáreas e os acessos terrestres.

O litoral sul e o Vale do Ribeira apresentam elevada sensibilidade socioambiental. A avaliação de um novo porto deverá considerar unidades de conservação, manguezais, mananciais, terras e comunidades indígenas, comunidades tradicionais, riscos de inundação e escorregamento e os efeitos sobre os municípios e atividades existentes. A necessidade de compatibilização com o Zoneamento Ecológico-Econômico e a possibilidade de aplicação de Avaliação Ambiental Estratégica são, nesse caso, componentes centrais da decisão, e não etapas acessórias posteriores à escolha do sítio.

Os três sistemas não constituem alternativas inteiramente independentes. A expansão de Santos, o fortalecimento de São Sebastião e a implantação de um novo porto podem disputar parcelas da mesma demanda, mas também podem atender cargas, regiões e funções complementares. A ampliação de um porto pode alterar os fluxos dos demais, redistribuir a utilização dos corredores terrestres e induzir novas localizações de terminais, retroáreas e atividades produtivas.

Essa interdependência exige distinguir projetos concorrentes, complementares, condicionantes e já comprometidos. Uma nova capacidade portuária somente produz resultados se estiver associada a acessos e áreas de apoio compatíveis. Um novo acesso terrestre, por sua vez, precisa estar vinculado a volumes, terminais e serviços portuários capazes de utilizá-lo. Projetos federais, estaduais, municipais e privados também possuem diferentes graus de maturidade, competências decisórias e horizontes de implantação.

O problema central é determinar como combinar a expansão e a modernização do Porto de Santos, o aproveitamento do potencial de São Sebastião e a avaliação de novas alternativas no

litoral sul, assegurando que terminais, canais, retroáreas e corredores terrestres evoluam de forma coordenada. Essa definição deverá considerar capacidade, demanda, custos logísticos, confiabilidade, competição entre portos, impactos territoriais e ambientais e a repartição de responsabilidades entre União, Estado, municípios, autoridades portuárias, concessionárias e investidores privados.

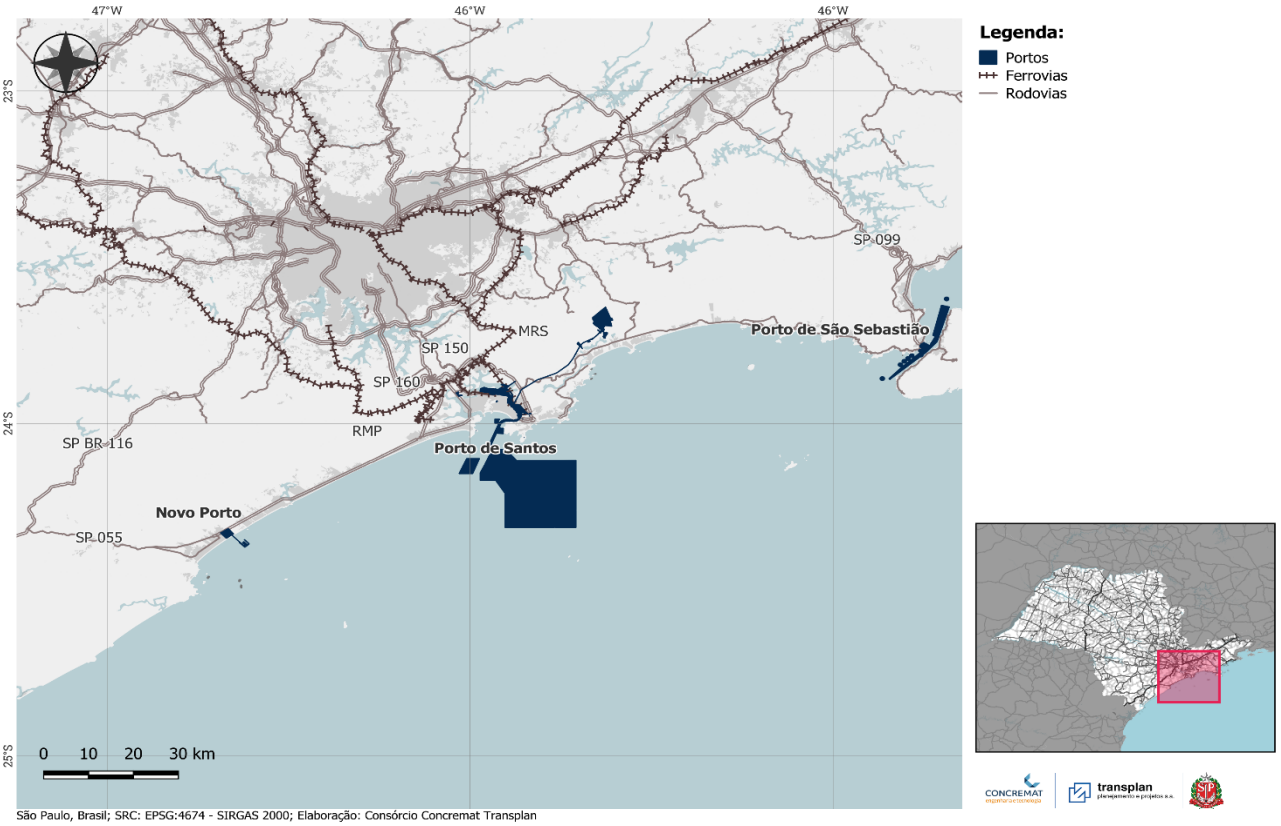
b) Análise

A análise das conexões com o transporte marítimo deve considerar de forma integrada a capacidade dos portos, seus acessos terrestres, as instalações de apoio e retroáreas e as relações entre a atividade portuária e o território. A ampliação isolada de berços ou terminais não assegura aumento equivalente da capacidade efetiva do sistema se persistirem restrições no canal de navegação, nos acessos rodoviários e ferroviários, nos pátios reguladores, nos portões dos terminais ou na circulação interna do porto. Da mesma forma, investimentos nos acessos terrestres podem produzir resultados limitados quando não são acompanhados pela expansão da capacidade de recepção, armazenagem e movimentação das cargas.

Para o Estado de São Paulo, a questão envolve três sistemas com funções e graus de maturidade distintos: o complexo portuário de Santos, principal porta de entrada e saída das cargas estaduais e nacionais; o Porto de São Sebastião, com potencial de complementaridade e especialização; e a possibilidade de implantação, no litoral sul, de uma nova instalação portuária. Esses sistemas não devem ser analisados como empreendimento independentes, mas como alternativas parcialmente concorrentes e complementares para atender ao crescimento da demanda, aumentar a resiliência logística e reduzir a concentração das operações em Santos.

O mapa a seguir representa a localização de Santos, São Sebastião e a alternativa no litoral sul, com os principais corredores rodoviários e ferroviários de conexão com o interior.

Figura 6-1: Sistemas portuários e áreas de influência consideradas



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

O Produto D-10 contempla a simulação em rede das obras comprometidas. A tabela a seguir apresenta as intervenções relacionadas às conexões com o transporte marítimo identificadas no planejamento governamental. Entre elas, aquelas efetivamente incorporadas à rede do D-10 terão seus resultados utilizados como base para a avaliação dos projetos adicionais no Produto D-12.

Tabela 6-1: Intervenções programadas ou comprometidas relacionadas às conexões com o transporte marítimo

Intervenção	Sistema atendido	Situação e horizonte indicado
Terceira pista da Rodovia dos Imigrantes/nova descida para Santos	Planalto–Baixada Santista	Em estudo, com previsão de obra iniciada até 2030
Adequação do acesso à margem direita do Porto de Santos	Santos	Em estudo, com previsão de obra iniciada até 2030
Segunda Ponte da Alemoa	Santos–Cubatão	Contratada, com previsão de conclusão até 2030
Túnel Santos–Guarujá	Santos–Guarujá	Contratado, com implantação iniciada até 2030
Melhorias nos acessos rodoviários aos terminais da margem esquerda	Santos–Guarujá	Em estudo, com previsão de obras iniciadas até 2030
Pera ferroviária de Outeirinhos no âmbito da FIPS	Porto de Santos	Contratada, com previsão de conclusão até 2030
Shortline de Santos/Alemoa – Estrada de Ferro de Cubatão	Santos–Cubatão	Iniciativa federal em estruturação
Ligação ferroviária Guararema–Porto de São Sebastião	São Sebastião	Em nível conceitual, com previsão de projeto ou licitação até 2030

Fonte: SLT. Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

As intervenções efetivamente representadas no Produto D-10 não constituem projetos adicionais desta seção. Seus efeitos sobre a capacidade e o desempenho da rede serão incorporados aos resultados utilizados pelo Produto D-12, evitando a duplicação das obras e a contabilização repetida de seus benefícios. As iniciativas ainda não representadas no D-10 deverão ser tratadas como projetos adicionais ou condicionantes externos, conforme sua natureza e seu estágio de desenvolvimento.

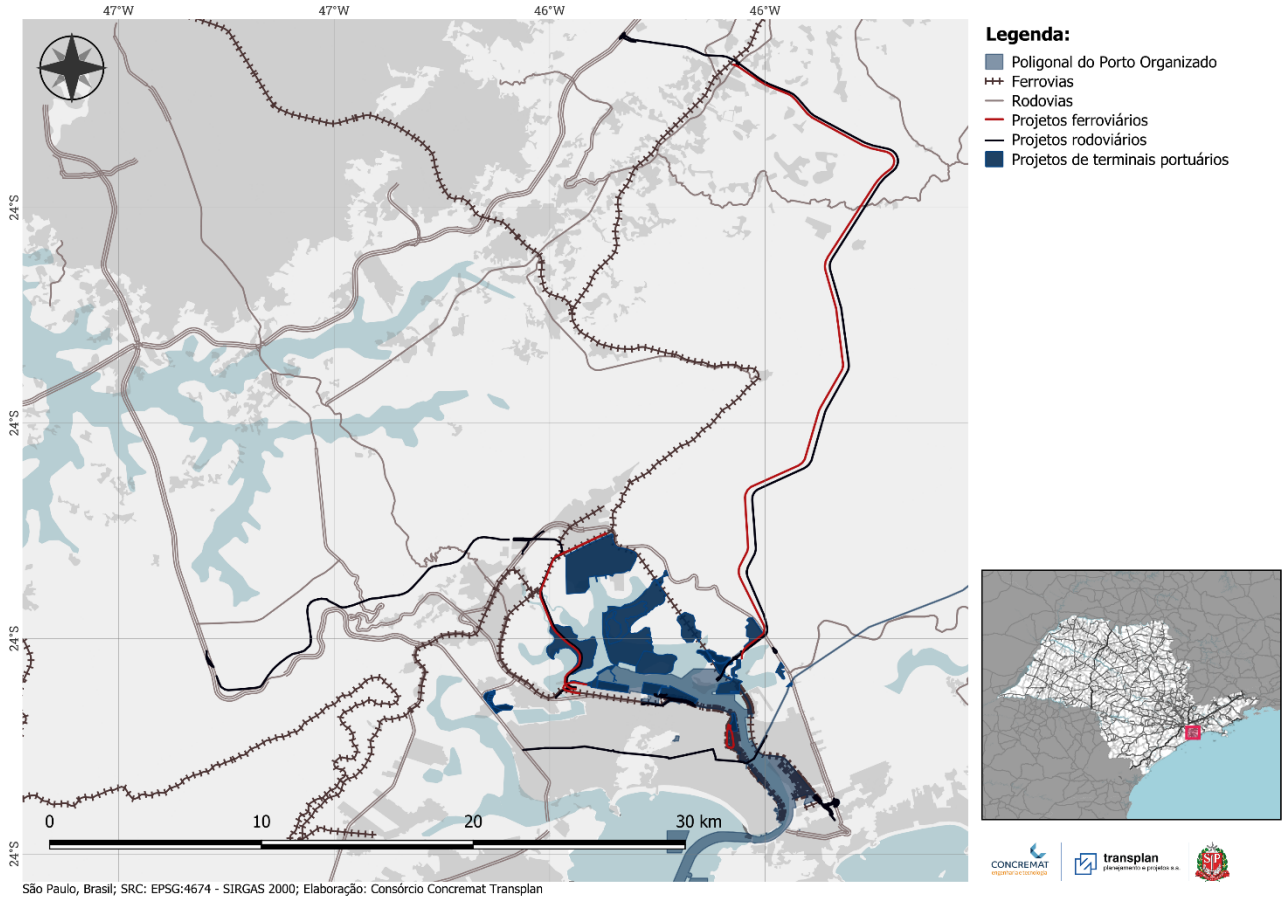
Sistema portuário de Santos

Santos deverá permanecer como o principal núcleo do sistema portuário paulista ao longo do horizonte de planejamento. O porto dispõe de elevada concentração de terminais, serviços logísticos, conexões ferroviárias e rodoviárias e relações consolidadas com as cadeias produtivas do Estado e de outras regiões do país. Essa concentração gera economias de escala, mas também amplia a exposição do sistema a congestionamentos, acidentes, eventos climáticos, interrupções operacionais e conflitos entre usos portuários e urbanos.

A capacidade efetiva do complexo de Santos deverá ser analisada como o menor valor entre as capacidades de seus componentes: canal e áreas de manobra; berços; equipamentos de movimentação; pátios e armazéns; portões dos terminais; sistema viário interno; pátios reguladores; acessos rodoviários e acessos ferroviários. A existência de capacidade ociosa em um terminal não representa, necessariamente, capacidade disponível no sistema quando os acessos correspondentes operam próximos da saturação.

O mapa a seguir apresenta a localização da Baixada Santista com a terceira pista da Imigrantes, acesso à margem direita, Segunda Ponte da Alemoa, túnel Santos–Guarujá, acessos à margem esquerda, Pera de Outeirinhos e Shortline da Alemoa.

Figura 6-2: Intervenções programadas ou comprometidas no sistema de Santos até 2030.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

O crescimento dos fluxos de contêineres, granéis agrícolas, celulose, combustíveis e outras cargas deverá aumentar a competição por capacidade portuária e terrestre. Essa competição não ocorre apenas entre terminais, mas também entre tipos de carga que utilizam os mesmos corredores. A expansão dos granéis agrícolas, por exemplo, pode ampliar a demanda por trens, janelas operacionais e capacidade ferroviária, enquanto o aumento da movimentação de contêineres pressiona os acessos rodoviários, os pátios reguladores e as áreas de armazenagem.

No sistema rodoviário, a análise deverá compreender a descida do Planalto, as conexões entre Cubatão, Santos, São Vicente e Guarujá e os acessos específicos às duas margens do porto. A dependência do Sistema Anchieta–Imigrantes constitui fator de vulnerabilidade, sobretudo nos períodos de maior movimento, em situações de acidentes ou durante eventos meteorológicos severos. A terceira pista da Imigrantes pode ampliar a capacidade de descida, mas seus benefícios dependerão da capacidade de absorção da malha na Baixada Santista. Sem a segregação dos fluxos, a ampliação dos acessos aos terminais e a organização das chegadas de caminhões, parte do ganho obtido na serra poderá apenas transferir filas e congestionamentos para áreas urbanas e portuárias.

A Linha Verde, o corredor Porto–Indústria, a ligação Parelheiros–Itanhaém e o túnel através do maciço entre Santos e São Vicente representam alternativas ou complementos com funções

distintas. Algumas procuram aumentar a capacidade de acesso regional, enquanto outras buscam separar fluxos portuários e urbanos ou criar redundância no sistema. A comparação entre esses projetos deverá verificar quais gargalos cada intervenção efetivamente resolve e se existem sobreposições funcionais.

O sistema ferroviário deverá ser analisado desde as ligações com o interior até a distribuição interna dos trens no porto. As melhorias da Ferrovia Interna do Porto de Santos – FIPS e a Pera Ferroviária de Outeirinhos podem reduzir conflitos e aumentar a eficiência das manobras, mas não eliminam necessariamente as limitações da descida ferroviária do Planalto nem as restrições de capacidade nos trechos de aproximação. A análise deverá considerar a capacidade por sentido, o número e o comprimento dos trens, os tempos de circulação e manobra, a compatibilidade entre operadores e a correspondência entre capacidade ferroviária e capacidade de recepção dos terminais.

As propostas de nova ligação ferroviária entre Santos, o litoral sul e a malha do interior, assim como uma eventual descida ferroviária de livre aderência, somente produzirão benefícios sistêmicos se estiverem associadas a volumes suficientes de carga e a terminais capazes de recebê-los. Por essa razão, a avaliação não deverá se limitar à possibilidade física de implantação: deverá estimar a demanda captável, os custos operacionais, a divisão modal, as conexões com a Malha Paulista e a possibilidade de desviar fluxos que atualmente utilizam o sistema rodoviário.

Também deverão ser examinadas as necessidades de retroáreas e pátios reguladores. Essas instalações permitem organizar as chegadas, reduzir filas nos terminais e transferir atividades de armazenagem e triagem para locais com menor pressão urbana. Entretanto, retroáreas muito distantes ou mal conectadas podem gerar deslocamentos adicionais de caminhões e aumentar os custos logísticos. Sua localização deverá, portanto, considerar o acesso direto às rodovias e ferrovias, a disponibilidade de áreas, as restrições ambientais e a compatibilidade com os planos diretores municipais.

A interação entre o sistema portuário e a cidade acrescenta uma dimensão urbana ao problema logístico. Os fluxos de caminhões destinados aos terminais, pátios reguladores e retroáreas compartilham trechos da malha viária com os deslocamentos cotidianos da população. Filas, retenções nos portões, travessias ferroviárias em nível e concentração das operações em determinados horários afetam o transporte coletivo, os deslocamentos entre bairros e a qualidade ambiental urbana. A ligação entre Santos e Guarujá também acumula funções metropolitanas e portuárias. Assim, intervenções como o túnel Santos–Guarujá e a segregação dos acessos deverão ser avaliadas por seus efeitos sobre a logística e sobre a mobilidade, a segurança viária e a acessibilidade da população.

Sistema portuário de São Sebastião

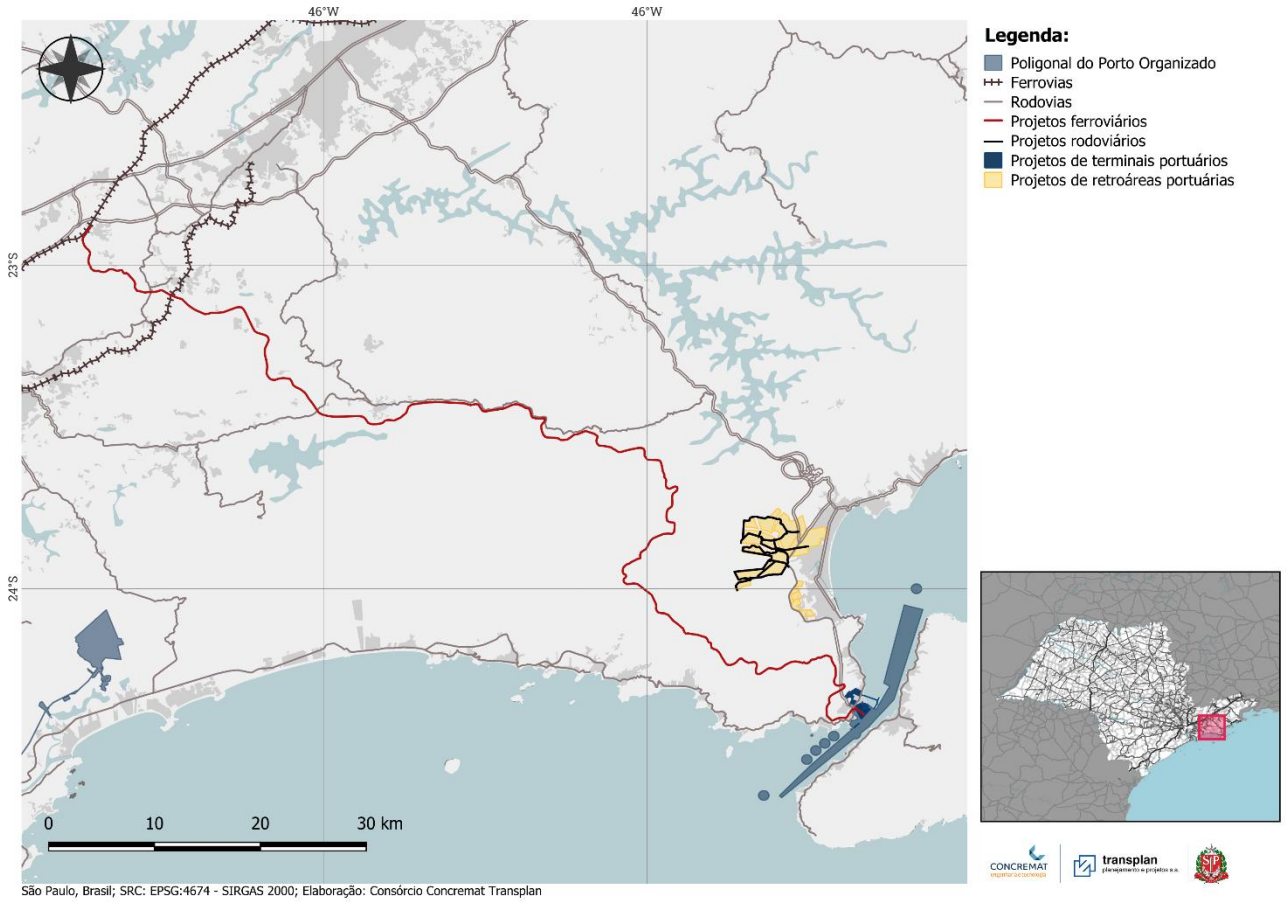
São Sebastião poderá desempenhar uma função complementar a Santos, especialmente para cadeias produtivas localizadas no Vale do Paraíba, no litoral norte e em áreas conectadas ao eixo da Rodovia Presidente Dutra. O porto apresenta condições naturais favoráveis de profundidade e abrigo, mas seu aproveitamento depende da expansão coordenada da capacidade portuária, dos acessos terrestres, das áreas de apoio e dos serviços logísticos.

A ampliação do terminal SSB01, a implantação de novos berços na Baía do Araçá, instalações para embarcações de apoio, dutovias e áreas de apoio offshore devem ser tratadas como componentes de configurações alternativas do porto, e não simplesmente como projetos cumulativos. Parte dessas intervenções pode atender à movimentação de contêineres e carga geral, enquanto outras estão associadas ao abastecimento, aos granéis líquidos ou às atividades de petróleo e gás. A análise deverá determinar quais funções são compatíveis entre si e qual escala de movimentação justifica cada configuração.

A duplicação ou melhoria das rodovias SP-055 e SP-099 deverá ser avaliada em conjunto com o crescimento da atividade portuária. Esses corredores atendem simultaneamente aos fluxos de cargas, aos deslocamentos urbanos e à atividade turística do litoral norte. A expansão do porto sem aumento compatível da capacidade dos acessos poderá acentuar congestionamentos em Caraguatatuba e São Sebastião, especialmente nos períodos de temporada.

A figura abaixo apresenta o mapa com o Porto, SSB01, Baía do Araçá, áreas de apoio offshore, SP-055, SP-099, proposta ferroviária Guararema–São Sebastião e principais restrições ambientais e urbanas. Inserir ao final da análise de São Sebastião.

Figura 6-3: Projetos e condicionantes do sistema portuário de São Sebastião.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

A ligação ferroviária entre Guararema e São Sebastião representa uma possibilidade de mudança estrutural na área de influência do porto. Contudo, como o projeto se encontra em estágio conceitual, sua avaliação deverá considerar alternativas de traçado, custos, restrições topográficas e ambientais, volumes mínimos necessários à operação e conexão com a malha ferroviária existente. Não se deve pressupor que toda a carga captada pelo porto utilizará a ferrovia; a escolha modal dependerá da origem, do tipo de carga, das tarifas, da frequência dos serviços e da confiabilidade operacional.

A capacidade de São Sebastião para desviar cargas de Santos deverá ser estimada por meio de um modelo de escolha portuária ou de uma análise de custos generalizados. Deverão ser considerados, entre outros fatores, os custos terrestres desde a origem da carga, as tarifas portuárias, os tempos de espera e operação, a disponibilidade de serviços marítimos, a frequência das escalas, a capacidade dos terminais e a existência de instalações especializadas.

O simples aumento da capacidade física não assegura a transferência de cargas se o porto não oferecer conectividade marítima e escala comercial suficientes.

Além disso, a expansão portuária e das retroáreas deverá ser compatibilizada com as unidades de conservação, o Zoneamento Ecológico-Econômico do litoral norte, as áreas urbanas consolidadas e as comunidades tradicionais. As alternativas deverão considerar os efeitos sobre manguezais, ecossistemas costeiros, paisagem, turismo, pesca e circulação urbana, bem como os impactos cumulativos com os empreendimentos de petróleo e gás já existentes.

Possibilidade de novo porto no litoral sul

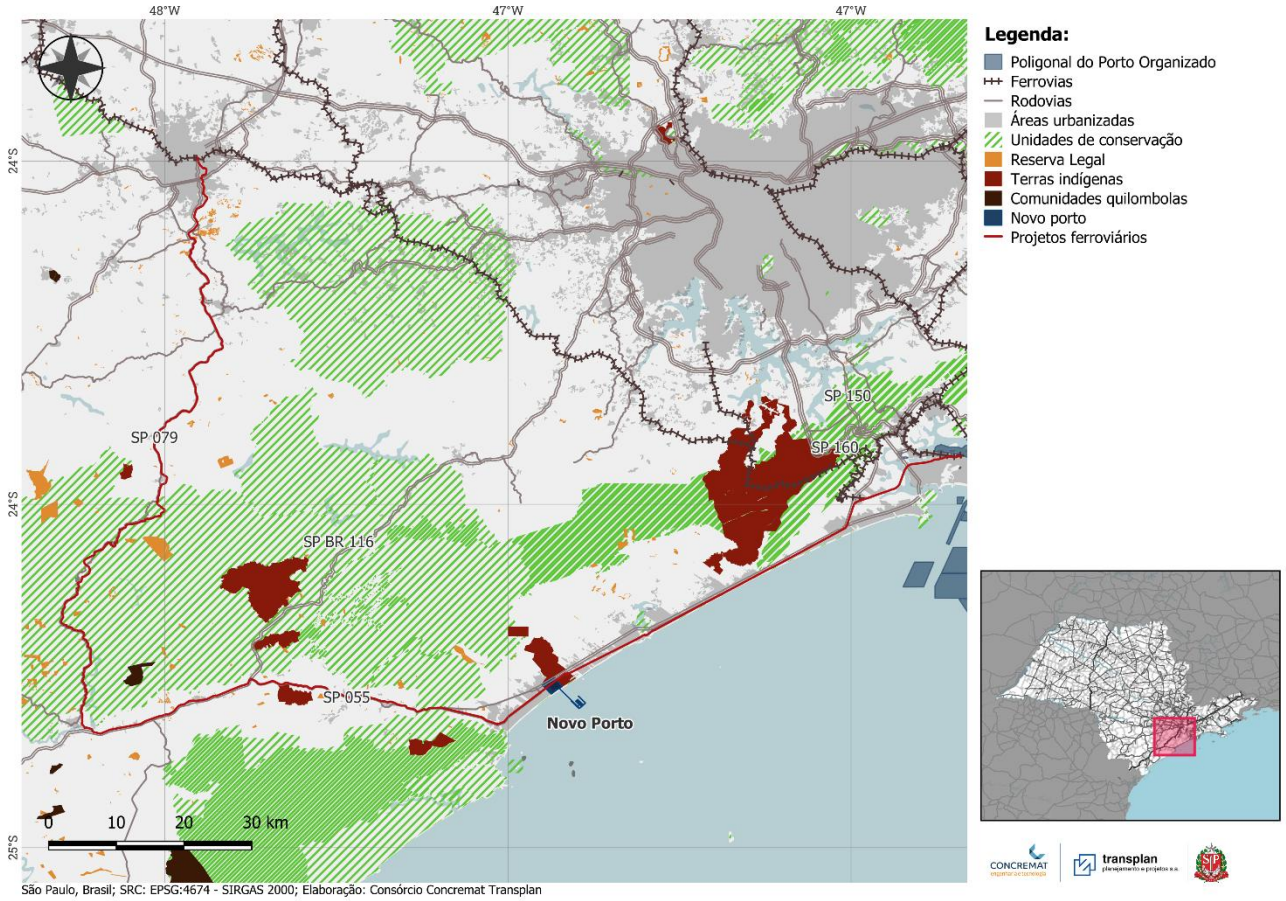
A implantação de um novo porto na região de Peruíbe ou em outra localidade do litoral sul constitui uma alternativa de longo prazo e com grau de incerteza superior ao das intervenções em Santos e São Sebastião. A análise deverá começar pela identificação da função econômica do empreendimento: cargas a serem atendidas, área de influência, capacidade pretendida, tipo de terminal, conexão com rotas marítimas e relação com os portos existentes.

Um novo porto não deverá ser avaliado apenas pela disponibilidade de área costeira. Para se tornar operacional, o empreendimento exigiria um sistema completo formado por canal de acesso, berços, quebra-mares quando necessários, terminais, pátios, retroáreas, energia, abastecimento, acessos rodoviários e ferroviários e conexões com os principais centros produtores. Dessa forma, sua viabilidade deverá considerar o custo do conjunto de infraestruturas, e não apenas o custo das instalações portuárias.

Entre as intervenções associadas encontram-se a melhoria da SP-079 entre Juquiá e Piedade, uma nova descida ferroviária de livre aderência entre a região de Sorocaba e o litoral e sua conexão com os eixos ferroviários do interior. A avaliação deverá verificar se esses acessos possuem demanda independente ou se sua justificativa depende integralmente da implantação do porto. Também será necessário determinar se a carga potencial representa crescimento adicional da demanda, transferência de Santos e São Sebastião ou desvio de portos situados em outros estados.

A figura abaixo representa o mapa regional com Peruíbe, Itanhaém, Vale do Ribeira, BR-116, SP-079, alternativa de descida ferroviária e sobreposição das principais unidades de conservação, terras indígenas e áreas urbanas. Inserir na análise do novo porto.

Figura 6-4: Alternativas de localização e acessos para um novo porto no litoral sul.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

As restrições socioambientais são determinantes. O litoral sul e o Vale do Ribeira concentram unidades de conservação, remanescentes de Mata Atlântica, terras indígenas, comunidades tradicionais, áreas úmidas e territórios com elevada sensibilidade paisagística e turística. A análise de alternativas locacionais deverá preceder a seleção de uma área específica e considerar, inclusive, a alternativa de não implantação. A eventual necessidade de grandes compensações, reassentamentos ou travessias de áreas protegidas pode modificar substancialmente os custos e os prazos do empreendimento.

Nesse sentido, o novo porto deverá ser tratado como alternativa estratégica de longo prazo, sujeita a estudos de demanda, engenharia, localização, viabilidade econômico-financeira e Avaliação Ambiental Estratégica. Sua comparação com a expansão dos portos existentes deverá utilizar a mesma base de demanda e contemplar custos de implantação, acessos, operação, impactos ambientais e tempo necessário para entrada em funcionamento.

Em síntese, o problema não consiste apenas em ampliar a capacidade nominal dos portos, mas em definir combinações coerentes de instalações portuárias, acessos terrestres, retroáreas e instrumentos operacionais capazes de atender à demanda futura com menores custos, maior confiabilidade e menor exposição a interrupções. Os resultados do Produto D-10 permitirão reconhecer as condições futuras da rede após a implantação das obras comprometidas. Sobre essa base, as alternativas adicionais de expansão de Santos, desenvolvimento de São Sebastião e implantação de um novo porto no litoral sul deverão ser estruturadas em cenários integrados e encaminhadas à simulação no Produto D-12.

c) Encaminhamento

Os projetos adicionais associados às conexões com o transporte marítimo serão encaminhados para simulação em rede no Produto D-12. As simulações deverão utilizar como ponto de partida os resultados do Produto D-10, no qual são representadas as obras comprometidas. Dessa forma, o D-12 não repetirá a avaliação dessas intervenções, mas examinará os efeitos incrementais dos projetos propostos sobre a distribuição dos fluxos, a capacidade dos corredores rodoviários e ferroviários, a escolha portuária e o desempenho dos sistemas de Santos, São Sebastião e do eventual novo porto no litoral sul.

Os projetos deverão ser organizados em combinações coerentes de capacidade portuária, acessos terrestres, retroáreas e instalações de apoio. Novas rodovias, ampliações viárias e ligações ferroviárias poderão ser representadas diretamente na rede de transportes. Terminais, berços, pátios, retroáreas e dutovias deverão ser incorporados aos cenários por meio de parâmetros complementares de capacidade, geração e atração de viagens, divisão modal, escolha portuária e custos generalizados. Assim, todos os projetos adicionais relacionados às conexões com o transporte marítimo serão avaliados no Produto D-12, embora nem todos sejam representados fisicamente como ligações na rede.

Projetos associados ao sistema de Santos

- Linha Verde de acesso ao Porto de Santos

Implantação de ligação destinada a ampliar e organizar os acessos terrestres ao complexo portuário, com redução dos conflitos entre o tráfego de cargas e a circulação urbana.

- Ligação rodoviária Parelheiros–Itanhaém

Avaliação de uma conexão alternativa entre o planalto e o litoral, considerando sua capacidade de redistribuir fluxos e aumentar a redundância dos acessos à Baixada Santista.

- Corredor Porto–Indústria associado à terceira pista da Rodovia dos Imigrantes

Avaliação integrada da nova descida da Imigrantes e de sua continuidade na Baixada Santista, evitando a transferência do gargalo da serra para a malha urbana e portuária.

- Túnel rodoviário entre Santos e São Vicente através do maciço

Avaliação de uma nova ligação destinada à segregação de fluxos, à melhoria da mobilidade regional e à ampliação da redundância viária na área central da Baixada Santista.

- Ligação ferroviária Santos–Cajati e conexão com a malha ferroviária do interior

Avaliação de uma alternativa ferroviária entre o Porto de Santos, o litoral sul e os eixos de acesso ao oeste do Estado, considerando demanda captável, capacidade e efeitos sobre a divisão modal.

- Dutovia para combustíveis e novos berços especializados em Santos

Avaliação conjunta da transferência de granéis líquidos por dutos, da capacidade de armazenagem e da necessidade de novos berços, incluindo seus possíveis efeitos sobre a retirada de caminhões da rede rodoviária.

- Terminal de Uso Privado na Ilha das Cobras

Avaliação da capacidade adicional, das cargas potencialmente atendidas e dos impactos sobre os acessos terrestres, o canal de navegação e os demais terminais de Santos.

- Implantação de retroáreas nas áreas da Usiminas

Avaliação da utilização das áreas para armazenagem, triagem e apoio às operações portuárias, considerando sua conexão com os terminais e os efeitos sobre os deslocamentos de caminhões.

- Implantação de novas retroáreas portuárias

Avaliação de localizações e capacidades alternativas para atendimento ao crescimento da movimentação de cargas e reorganização das operações logísticas.

- Implantação de novos pátios reguladores de caminhões

Avaliação dos efeitos sobre as filas nos terminais, a programação das chegadas, a circulação urbana e a confiabilidade dos tempos de acesso ao porto.

- Ampliação da capacidade portuária de Santos

Avaliação das expansões de terminais, berços, pátios e equipamentos, considerando a compatibilidade entre a capacidade marítima e as capacidades rodoviária e ferroviária.

Os efeitos das intervenções comprometidas representadas no Produto D-10, incluindo, conforme a configuração adotada naquele produto, a terceira pista da Rodovia dos Imigrantes, a adequação do acesso à margem direita, a Segunda Ponte da Alemoa, o túnel Santos–Guarujá, as melhorias nos acessos aos terminais da margem esquerda, a Pera Ferroviária de Outeirinhos e a Shortline Santos/Alemoa, deverão ser considerados na avaliação dos projetos adicionais, sem nova contabilização de seus benefícios no Produto D-12.

Projetos associados ao sistema de São Sebastião

- Ampliação da capacidade do Porto de São Sebastião e do terminal SSB01

Avaliação de configurações alternativas de expansão, considerando tipos de carga, capacidade dos terminais, demanda captável e efeitos sobre os acessos terrestres.

- Ampliação da capacidade da SP-055 e da SP-099 e dos acessos ao Porto de São Sebastião

Avaliação dos efeitos da ampliação viária sobre o transporte de cargas, os deslocamentos urbanos e o tráfego turístico no litoral norte.

- Dutovia de etanol conectada aos sistemas Logum e Petrobras e implantação de berços especializados

Avaliação da movimentação potencial de etanol, dos volumes desviados dos modos terrestres e da compatibilidade entre a dutovia, a armazenagem e a capacidade portuária.

- Implantação de berços para embarcações de apoio

Avaliação da infraestrutura necessária às atividades de apoio marítimo e offshore e de seus efeitos sobre a ocupação portuária e a logística terrestre.

- Implantação de pátio de tubos e instalações logísticas em Caraguatatuba

Avaliação da localização, dos fluxos gerados e das conexões com o porto, as bases offshore e a rede rodoviária regional.

- Implantação de novos berços na Baía do Araçá

Avaliação das capacidades e funções possíveis, das cargas atendidas e dos efeitos sobre a operação portuária, os acessos e o ambiente costeiro.

- Ligação ferroviária Guararema–Porto de São Sebastião

Avaliação de uma conexão ferroviária entre o Porto de São Sebastião, o Vale do Paraíba e a malha ferroviária do interior, incluindo alternativas de traçado, demanda captável e divisão modal.

Os projetos de São Sebastião deverão ser avaliados em combinações coerentes. A expansão dos terminais deverá estar associada à capacidade correspondente dos acessos rodoviários e, quando aplicável, da ligação ferroviária. O D-12 também deverá verificar se o crescimento da movimentação decorre de novas cargas, da transferência de Santos ou do desvio de fluxos atualmente movimentados por portos de outros estados.

Projetos associados ao novo porto no litoral sul

- Implantação de novo porto na região de Peruíbe

Avaliação da demanda potencial, da vocação do empreendimento, da capacidade portuária necessária e dos efeitos sobre a escolha portuária e a distribuição estadual dos fluxos de carga.

- Ampliação da capacidade da SP-079 entre Juquiá e Piedade

Avaliação da rodovia como componente do acesso ao novo sistema portuário e de seus benefícios para fluxos regionais independentes da implantação do porto.

- Nova descida ferroviária por livre aderência entre a região de Sorocaba e Itanhaém

Avaliação da conexão ferroviária entre o planalto e o litoral sul, considerando capacidade, traçado, custos operacionais, demanda e integração com o terminal portuário.

- Ligação ferroviária de Sorocaba a Pederneiras e Araçatuba

Avaliação da extensão da área de influência ferroviária do novo porto e da possibilidade de captação de cargas agrícolas, industriais e conteinerizadas do interior do Estado.

- Avaliação de localizações alternativas ao porto inicialmente proposto

Comparação de áreas alternativas no litoral sul, considerando acessibilidade, custos de conexão terrestre, demanda captável, capacidade portuária e condicionantes territoriais e socioambientais.

Os resultados do D-12 deverão permitir comparar as configurações dos três sistemas, identificar os gargalos que permanecem após as obras previstas para 2030 e determinar quais combinações de projetos apresentam melhor desempenho operacional. As avaliações ambiental, territorial, institucional, jurídica e econômico-financeira que não puderem ser representadas diretamente na rede deverão utilizar os resultados das simulações como insumo para as etapas subsequentes do PLI-SP 2050.

6.2 Transporte de cargas em vias segregadas do TIC

a) Contextualização

A implantação do sistema de Trens Intercidades (TIC) amplia a conexão entre a Região Metropolitana de São Paulo e os principais polos urbanos do Estado. Diferentemente da rede ferroviária metropolitana, voltada predominantemente aos deslocamentos pendulares, os serviços inter-regionais ampliam as possibilidades de articulação entre centros urbanos, mercados de trabalho, serviços especializados e atividades econômicas.

Os efeitos esperados, porém, não se limitam ao transporte ferroviário. A localização das estações, sua relação com as centralidades existentes e as condições de acesso podem modificar os padrões de deslocamento e influenciar a ocupação das áreas próximas aos corredores. As estações assumem, portanto, dupla função: pontos de embarque e desembarque e elementos capazes de reforçar a estrutura urbana e regional.

O desempenho dessa função depende, em grande medida, da inserção territorial de cada estação. Velocidade e frequência dos serviços são relevantes, mas não suficientes. O acesso por transporte coletivo urbano e intermunicipal, a conexão com a malha rodoviária, a mobilidade ativa, os estacionamentos de integração e os terminais intermodais condicionam a capacidade de cada estação de captar passageiros e estabelecer relações mais intensas com o território. O texto-base do PLI-SP 2050 já identifica esses elementos como componentes relevantes para a avaliação da acessibilidade e da integração modal.

A análise desenvolvida no Plano de Ação da Macrometrópole para Transporte e Logística (PAM-TL) oferece uma referência para essa leitura territorial. O estudo avaliou o potencial de desenvolvimento nas áreas de influência de sete estações — Campinas, Campinas Sul, Jundiaí, Santos, São José dos Campos, São Paulo-Barra Funda e Sorocaba — considerando, entre outros aspectos, a relevância econômica dos municípios, a demanda estimada, a posição das estações na rede, a disponibilidade de terrenos, as condições do mercado imobiliário e a legislação urbana.

O PAM-TL identificou diferentes tipos de áreas não utilizadas ou subutilizadas no entorno das estações, incluindo terrenos vinculados ao patrimônio ferroviário, imóveis estratégicos de maior porte e imóveis menores e dispersos, como estacionamentos e edificações vazias ou abandonadas. O potencial construtivo dessas áreas foi analisado segundo os parâmetros de uso e ocupação do solo vigentes em cada município.

Essa classificação é relevante para o PLI-SP 2050 porque evidencia que o potencial de desenvolvimento não é uniforme ao longo da rede. Disponibilidade de terrenos, estrutura fundiária, legislação municipal, consolidação das áreas urbanas e presença de atividades econômicas produzem condições distintas em cada estação. A análise territorial deve considerar, portanto, as características específicas de cada área de influência, sem estabelecer uma relação direta entre a implantação da ferrovia e a transformação urbana.

O patrimônio ferroviário constitui uma situação particular. No estudo do PAM-TL, foram identificadas áreas dessa natureza nas proximidades das estações Campinas Centro, Jundiaí, Sorocaba e Santos, totalizando 147.308 m², dos quais aproximadamente 95% estavam concentrados no entorno de Jundiaí. O estudo também apontou limitações de aproveitamento decorrentes dos parâmetros urbanísticos e do tombamento de imóveis ferroviários, incluindo restrições de coeficiente de aproveitamento e gabarito.

Essas áreas não devem ser tratadas simplesmente como reservas de terrenos para novos empreendimentos. Onde permanecem estruturas ferroviárias de valor histórico, a requalificação deverá conciliar a função de transporte com a preservação das preexistências e com os usos urbanos compatíveis. A transformação do entorno pode representar oportunidade de recuperação de áreas subutilizadas, desde que sejam respeitadas as restrições patrimoniais e urbanísticas aplicáveis.

O estudo também evidencia que o desenvolvimento no entorno das estações depende de fatores externos à infraestrutura ferroviária. A existência da estação, isoladamente, não permite atribuir a ela eventual valorização imobiliária ou crescimento da atividade econômica. São necessárias políticas urbanísticas, adequações da infraestrutura urbana e instrumentos municipais capazes de orientar a ocupação e o adensamento das áreas de interesse.

Essa condição aproxima a análise do conceito de Desenvolvimento Orientado pelo Transporte (DOT), no qual a infraestrutura de mobilidade é articulada às políticas de uso do solo e ao desenvolvimento urbano. No caso do TIC, essa abordagem deve considerar a escala regional do serviço e a necessidade de conectar as estações às centralidades já consolidadas, em vez de pressupor a criação de novos polos exclusivamente pela presença da ferrovia.

O desenvolvimento dos projetos também ocorre em conjunto com outras iniciativas do sistema ferroviário paulista. O Plano Integrado de Transportes Urbanos (PITU), o Plano Estratégico

Ferroviário (PEF), o programa SP nos Trilhos, as concessões metropolitanas e os projetos de VLT compõem um ambiente institucional no qual as decisões sobre traçado, operação e integração precisam ser coordenadas. Nesse conjunto, o PLI-SP 2050 tem função complementar de identificar sinergias e compatibilizar os investimentos com as necessidades de acesso, conectividade e desenvolvimento territorial.

Os corredores do TIC apresentam diferentes níveis de maturidade e condições de implantação. O TIC Oeste, em direção a Sorocaba, possui desafios associados à compatibilização com a infraestrutura ferroviária existente e à convivência com a Linha 8-Diamante. Nos eixos Sul e Leste, a definição do traçado, da inserção urbana e das conexões com a rede existente permanece fundamental para a configuração futura dos projetos.

A questão a ser examinada não é, portanto, a possibilidade abstrata de transportar cargas em corredores próximos aos eixos do TIC, mas se existe uma solução adicional tecnicamente caracterizada e independente das obras já previstas. Para isso, seria necessário demonstrar que a implantação de uma ferrovia segregada nesses corredores atenderia a uma demanda identificável, apresentaria conexões operacionais completas e produziria benefícios suficientes para justificar os investimentos e as interferências territoriais necessários.

b) Análise

Os materiais de planejamento inicialmente associaram à proposta o TIC Eixo Norte, o Ferroanel e possíveis terminais intermodais no Rodoanel e, na Baixada Santista, nas áreas da Usiminas e na Ilha das Cobras. Também foram consideradas interfaces com o TIC Sul, com a rede ferroviária de acesso ao Porto de Santos e com estudos anteriores de reorganização ferroviária da Macrometrópole Paulista.

A análise desse conjunto mostra, contudo, que as intervenções não formam um projeto único. O TIC Eixo Norte e o Ferroanel possuem funções, responsáveis, estágios de desenvolvimento e áreas de influência distintos. Os terminais intermodais, por sua vez, somente poderiam ser dimensionados depois da identificação das cargas, dos corredores ferroviários utilizados e das condições de acesso rodoviário e portuário. A simples associação espacial desses componentes não assegura continuidade operacional entre eles.

No TIC Eixo Norte, a segregação da via de cargas já integra a configuração do empreendimento. Portanto, essa solução não representa um projeto adicional a ser formulado nesta seção. Seus efeitos sobre a oferta ferroviária futura pertencem ao conjunto de obras comprometidas e deverão ser considerados no Produto D-10. Uma nova proposição para o mesmo corredor poderia duplicar uma intervenção já contratada ou contabilizar novamente benefícios associados ao empreendimento em implantação.

Nos eixos Oeste, Sul e Leste, os projetos identificados possuem como finalidade principal o transporte inter-regional de passageiros. Os materiais disponíveis não definem corredores segregados de carga com traçado, extensão, capacidade, pontos de conexão, demanda atendida e modelo operacional próprios. Também não estabelecem quais fluxos seriam transferidos do modo rodoviário, quais concessionárias ferroviárias utilizariam as linhas nem quais terminais constituiriam as origens e os destinos das composições.

A implantação de uma via segregada nesses eixos exigiria uma infraestrutura ferroviária funcionalmente independente. Além da via permanente, seriam necessários dispositivos de conexão com a malha de cargas, pátios, terminais, sistemas de sinalização e controle, instalações de manutenção e compatibilidade com os acessos aos destinos logísticos. Dependendo do corredor, também seriam necessárias novas desapropriações, ampliações da faixa de domínio, transposições urbanas e obras específicas para vencer restrições topográficas e ambientais.

O eventual compartilhamento de estruturas civis ou faixas de domínio com o TIC não elimina esses requisitos. Os parâmetros geométricos de uma linha destinada prioritariamente a passageiros podem não ser adequados aos trens de carga, sobretudo quanto a rampas, comprimentos de composição, capacidade por eixo, raios de curva e condições de frenagem. A utilização da mesma faixa de domínio também pode ser inviabilizada pela ocupação urbana, pela presença de estações, pelos acessos locais e pela insuficiência de largura para acomodar vias adicionais com as distâncias de segurança necessárias.

No Eixo Sul, a hipótese apresenta restrições adicionais. Uma ligação para cargas entre a Região Metropolitana de São Paulo e a Baixada Santista precisaria ser compatível com as condições de descida da Serra do Mar e estar conectada à rede ferroviária do Porto de Santos. Não basta que o traçado de passageiros alcance a Baixada. Seria necessário comprovar que sua geometria suporta trens pesados e que há capacidade nos trechos de aproximação, na Ferrovia Interna do Porto de Santos e nos terminais portuários. Na ausência dessa demonstração, a proposta não pode ser considerada uma nova ligação ferroviária de cargas.

O TIC Eixo Sul encontra-se em etapa de desenvolvimento de estudos, com apoio do Banco Interamericano de Desenvolvimento. Essa etapa oferece a oportunidade de verificar se o traçado e as soluções de engenharia apresentam alguma compatibilidade com infraestruturas ferroviárias de carga. Entretanto, os materiais examinados não demonstram que o objeto contratado inclua uma via segregada de cargas nem apresentam os elementos necessários para caracterizá-la como projeto.

Os terminais intermodais inicialmente relacionados à proposta também não possuem função autônoma. Um terminal junto ao Rodoanel dependeria da definição do corredor ferroviário a que estaria conectado, das cargas atendidas e da área de influência. As instalações nas áreas da Usiminas e da Ilha das Cobras estariam mais diretamente relacionadas às retroáreas e à ampliação do sistema portuário de Santos. Por isso, quando pertinentes, deverão ser tratadas no âmbito das conexões com o transporte marítimo, e não como componentes de uma via segregada associada ao TIC.

O Ferroanel também não deve ser caracterizado como parte de uma via segregada do TIC apenas por exercer a função de desviar trens de carga dos trechos metropolitanos. Trata-se de uma infraestrutura ferroviária de cargas com lógica, traçado e avaliação próprios. Sua eventual implantação pode reduzir os conflitos entre cargas e passageiros na Região Metropolitana de São Paulo, mas não comprova a viabilidade de construir vias de carga paralelas aos demais eixos do TIC.

A proposta enfrenta ainda dificuldades institucionais. Sua execução dependeria da coordenação entre o Estado, a União, as concessionárias dos serviços de passageiros, as concessionárias ferroviárias de cargas, a Agência Nacional de Transportes Terrestres e os responsáveis pelos terminais. Seria necessário definir titularidade da infraestrutura, direito de passagem, responsabilidade por investimentos e manutenção, prioridade operacional e compatibilidade com os contratos vigentes. Essas definições somente poderiam ser desenvolvidas a partir de um projeto tecnicamente caracterizado e de uma demanda comprovada.

Dessa forma, não há, no estágio atual, uma alternativa adicional com maturidade e consistência suficientes para ser submetida à simulação em rede ou à avaliação de viabilidade. O TIC Eixo Norte já contempla uma solução segregada para cargas, enquanto os demais eixos são projetos de passageiros sem um sistema de cargas tecnicamente definido. A formulação de uma nova ferrovia apenas com base na proximidade dos traçados do TIC produziria uma hipótese genérica, sem os elementos necessários para configurar uma intervenção do PLI.

Essa conclusão não significa que a preservação do transporte ferroviário de cargas na Macrometrópole Paulista seja dispensável. O problema permanece relevante, mas deve ser tratado por meio de projetos ferroviários próprios, como o Ferroanel, as ligações de acesso aos

portos, as *shortlines* e a modernização da malha existente. Esses projetos poderão articular-se aos corredores de passageiros, desde que mantenham objetivos, requisitos técnicos e avaliações independentes.

c) Estratégias

A primeira frente de atuação consiste em definir o papel de cada estação na estrutura regional antes da implantação do serviço. A localização dos acessos, terminais, estacionamentos de integração, conexões com ônibus e interfaces com a malha viária deve ser tratada conjuntamente com a definição do empreendimento ferroviário.

A análise das áreas de influência deve ser realizada em escala compatível com cada estação, incorporando uso e ocupação do solo, infraestrutura urbana, atividades econômicas, centralidades existentes, áreas vazias ou subutilizadas e patrimônio ferroviário. A experiência do PAM-TL demonstra a importância dessa abordagem diferenciada, uma vez que o potencial de desenvolvimento varia de acordo com a posição da estação na rede, a dinâmica econômica e as condições fundiárias e urbanísticas locais.

Nos locais com áreas ferroviárias subutilizadas, recomenda-se avaliar alternativas de requalificação associadas ao transporte, preservando as estruturas de valor histórico e respeitando os parâmetros urbanísticos aplicáveis. O patrimônio ferroviário deve ser incorporado ao planejamento como elemento da paisagem e da identidade urbana, e não apenas como área disponível para ocupação.

A articulação com os instrumentos municipais de planejamento também é necessária. Planos diretores, legislação de uso e ocupação do solo e demais instrumentos urbanísticos devem ser avaliados em conjunto com a capacidade de transporte e de infraestrutura das áreas de influência. Eventuais ajustes normativos devem estar associados a objetivos territoriais claros e à capacidade efetiva de suporte das áreas.

Para os corredores em implantação ou estudo, a definição do traçado deve considerar simultaneamente desempenho ferroviário, inserção urbana e potencial de integração territorial. No TIC Oeste, isso envolve a compatibilização com a Linha 8-Diamante e com a infraestrutura existente. Nos eixos Sul e Leste, a definição das conexões com a rede ferroviária e das áreas de chegada aos municípios será determinante para a configuração dos futuros pontos de integração.

Outra estratégia consiste em acompanhar a implantação dos projetos segundo os diferentes horizontes do PLI-SP 2050, permitindo revisar as condições de demanda, acessibilidade, uso do solo e desenvolvimento das áreas de influência à medida que os projetos avancem.

Por fim, o PLI-SP 2050 deve tratar as estações do TIC como componentes da estrutura territorial do Estado. A efetividade do investimento não estará apenas na operação do trem, mas na capacidade de conectar as estações às cidades, aos sistemas de transporte complementares e às áreas de atividade econômica. O desenvolvimento do entorno deverá ser orientado pelas condições concretas de cada território, evitando pressupor que a infraestrutura ferroviária, isoladamente, produza transformação urbana.

d) Encaminhamento

A proposta de implantação de vias segregadas para o transporte de cargas associadas aos corredores do TIC será encerrada no Produto D-11 e não dará origem a um projeto para simulação em rede no Produto D-12 ou para análise fora da rede no Produto D-14.

O TIC Eixo Norte já contempla uma via segregada para cargas como parte do empreendimento em implantação. Seus efeitos integram a oferta futura associada às obras comprometidas e são considerados no Produto D-10. Não se justifica, portanto, formular uma intervenção adicional para esse corredor.

Para os eixos Oeste, Sul e Leste, não foram identificados elementos técnicos suficientes para configurar projetos de transporte de cargas. Não estão definidos os fluxos atendidos, os volumes captáveis, os terminais de origem e destino, as conexões com a malha ferroviária, os parâmetros

geométricos e operacionais nem a infraestrutura complementar necessária. Além disso, os traçados destinados ao transporte de passageiros não podem ser presumidos como adequados à circulação de trens de carga.

A implantação de vias segregadas nesses corredores equivaleria, na prática, à construção de novas ferrovias de carga, sujeitas a estudos próprios de demanda, traçado, engenharia, operação, licenciamento, inserção territorial e viabilidade econômico-financeira. A simples associação aos projetos de TIC não reduz essa necessidade nem oferece base suficiente para estruturar uma alternativa de investimento.

Os terminais intermodais e demais instalações inicialmente relacionadas à proposta também não serão mantidas como projetos autônomos desta seção. As instalações vinculadas ao Porto de Santos deverão ser tratadas na análise das conexões com o transporte marítimo. Eventuais terminais associados a outros corredores ferroviários somente deverão ser retomados quando estiverem vinculados a uma ligação de carga definida e a uma demanda demonstrável.

Assim, o Produto D-11 registra a oportunidade inicialmente levantada, analisa suas restrições e conclui pela inviabilidade técnica de transformá-la, nas condições atualmente disponíveis, em projeto adicional do PLI. Não haverá encaminhamento para os Produtos D-12 ou D-14. A preservação e a ampliação do transporte ferroviário de cargas deverão ser buscadas por meio de projetos ferroviários específicos já contemplados em outras partes do Plano, sem vinculação automática aos corredores do TIC.

6.3 Áreas de desenvolvimento ao Longo de ferrovias

a) Contextualização

Os projetos de Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) de Campinas, Sorocaba, Bauru e da Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS) apresentam funções distintas dentro da rede de transporte paulista, mas têm em comum a possibilidade de reforçar a estruturação urbana ao longo dos corredores atendidos.

Enquanto o TIC estabelece conexões inter-regionais de maior distância, o VLT está mais diretamente relacionado aos deslocamentos urbanos e metropolitanos. Sua função é conectar áreas residenciais, centros urbanos, polos de emprego, serviços e equipamentos, oferecendo uma alternativa de maior capacidade e regularidade aos deslocamentos realizados por automóvel e pelo transporte coletivo rodoviário.

A análise do desenvolvimento ao longo desses corredores deve considerar a relação entre estações, centralidades, uso do solo e infraestrutura urbana. A simples implantação do sistema não garante a transformação do entorno. Os efeitos dependem da localização das estações, da qualidade dos acessos, da integração com ônibus e outros modos, da disponibilidade de áreas para transformação e das políticas municipais de desenvolvimento urbano.

Essa abordagem encontra respaldo nos estudos do PAM-TL, que identificaram diferentes condições de desenvolvimento nas áreas próximas às estações ferroviárias de Campinas, Sorocaba e Santos. O estudo considerou disponibilidade de terrenos, dinâmica econômica, condições de mercado, legislação urbanística e possibilidade de expansão da influência das estações para áreas desocupadas ou subutilizadas.

Para os VLTs, essa referência é particularmente importante nos corredores que utilizam antigas faixas ferroviárias. A reutilização da infraestrutura existente pode recuperar áreas hoje pouco utilizadas e aproximar o transporte coletivo de setores urbanos que permaneceram desconectados ou subaproveitados. Cada trecho, entretanto, deve ser avaliado quanto às

condições físicas da infraestrutura, à inserção urbana, à propriedade das áreas e, quando aplicável, às restrições de preservação do patrimônio ferroviário.

No caso de Campinas, o projeto estudado prevê a conexão entre Sumaré, Hortolândia e Campinas, com possibilidade de extensão até Americana, além de ramal para o Aeroporto Internacional de Viracopos. O corredor pode ser articulado aos sistemas de ônibus e BRT existentes ou em expansão e ao TIC Eixo Norte, criando uma conexão entre a mobilidade urbana, metropolitana e regional. O documento do PPI-SP associa o projeto à melhoria da capacidade do transporte público e à revitalização de áreas urbanas.

Em Sorocaba, o projeto considera aproximadamente 25 km no eixo ferroviário existente leste–oeste, com 13 estações inicialmente previstas. O aproveitamento da faixa existente e a possibilidade de conexão com o futuro TIC Eixo Oeste criam condições para integrar deslocamentos urbanos e regionais e reforçam o papel das estações como pontos de articulação territorial.

Na RMBS, o VLT já integra a rede de transporte intermunicipal e encontra-se em processo de expansão. A continuidade do sistema poderá ampliar sua função na distribuição dos deslocamentos entre os municípios e fortalecer as conexões com as demais redes de transporte.

Em Bauru, o EVTEA em elaboração pela Infra S.A. avalia a utilização da infraestrutura ferroviária existente para ampliar as alternativas de mobilidade urbana. Entre as diretrizes do estudo está a recuperação de trechos ferroviários atualmente obsoletos. Nesse caso, a relação entre mobilidade e requalificação da infraestrutura ferroviária constitui um dos principais aspectos a serem acompanhados.

Essa relação que procura associar sistemas de transporte coletivo de média e alta capacidade a padrões mais compactos, diversificados e acessíveis de ocupação urbana tem entre seus objetivos a aproximação entre moradia e emprego, a redução das distâncias de acesso às estações, o favorecimento dos deslocamentos a pé e por bicicleta e a diminuição da dependência do transporte individual.

Entretanto, os efeitos positivos não decorrem automaticamente da implantação da infraestrutura ferroviária. Uma estação pode ampliar a acessibilidade sem produzir desenvolvimento urbano significativo quando o entorno apresenta baixa conectividade viária, restrições ambientais, ausência de áreas disponíveis, legislação urbanística incompatível ou reduzida capacidade de investimento. Em sentido inverso, a valorização imobiliária sem políticas adequadas pode provocar expulsão da população de menor renda, pressão sobre a infraestrutura urbana, substituição de atividades existentes e expansão urbana dispersa.

O planejamento das áreas de influência deve começar antes da entrada em operação dos sistemas. A definição tardia de acessos, terminais, estacionamentos, calçadas, ciclovias e instrumentos de uso do solo pode levar à ocupação inadequada das áreas disponíveis e limitar a integração das estações ao tecido urbano. Por isso, a articulação entre o planejamento ferroviário, os planos diretores municipais, o zoneamento, os planos de mobilidade e os investimentos em infraestrutura urbana constitui parte essencial da implantação dos novos serviços.

No sistema TIC, o Eixo Norte encontra-se em implantação, enquanto os eixos Oeste e Sul estão em estudos e o Eixo Leste possui caráter conceitual. Entre os VLTs, a expansão entre Barreiros e Samaritá, na Baixada Santista, constitui intervenção contratada; os projetos para Praia Grande, Campinas, Sorocaba e litoral sul apresentam menor grau de maturidade. Essas diferenças condicionam o nível de detalhamento possível para a análise territorial.

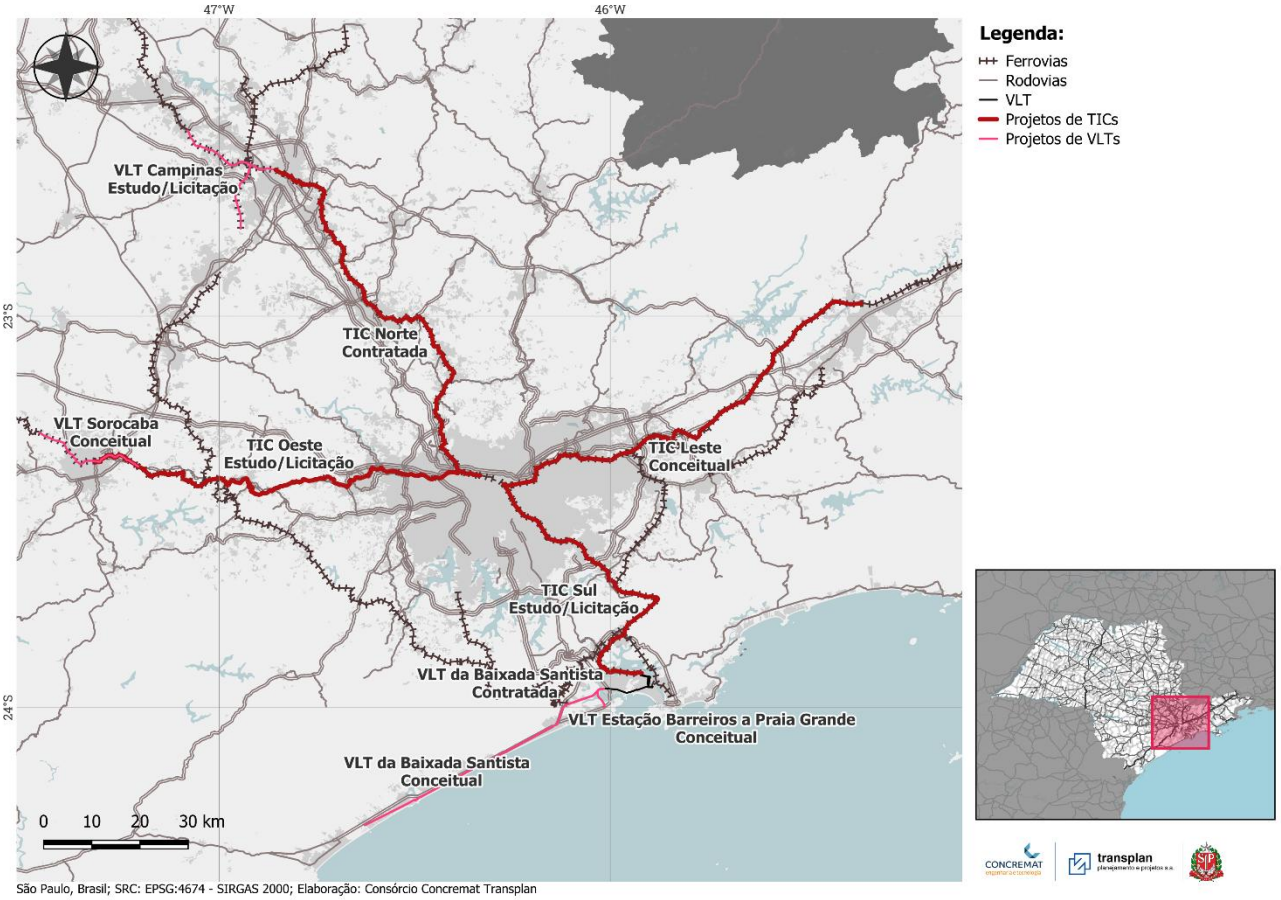
Tabela 6-2: Sistemas ferroviários considerados na análise das áreas de desenvolvimento.

Sistema	Área principal	Situação atual
TIC Eixo Norte	São Paulo–Campinas	Em implantação
TIC Eixo Oeste	Eixo São Paulo–Sorocaba e expansão de longo prazo	Em estudo ou estruturação
TIC Eixo Sul	RMSP–Baixada Santista	Em estudo
TIC Eixo Leste	RMSP–Vale do Paraíba	Conceitual
VLT da Baixada Santista – Barreiros–Samaritá	Santos e São Vicente	Contratado
VLT Barreiros–Praia Grande	Baixada Santista	Conceitual
VLT Campinas	Região Metropolitana de Campinas	Em estudo
VLT Sorocaba	Sorocaba	Em estudo
Extensão do VLT pelo litoral sul	Baixada Santista e litoral sul	Conceitual

Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

A figura abaixo apresenta o mapa da Macrometrópole com TIC Norte, Oeste, Sul e Leste; VLT Campinas; VLT Sorocaba; VLT da Baixada Santista; extensão a Praia Grande; e continuidade pelo litoral sul. Diferenciar sistemas contratados, em estudo e conceituais.

Figura 6-5: Sistemas TIC e VLT considerados na análise.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

A eventual incorporação de Bauru e São José do Rio Preto deverá ocorrer de forma condicionada. Esses municípios aparecem nos materiais de trabalho e em estudos setoriais, mas não apresentam, na carteira examinada, o mesmo nível de definição dos projetos relacionados na tabela. Suas áreas de desenvolvimento somente deverão ser delimitadas quando houver traçados, estações e características operacionais minimamente definidos.

Articulação com Municípios

A implantação de novos projetos de transporte modifica não apenas as condições de mobilidade e acessibilidade, mas também a organização territorial dos municípios atravessados. Ferrovias, estações, terminais, pátios e demais instalações logísticas podem induzir atividades econômicas e valorização imobiliária em suas áreas de influência.

Em contrapartida, infraestruturas que perderam sua função original ou deixaram de receber investimentos podem permanecer ociosas, degradadas ou subutilizadas. Essas áreas podem produzir barreiras urbanas, fragmentar bairros, dificultar conexões viárias e de pedestres, favorecer ocupações irregulares e restringir o aproveitamento de terrenos bem localizados.

A questão assume relevância no sistema ferroviário paulista, diante da reorganização das concessões, da desativação de serviços, das alterações nos fluxos de carga e da concentração de investimentos em determinados corredores. Esse processo resulta em trechos ferroviários, pátios, estações e imóveis com diferentes níveis de utilização.

Embora parte desses ativos possa apresentar potencial para futuras expansões ferroviárias, novos serviços de passageiros ou transporte de cargas, outras áreas podem não ter perspectiva definida de reutilização logística. Nesses casos, o reaproveitamento urbano pode representar uma oportunidade de qualificação territorial, especialmente quando os imóveis estão próximos a centralidades, serviços públicos e redes de transporte.

A definição de novos usos deve considerar, entretanto, a importância dessas áreas para o sistema de transportes, as diretrizes dos Planos Diretores e da legislação municipal de uso e ocupação do solo, a titularidade dos imóveis, o regime das concessões, a situação registral, as obrigações contratuais e a existência de passivos ambientais, ocupações, patrimônio histórico ferroviário e interferências com redes de infraestrutura.

b) Análise

A análise territorial deve distinguir a infraestrutura ferroviária dos projetos urbanos e de integração que podem ser implantados em sua área de influência. A construção dos TICs e VLTs possui processos próprios de planejamento, estudo, contratação e avaliação. O objeto desta seção é identificar como o Estado e os municípios poderão aproveitar a acessibilidade criada por esses sistemas e evitar impactos territoriais indesejados.

A primeira etapa consiste em delimitar as áreas de influência das estações. A utilização de raios fixos é útil para uma análise inicial, mas não representa adequadamente as condições reais de acesso. Barreiras como rodovias, rios, linhas ferroviárias, grandes glebas, declividades e tecidos urbanos descontínuos podem reduzir significativamente a área alcançável a pé ou por bicicleta. Recomenda-se, portanto, combinar faixas de distância com tempos de acesso pela rede viária e de mobilidade ativa.

Podem ser utilizadas três escalas complementares. A área imediata, acessível predominantemente a pé, deverá concentrar a avaliação de calçadas, travessias, fachadas ativas, usos mistos, densidade e espaço público. Uma área intermediária deverá considerar o acesso por bicicleta, ônibus alimentadores e outros serviços locais. A área regional deverá abranger os acessos rodoviários, terminais de ônibus, estacionamentos de integração e equipamentos capazes de atrair viagens de outros municípios.

Em cada área deverão ser examinadas a população residente, a quantidade e o perfil dos empregos, os usos predominantes do solo, os terrenos vazios ou subutilizados, os equipamentos públicos, os empreendimentos anunciados e as restrições ambientais. A análise também deverá considerar valor da terra, dinâmica imobiliária, assentamentos precários e presença de grupos vulneráveis, pois os ganhos de acessibilidade podem produzir valorização e deslocamento involuntário da população.

O zoneamento municipal deverá ser confrontado com a capacidade da infraestrutura urbana. A autorização de maior densidade ou de novos polos geradores de viagens só produzirá resultados adequados quando houver suporte das redes de saneamento, drenagem, energia, equipamentos públicos e circulação local. A alteração isolada dos coeficientes de aproveitamento pode aumentar a pressão sobre o território sem garantir integração efetiva com o transporte coletivo.

A localização das estações também deverá ser analisada em relação às redes alimentadoras. Bolsões de estacionamento podem ampliar a área de captação do TIC em municípios com ocupação dispersa, mas também podem consumir terrenos valorizados no entorno imediato e estimular o acesso por automóvel. Sempre que possível, as áreas mais próximas à estação devem ser priorizadas para circulação de pedestres, integração com ônibus, usos urbanos intensivos e espaços públicos. Estacionamentos de maior porte podem ser instalados em áreas externas, desde que conectados de forma adequada.

Os novos polos geradores de viagens merecem tratamento específico. Centros comerciais, instalações de ensino e saúde, centros administrativos, empreendimentos residenciais, centros de distribuição e áreas industriais podem aumentar a demanda do sistema ferroviário, mas também gerar tráfego rodoviário adicional. A análise deverá verificar a compatibilidade desses empreendimentos com a capacidade das vias locais, os acessos às estações e os objetivos de desenvolvimento de cada município.

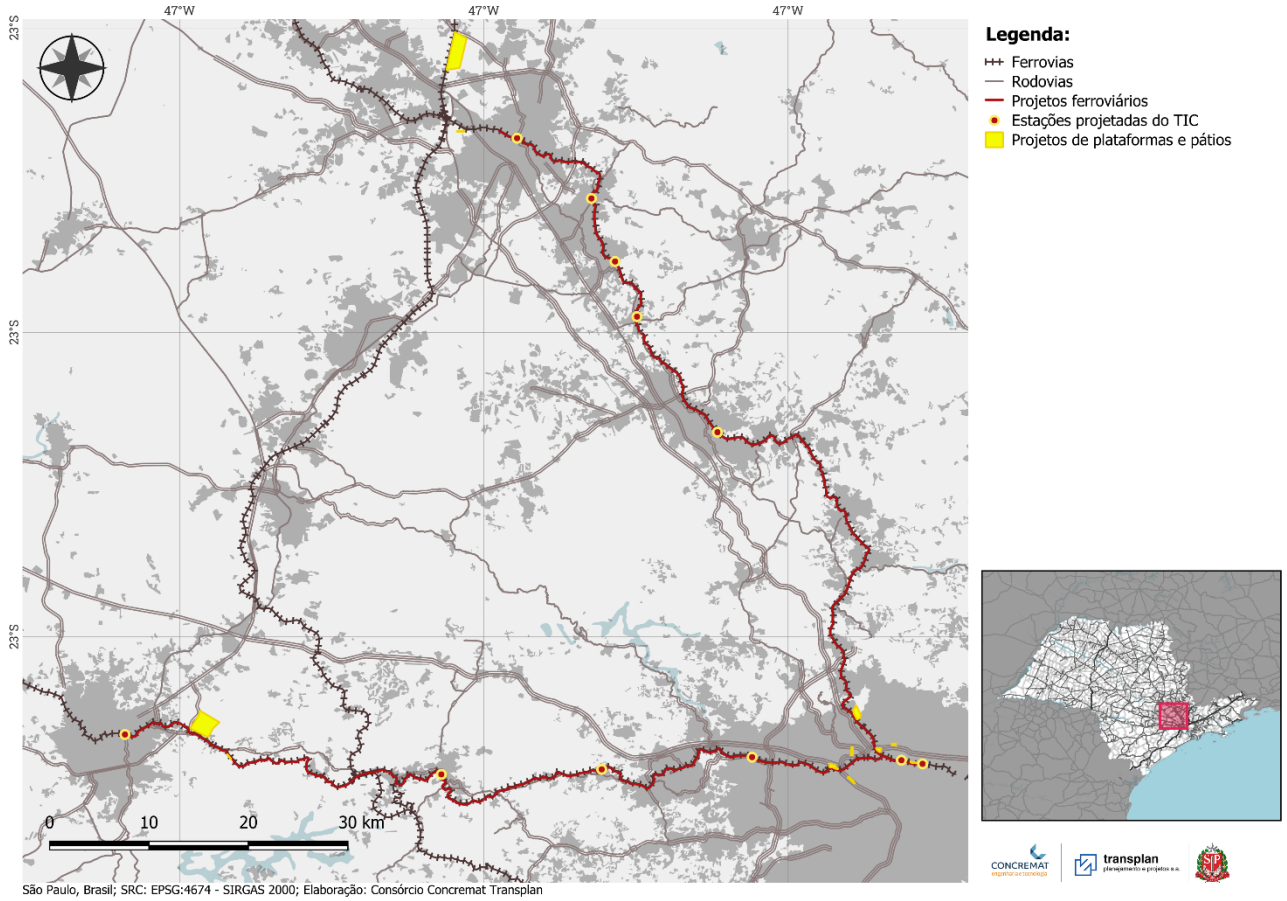
Os efeitos territoriais serão diferentes nos corredores do TIC e do VLT. O TIC atende deslocamentos inter-regionais e pode ampliar a integração funcional entre a capital e os polos regionais. Suas estações tendem a concentrar viagens de maior distância e dependem de conexões com redes locais e metropolitanas. Já o VLT possui caráter predominantemente urbano ou metropolitano, com maior número de paradas e relação mais direta com os bairros atravessados. Nesse caso, a qualidade das calçadas, travessias, interfaces com o comércio e integração tarifária exerce influência mais imediata sobre a utilização do sistema.

Áreas associadas ao TIC Eixo Norte

O eixo São Paulo–Campinas apresenta o maior grau de maturidade e permite desenvolver uma análise territorial mais precisa. A implantação do serviço tende a reforçar as relações entre a Região Metropolitana de São Paulo, Jundiaí e a Região Metropolitana de Campinas. As áreas das estações deverão ser avaliadas quanto à integração com a Linha 7–Rubi, redes municipais de ônibus, terminais rodoviários e sistemas metropolitanos.

A figura abaixo apresenta mapa do corredor São Paulo–Campinas com estações, centralidades, conexões metropolitanas e áreas prioritárias para aprofundamento no D-14.

Figura 6-6: Áreas de desenvolvimento associadas ao TIC Eixo Norte.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

O planejamento deve observar se os municípios possuem instrumentos urbanísticos compatíveis com a intensificação do uso do solo e se os acessos locais suportam o crescimento da demanda. Também será necessário identificar áreas com potencial de transformação e áreas nas quais a ocupação adicional deve ser limitada por restrições ambientais, deficiência de infraestrutura ou risco de agravamento de congestionamentos.

Áreas associadas ao TIC Eixo Oeste

No Eixo Oeste, a ligação com Sorocaba poderá reforçar centralidades existentes e modificar padrões de deslocamento entre a Região Metropolitana de São Paulo e os municípios situados ao longo do corredor. A análise deverá considerar a articulação com a Linha 8–Diamante, os sistemas municipais de transporte e o projeto de VLT de Sorocaba.

Como o projeto ainda depende de definições de traçado e estações, recomenda-se trabalhar inicialmente com centralidades e áreas potenciais, evitando antecipar delimitações urbanísticas precisas. Alterações de zoneamento ou compromissos de investimento somente deverão ocorrer depois da estabilização da solução ferroviária.

Áreas associadas ao TIC Eixo Sul

O TIC Eixo Sul poderá ampliar a integração entre a Região Metropolitana de São Paulo e a Baixada Santista. Seus efeitos territoriais dependerão da localização das estações, da conexão com o VLT, dos acessos rodoviários e da capacidade de integração com os deslocamentos metropolitanos e turísticos.

Na Baixada Santista, a escassez de terrenos, as áreas ambientalmente protegidas, os riscos de inundação e movimentos de massa e a elevada integração entre os municípios exigem abordagem regional. O desenvolvimento das áreas de estação não poderá ser tratado apenas por um município, sobretudo quando a infraestrutura produzir mudanças nos fluxos entre Santos, São Vicente, Cubatão, Guarujá e Praia Grande.

Áreas associadas ao TIC Eixo Leste

No Eixo Leste, a análise deverá considerar a articulação entre a Região Metropolitana de São Paulo e o Vale do Paraíba. A região já possui centralidades urbanas, industriais e tecnológicas consolidadas, além de forte conexão rodoviária pela Rodovia Presidente Dutra. O TIC poderá modificar a acessibilidade relativa dessas centralidades e criar oportunidades de integração entre emprego, ensino, serviços e transporte coletivo.

Por se tratar de projeto conceitual, a avaliação territorial deverá permanecer estratégica. O objetivo deverá ser identificar centralidades potenciais, condicionantes e critérios para a futura escolha das estações, sem induzir antecipadamente valorização ou ocupação em locais cujo atendimento ainda não esteja definido.

Instrumentos urbanísticos e formas de implementação

As intervenções poderão utilizar instrumentos previstos no Estatuto da Cidade e na legislação municipal, conforme as características de cada área. Entre as possibilidades estão operações urbanas consorciadas, áreas de intervenção urbana, projetos de intervenção urbana, consórcios imobiliários, direito de preempção, parcelamento, edificação ou utilização compulsórios, outorga onerosa do direito de construir e transferência do direito de construir.

A seleção dos instrumentos deverá considerar a capacidade institucional dos municípios, a estrutura fundiária, o potencial de valorização e a necessidade de proteger a população residente. Nem todas as áreas de estação terão mercado imobiliário suficiente para financiar transformações urbanas por meio da captura da valorização. Em áreas menos dinâmicas, poderão ser necessários investimentos públicos diretos, programas habitacionais e incentivos à instalação de atividades econômicas.

A articulação institucional deverá envolver os órgãos estaduais responsáveis pelo planejamento territorial, mobilidade e estruturação dos projetos, os municípios, operadores de transporte e proprietários das áreas ferroviárias. O processo também deverá esclarecer a responsabilidade pela implantação e manutenção dos acessos, terminais, estacionamentos, calçadas, ciclovias e espaços públicos.

Os principais indicadores para comparação das áreas deverão incluir população e empregos alcançáveis, tempo de acesso às estações, oferta de transporte coletivo alimentador, conectividade da rede de pedestres, disponibilidade de áreas, densidade atual e potencial, diversidade de usos, capacidade da infraestrutura urbana, presença de população vulnerável, valorização imobiliária esperada, necessidade de desapropriação e exposição a riscos ambientais.

Articulação com Municípios

A existência de áreas ferroviárias ociosas ou subutilizadas não significa, necessariamente, que esses ativos estejam disponíveis para alienação, ocupação definitiva ou transformação urbana. A consolidação dos projetos ferroviários previstos no PLI-SP 2050 é fundamental para identificar quais trechos, pátios, estações e faixas de domínio poderão ser necessários à reativação de serviços, à implantação de trens inter-regionais, à operação de VLT ou à expansão do transporte ferroviário de cargas.

Projetos como o VLT de Sorocaba e a extensão do VLT para o Litoral Sul evidenciam a possibilidade de atribuição de novas funções a infraestruturas atualmente subutilizadas. Dessa forma, a ocupação definitiva de determinadas áreas, sem avaliação prévia de sua relevância estratégica, pode elevar os custos de implantação de futuros empreendimentos ou restringir alternativas de expansão da rede de transportes.

A análise indica, portanto, a necessidade de estabelecer uma classificação dos ativos ferroviários segundo sua função atual, importância estratégica, possibilidade de reutilização e condições de transformação. Essa classificação deve considerar, entre outros aspectos:

- a relevância do ativo para projetos previstos ou potenciais do PLI-SP 2050;
- a possibilidade de reativação ou compartilhamento da infraestrutura ferroviária;
- a localização em relação às centralidades, aos equipamentos públicos e às redes de transporte;
- as condições físicas, ambientais, patrimoniais e fundiárias;
- a compatibilidade com os Planos Diretores e a legislação municipal;
- a existência de ocupações, restrições contratuais ou obrigações relacionadas à concessão;
- o potencial de aproveitamento urbano, logístico ou ambiental;
- a capacidade institucional e financeira dos municípios envolvidos.

A articulação com os municípios é particularmente importante nas áreas sem perspectiva de reutilização logística. As administrações municipais podem contribuir para identificar demandas por mobilidade, habitação, espaços públicos, equipamentos sociais e atividades econômicas, além de avaliar a compatibilidade dos possíveis usos com as estratégias de desenvolvimento urbano.

As Operações Urbanas Consorciadas (OUC) podem ser consideradas em áreas que apresentem potencial de transformação urbana, interesse de investidores, capacidade de estruturação institucional e possibilidade de geração de recursos para financiar intervenções. Entretanto, sua aplicação deve ser precedida de estudos de viabilidade e de avaliação dos impactos territoriais, econômicos e sociais. A valorização imobiliária decorrente das intervenções deve ser analisada em conjunto com os riscos de deslocamento da população residente, de ampliação das desigualdades territoriais e de apropriação concentrada dos benefícios.

Em municípios com menor dinamismo imobiliário ou em áreas nas quais não exista viabilidade para uma operação urbana de maior escala, podem ser consideradas alternativas como cessão de uso, concessões, projetos de urbanização, parques lineares, implantação de equipamentos públicos e ocupações temporárias ou compartilhadas.

A análise evidencia, assim, que **a destinação das áreas ferroviárias ociosas deve resultar de uma avaliação integrada entre planejamento de transportes, ordenamento territorial, gestão patrimonial, aspectos ambientais e capacidade de implementação municipal**. A adoção de uma solução única para todo o Estado não seria adequada, considerando a diversidade de situações encontradas nos municípios paulistas.

c) Encaminhamento

As propostas de desenvolvimento territorial associadas às linhas e estações do TIC e do VLT serão encaminhadas para análise no Produto D-14. A infraestrutura ferroviária e sua demanda poderão ser representadas nos produtos específicos de oferta e simulação, mas os efeitos sobre uso do solo, centralidades, acessibilidade local, valorização imobiliária e instrumentos

urbanísticos exigem métodos que não são capturados diretamente pelo modelo de simulação em rede de transportes.

O Produto D-14 deverá utilizar os resultados de demanda e acessibilidade dos sistemas ferroviários como insumos, sem reavaliar a decisão de implantação das obras comprometidas. Para os corredores ainda em estudo, a análise deverá respeitar o grau de maturidade dos traçados e estações, adotando avaliações estratégicas ou áreas potenciais quando não houver definição locacional suficiente.

Serão encaminhados ao D-14 os seguintes projetos:

- Programa de desenvolvimento e integração das áreas de estação do TIC Eixo Norte

Avaliação das áreas de influência das estações do corredor São Paulo–Campinas, considerando integração modal, acessibilidade local, capacidade da infraestrutura urbana, disponibilidade de terrenos, zoneamento, potencial de adensamento e proteção da população vulnerável. O programa deverá priorizar as estações com maior potencial de transformação e indicar intervenções e instrumentos adequados a cada tipologia territorial.

- Diretrizes de desenvolvimento territorial para o TIC Eixo Oeste

Identificação das centralidades e áreas potenciais associadas ao corredor São Paulo–Sorocaba, considerando sua conexão com a Linha 8–Diamante, o sistema de transporte de Sorocaba e o futuro VLT. Como o traçado e as estações ainda estão em desenvolvimento, o projeto deverá estabelecer critérios e condicionantes para orientar decisões posteriores.

- Diretrizes de desenvolvimento territorial para o TIC Eixo Sul

Avaliação estratégica das áreas potencialmente atendidas entre a Região Metropolitana de São Paulo e a Baixada Santista, com atenção à conexão com o VLT, aos deslocamentos turísticos e pendulares, à disponibilidade de áreas, aos riscos ambientais e à necessidade de coordenação entre os municípios.

- Diretrizes de desenvolvimento territorial para o TIC Eixo Leste

Identificação de centralidades potenciais no eixo entre a Região Metropolitana de São Paulo e o Vale do Paraíba, considerando polos urbanos, industriais, tecnológicos, educacionais e de serviços. O estudo deverá apoiar a futura definição das estações e evitar a indução prematura de ocupação em áreas ainda não confirmadas.

- Programa de desenvolvimento e integração urbana associado ao VLT Campinas

Avaliação das áreas de influência do corredor, considerando a integração com o TIC, o BRT, a rede municipal e o Aeroporto Internacional de Viracopos. O projeto deverá comparar as funções urbana, metropolitana e aeroportuária das alternativas de traçado e identificar intervenções complementares nos acessos e nas centralidades atendidas.

- Programa de requalificação urbana associado ao VLT Sorocaba

Avaliação do potencial de aproveitamento da faixa ferroviária existente para conectar as zonas leste e oeste, requalificar áreas urbanas e reduzir barreiras territoriais. Deverão ser identificadas áreas industriais em transformação, travessias, conexões com ônibus e centralidades que possam ser fortalecidas pelas estações.

- Programa de desenvolvimento e integração das áreas atendidas pelo VLT da Baixada Santista

Análise integrada das áreas de influência do sistema existente, do trecho Barreiros–Samaritá, da extensão para Praia Grande e da possível continuidade pelo litoral sul. O programa deverá

tratar integração tarifária e física, acessos locais, desenvolvimento urbano, vulnerabilidade ambiental e coordenação entre os municípios da região.

- Avaliação condicionada das oportunidades associadas a outros sistemas de VLT

Bauru, São José do Rio Preto e outros municípios poderão ser incorporados quando os respectivos estudos definirem traçados, estações e características operacionais. Até que essas informações estejam disponíveis, o Produto D-14 deverá limitar-se à formulação de critérios gerais para aproveitamento de faixas ferroviárias, integração urbana e desenvolvimento das futuras áreas de estação.

A comparação dos projetos deverá considerar acessibilidade, potencial de desenvolvimento, viabilidade urbanística, capacidade institucional, custos das intervenções complementares, possibilidade de captura da valorização, riscos de deslocamento da população e compatibilidade ambiental. O resultado deverá indicar áreas prioritárias, instrumentos aplicáveis, responsabilidades institucionais e condições que devem anteceder alterações de zoneamento ou investimentos públicos.

Para demais projetos entre correlacionados aos municípios recomenda-se estruturar um processo de articulação entre o planejamento estadual de transportes, os municípios e os demais responsáveis pelos ativos ferroviários, com o objetivo de compatibilizar a preservação das infraestruturas estratégicas com o aproveitamento urbano, ambiental e logístico das áreas sem perspectiva de reutilização

A constituição de uma base territorial e patrimonial integrada, capaz de orientar a preservação de ativos estratégicos para o sistema de transportes e a transformação planejada de áreas ferroviárias ociosas ou subutilizadas, em articulação com os municípios e com os instrumentos de planejamento urbano disponíveis.

Nesse contexto, as OUC constituem um dos instrumentos possíveis para viabilizar intervenções em áreas extensas e estrategicamente localizadas. Sua aplicação depende das características territoriais, da capacidade institucional dos municípios e da viabilidade urbanística, econômica e social das intervenções.

Em municípios ou áreas com menor dinamismo imobiliário, outros instrumentos podem ser mais adequados. Convênios para cessão de uso, projetos de urbanização, parques lineares, equipamentos públicos, concessões de uso e ocupações temporárias podem permitir o aproveitamento dos ativos sem depender de grandes operações imobiliárias. A escolha do instrumento deve resultar das características de cada área, e não de uma solução única aplicada indistintamente em todo o Estado.

O Produto D-11 registra as oportunidades e os riscos associados à transformação territorial produzida pelos sistemas ferroviários. O Produto D-14 deverá aprofundar a análise das áreas de influência, comparar as alternativas de intervenção e propor programas de desenvolvimento urbano e integração territorial compatíveis com o estágio de cada corredor.

6.4 Estratégias para manutenção do serviço de transporte inter-regional de passageiros diante da redução da demanda

a) Contextualização

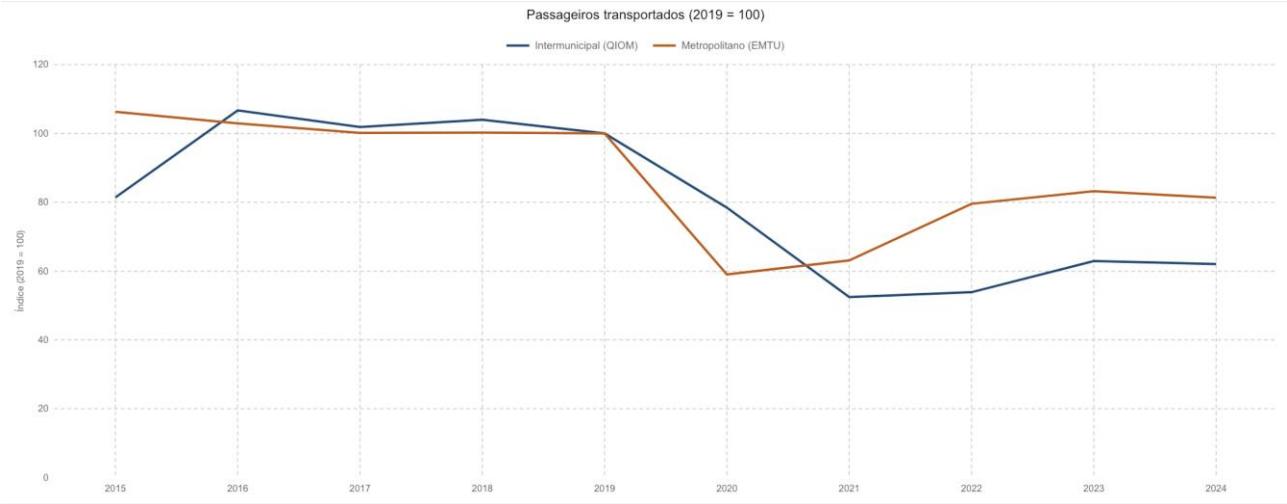
O transporte coletivo intermunicipal de passageiros desempenha papel relevante na conectividade regional do Estado de São Paulo. Em muitos municípios, especialmente os de pequeno porte e aqueles situados fora das principais regiões metropolitanas e aglomerações urbanas, esse serviço constitui a principal alternativa para o acesso da população a empregos,

instituições de ensino, serviços de saúde, comércio e funções públicas concentradas em centros regionais.

A sustentabilidade desses serviços depende de um equilíbrio entre demanda, frequência, tarifa e custos operacionais. Linhas com volumes elevados podem diluir seus custos entre maior número de passageiros e manter frequências atrativas. Em mercados menores ou em retração, a redução da ocupação aumenta o custo por passageiro e pressiona a tarifa. A elevação da tarifa pode provocar nova perda de demanda, criando um processo cumulativo de redução da frequência, perda de atratividade e deterioração da viabilidade econômica da linha.

Nos últimos anos, o transporte coletivo rodoviário intermunicipal passou a enfrentar mudanças relevantes nos padrões de mobilidade. Entre os fatores apontados estão o aumento da motorização individual, a ampliação do uso de motocicletas, mudanças demográficas, novas formas de trabalho e estudo, serviços intermediados por plataformas digitais, fretamentos e transporte irregular. A pandemia de Covid-19 acentuou a redução da demanda em parte dos mercados e modificou hábitos que não necessariamente retornaram aos padrões anteriores.

Figura 6-7: Evolução da demanda no transporte rodoviário coletivo no Estado de São Paulo — 2015–2024.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

A evolução confirma que a redução da demanda não se limitou ao período mais crítico da pandemia. Para tornar comparáveis sistemas com volumes absolutos distintos, os passageiros transportados foram convertidos em índice, adotando-se 2019 como base igual a 100. No sistema intermunicipal acompanhado pelo QIOM, a demanda caiu para aproximadamente 52% do nível de 2019 em 2021. Embora tenha ocorrido recuperação nos anos seguintes, o índice alcançou apenas 62% em 2024. Em valores absolutos, o movimento passou de aproximadamente 126 milhões de passageiros em 2019 para 78 milhões em 2024.

No sistema metropolitano da EMTU, a redução mais acentuada ocorreu em 2020, quando a demanda correspondeu a cerca de 59% do nível de 2019. A recuperação posterior foi mais intensa do que no sistema intermunicipal, mas permaneceu incompleta: em 2024, o volume transportado representava aproximadamente 81% do nível pré-pandemia, passando de cerca de 636 milhões de passageiros em 2019 para 517 milhões em 2024. A permanência da demanda abaixo dos níveis de 2019 reforça a necessidade de adaptar a oferta, principalmente nos municípios em que a operação convencional perdeu escala econômica, mas o serviço continua sendo necessário para assegurar acesso a atividades e serviços essenciais

Os efeitos não se distribuem de forma homogênea. Nos eixos de maior densidade, pode existir demanda suficiente para sustentar serviços frequentes e competição entre operadores ou alternativas modais. Nos municípios menores, a dispersão territorial, o reduzido número de passageiros e as longas distâncias até os centros regionais tornam a operação mais onerosa. Nesses casos, a prestação do serviço exclusivamente segundo uma lógica comercial pode não assegurar um nível mínimo de conectividade.

As mudanças regulatórias também influenciam o setor. A classificação das linhas, os requisitos dos veículos, as regras de entrada e saída dos operadores, as gratuidades, a política tarifária e o regime de outorga afetam os custos e a qualidade dos serviços. Contribuições setoriais registraram preocupação com a aproximação das especificações de determinadas ligações intermunicipais às características de linhas suburbanas ou urbanas. Segundo os operadores, a redução dos requisitos de conforto pode diminuir a atratividade do serviço em viagens de maior distância. Essa afirmação deverá ser verificada por meio de dados operacionais e da percepção dos usuários, pois a redução dos custos pode favorecer a continuidade da oferta, mas também pode comprometer a qualidade esperada.

A Lei Complementar Estadual nº 1.413/2024 introduziu uma transição regulatória relevante para o transporte coletivo intermunicipal. Nesse contexto, a definição de estratégias para mercados de baixa demanda deve considerar a compatibilidade entre concessão, permissão, autorização e modelos híbridos. A escolha do regime não deve se limitar à forma jurídica: deve estar associada à natureza do mercado, ao grau de competição possível, à necessidade de subsídio e às obrigações mínimas de atendimento.

O problema a ser enfrentado não consiste apenas em preservar todas as linhas existentes com os mesmos itinerários, frequências e veículos. A questão é definir qual nível de conectividade regional deve ser assegurado pelo Estado, quais grupos dependem do serviço, como adaptar a oferta à demanda e quais instrumentos regulatórios e financeiros permitem manter o atendimento com eficiência e qualidade.

b) Análise

A organização da oferta poderá combinar uma rede estruturante e serviços de capilaridade. A rede estruturante seria formada por linhas regulares entre centros regionais e polos de maior porte, com frequência e capacidade compatíveis com os fluxos consolidados. Os municípios de menor demanda poderia ser conectados a essa rede por veículos de menor capacidade, serviços alimentadores, operação sob demanda ou itinerários flexíveis. Esse arranjo pode reduzir custos sem eliminar a conectividade.

Os serviços sob demanda apresentam potencial em mercados dispersos, mas exigem cuidados. Sua implantação depende de canais de reserva acessíveis, inclusive para pessoas sem acesso a aplicativos, antecedência compatível com viagens essenciais, regras transparentes de cancelamento, pontos seguros de embarque e garantia de atendimento. O uso de tecnologia deve adaptar a oferta à demanda e não transferir ao usuário o risco de indisponibilidade do serviço.

Uma alternativa é ajustar o porte da frota. A utilização obrigatória de ônibus convencionais em mercados com poucos passageiros pode elevar desnecessariamente os custos. Micro-ônibus ou vans regularizadas podem apresentar maior aderência à demanda, desde que mantenham requisitos adequados de segurança, acessibilidade, conforto e espaço para bagagens. A flexibilização do veículo não deve resultar em redução incompatível da qualidade, sobretudo em deslocamentos de maior duração.

A revisão dos itinerários também pode gerar ganhos. Linhas sobrepostas, percursos excessivamente longos ou baixa coordenação de horários podem aumentar custos e reduzir a atratividade. A reorganização deverá avaliar ligações diretas, serviços alimentadores, integração

em terminais regionais e correspondências programadas. A necessidade de transbordo somente é aceitável quando os tempos de espera, as tarifas e a confiabilidade são adequadamente coordenadas.

A integração tarifária possui especial importância nos modelos com transbordo. Se cada etapa exigir o pagamento integral de uma nova tarifa, a rede alimentadora pode tornar o serviço mais caro para a população de menor renda. O modelo deverá prever mecanismos de compensação entre operadores, tratamento das gratuidades e definição clara da responsabilidade pelo déficit resultante dos benefícios tarifários.

A escolha do regime de prestação deverá considerar as características de cada grupo de mercados. A concessão pode ser adequada para redes com escala e possibilidade de integração entre linhas superavitárias e deficitárias. A permissão ou modelos contratuais específicos podem atender redes menores com obrigações definidas. A autorização pode favorecer a entrada de operadores em mercados comercialmente atrativos, mas pode não assegurar continuidade em ligações deficitárias. Modelos híbridos podem combinar competição nos mercados viáveis com contratação ou subvenção dos serviços essenciais.

A eventual utilização de subsídio deverá estar vinculada a obrigações verificáveis. Entre elas estão frequência mínima, regularidade, acessibilidade, idade e características da frota, disponibilidade de informações ao usuário e envio de dados operacionais. A remuneração poderá combinar parcelas associadas à quilometragem, à disponibilidade do serviço, ao número de passageiros e ao cumprimento de indicadores de qualidade. Um modelo baseado apenas na quantidade de passageiros pode penalizar justamente os serviços de baixa demanda que a política pretende preservar.

A fonte de financiamento deverá ser previamente definida. A política não deve depender de compensações informais entre linhas nem de obrigações sem correspondente fonte de custeio. O D-14 deverá avaliar alternativas orçamentárias, fundos setoriais, receitas vinculadas quando juridicamente possíveis e mecanismos de cofinanciamento com municípios ou consórcios regionais.

A participação municipal pode melhorar a identificação das necessidades e a integração com serviços locais, mas a transferência integral da responsabilidade tende a ser inviável para municípios pequenos. Consórcios intermunicipais podem apoiar o planejamento de itinerários, terminais e horários, enquanto o Estado preserva as funções de regulação, coordenação da rede e garantia da conectividade regional.

A política também exige base de dados contínua. Informações sobre passageiros, viagens realizadas, horários, cancelamentos, gratuidades, receitas e custos devem ser consolidadas em sistema comum. A bilhetagem eletrônica e o acompanhamento por GPS podem apoiar a fiscalização e permitir ajustes periódicos da oferta. Os dados de plataformas e fretamentos poderão complementar o diagnóstico, respeitadas as competências regulatórias e as regras de proteção de dados.

c) Encaminhamento

A manutenção do serviço inter-regional de passageiros diante da redução da demanda será encaminhada para análise fora da rede no Produto D-14. As projeções de viagens por transporte coletivo serão utilizadas apenas como referência para estimar a evolução da demanda e identificar mercados sujeitos a maior retração.

O D-14 deverá aprofundar o seguinte projeto:

- **Projeto-piloto de transporte intermunicipal flexível e sob demanda para municípios com baixa demanda**: o Produto D-14 deverá avaliar a implantação de serviços de menor custo em ligações cujo reduzido número de passageiros e elevados

custos fixos dificultem a manutenção da operação convencional, mas nas quais a conectividade regional precise ser preservada. O modelo poderá utilizar plataformas digitais para reunir solicitações, organizar reservas e ajustar horários, itinerários e veículos à demanda efetivamente registrada, combinando viagens programadas, pontos de embarque definidos, itinerários flexíveis e serviços alimentadores conectados à rede estruturante. Poderão ser utilizados micro-ônibus ou vans regularizadas, mantidos os requisitos de segurança, acessibilidade, conforto e espaço para bagagens. O atendimento deverá oferecer canais alternativos ao aplicativo, como telefone e pontos de apoio municipais, e assegurar condições mínimas de frequência, antecedência para reserva, confirmação e continuidade do serviço.

6.5 Sistemas intermodais para transporte de passageiros e cargas no interior do Estado de São Paulo

a) Contextualização

A organização de sistemas intermodais no interior do Estado de São Paulo envolve dois problemas relacionados. O primeiro é a necessidade de ampliar a conectividade de passageiros entre municípios e centros regionais. O segundo é o aprimoramento da logística das cadeias produtivas, especialmente aquelas associadas à agroindústria, aos biocombustíveis e à proteína animal. A reunião dessas duas dimensões permite avaliar de maneira integrada o uso da infraestrutura ferroviária existente ou proposta, suas conexões com rodovias, hidrovias, dutovias, portos e aeroportos e as possibilidades de compartilhamento entre serviços de passageiros e cargas.

O interior paulista é formado por regiões com diferentes padrões de ocupação, atividade econômica e mobilidade. Alguns eixos conectam centros urbanos populosos, com deslocamentos regulares por motivos de trabalho, educação, saúde e serviços. Outros atravessam áreas de menor densidade, nas quais a demanda de passageiros se distribui por longas distâncias e depende da integração com ônibus municipais e intermunicipais. Essa diversidade dificulta a adoção de um único padrão de serviço ferroviário regional.

Ao mesmo tempo, o interior concentra parte relevante da produção agrícola, agroindustrial e energética do Estado. A movimentação de grãos, açúcar, etanol, óleos vegetais, gorduras animais, fertilizantes, combustíveis e produtos processados depende principalmente das rodovias, embora várias regiões sejam atravessadas por ferrovias, ramais ociosos ou infraestruturas com potencial de recuperação. A integração entre esses ativos e terminais de transbordo pode ampliar a participação dos modos de maior capacidade e reduzir custos em trechos de maior distância.

As cadeias de biocombustíveis e proteína animal apresentam vínculos produtivos e logísticos. O processamento de grãos gera óleos destinados à produção de biodiesel ou combustível sustentável de aviação e farelos utilizados na alimentação animal. Gorduras provenientes da produção de proteína também podem ser empregadas como matéria-prima energética. O etanol pode participar de rotas de produção de combustíveis avançados, enquanto a distribuição dos produtos requer conexão com bases, aeroportos, portos e mercados consumidores. Dessa forma, decisões sobre armazenagem, processamento e transporte afetam simultaneamente diferentes cadeias.

A intermodalidade depende da existência de instalações capazes de organizar a transferência entre os modos. Ferrovias e hidrovias são mais competitivas em fluxos concentrados e de maior escala, enquanto o transporte rodoviário permanece essencial na coleta e distribuição. Terminais ferroviários, hidroviários e rodoferroviários permitem consolidar volumes dispersos, formar

composições e conectar as regiões produtoras aos corredores estruturantes. Sem esses terminais, a simples recuperação de um ramal pode não produzir transferência modal relevante.

Para passageiros, as estações exercem função equivalente de integração. A utilização dos corredores ferroviários depende da conexão com ônibus urbanos e intermunicipais, da acessibilidade local, da coordenação dos horários e das condições de transbordo. Uma linha regional pode apresentar bom desempenho no trecho ferroviário e ainda assim ter baixa atratividade quando as etapas de acesso e distribuição aumentam excessivamente o tempo ou o custo total da viagem.

A possibilidade de combinar passageiros e cargas na mesma infraestrutura amplia as alternativas de aproveitamento dos corredores. Em algumas ligações, a demanda de carga pode sustentar a recuperação da via, preservando a possibilidade de introdução posterior de serviços de passageiros. Em outras, a conectividade entre centros regionais pode justificar a implantação do serviço de passageiros, enquanto a movimentação de cargas contribui para aumentar a utilização da infraestrutura. Esse compartilhamento, contudo, depende de compatibilidade técnica e operacional e não pode ser assumido apenas pela coincidência dos traçados.

Os serviços possuem requisitos distintos. Trens de passageiros demandam regularidade, frequência e tempos de viagem competitivos. Os trens de carga apresentam maior peso e comprimento e menor capacidade de aceleração. A operação conjunta pode exigir reforço da via, ampliação de pátios, sinalização, controle de circulação e definição de janelas operacionais. Nos trechos de maior movimento, a compatibilização pode demandar duplicações ou soluções parcialmente segregadas.

A carteira considerada reúne corredores ferroviários de passageiros entre a Baixada Santista, o Vale do Ribeira, Sorocaba, Bauru, o oeste paulista, Campinas, o Vale do Paraíba e as divisas com o Paraná. Para cargas, são consideradas ligações entre polos agroindustriais do centro, oeste e sudoeste do Estado, além de conexões transversais entre Campinas, Sorocaba e o Vale do Paraíba e de uma dutovia entre Paulínia e Viracopos.

O problema central consiste em identificar quais corredores apresentam demanda de passageiros ou cargas capaz de justificar sua recuperação ou implantação, quais podem comportar os dois serviços e quais dependem de terminais, acessos ou empreendimentos adicionais. A análise também deve considerar como os projetos se relacionam, pois, diferentes ramais podem disputar as mesmas cargas, utilizar trechos comuns ou depender de uma mesma infraestrutura portuária, hidroviária ou industrial

b) Análise

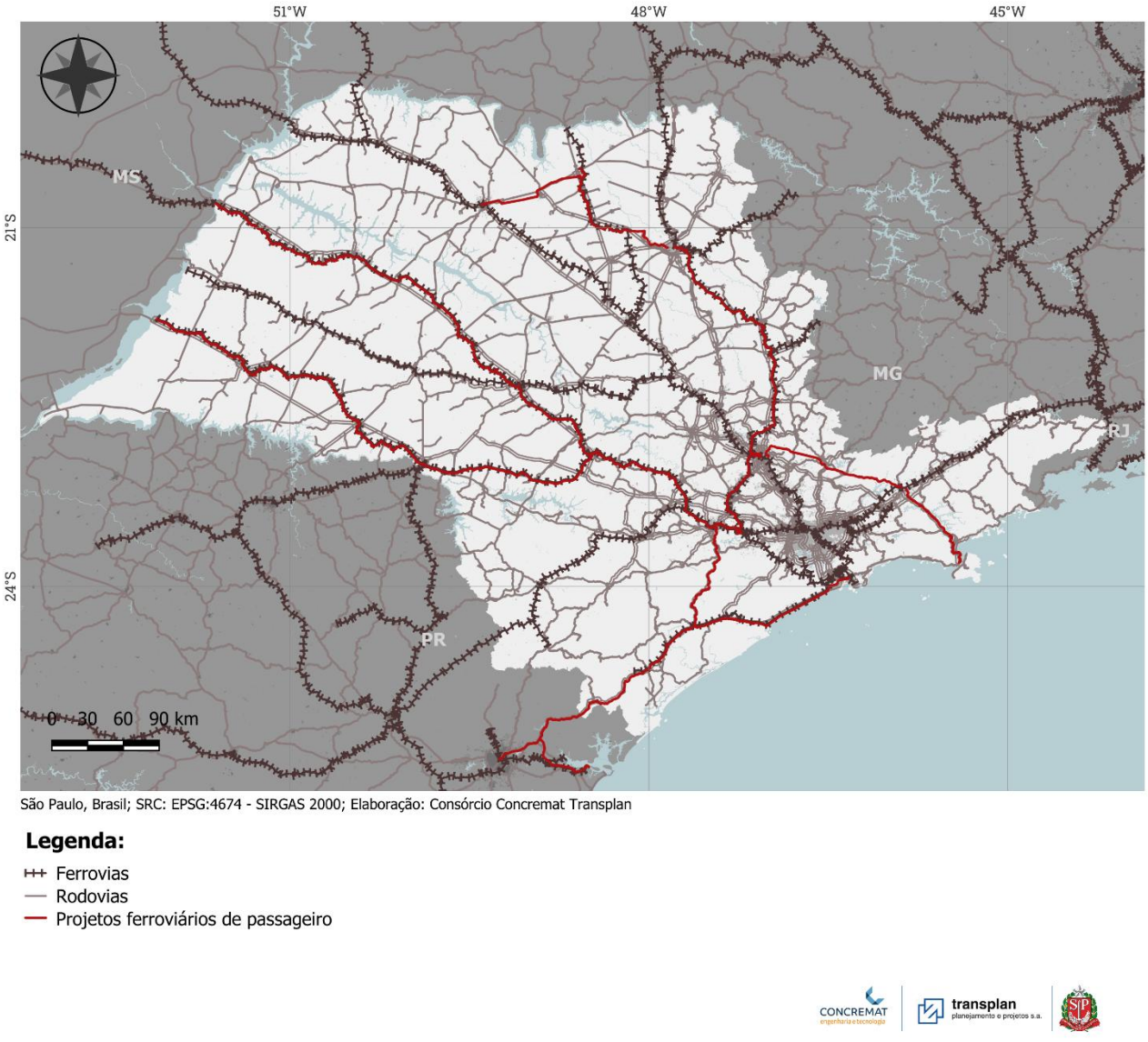
A integração dos antigos recortes de passageiros e cargas permite avaliar os corredores ferroviários do interior como sistemas multimodais, evitando que sua viabilidade seja determinada por apenas um tipo de demanda. Em determinados trechos, a movimentação de cargas pode justificar a recuperação da infraestrutura e sustentar parte dos custos fixos, enquanto o transporte de passageiros pode ampliar os benefícios sociais do investimento. Em outros casos, a demanda de passageiros pode ser suficiente para justificar o serviço, mas a presença de cargas pode aumentar a utilização da linha e melhorar sua inserção na rede estadual. Essa complementaridade, contudo, não deve ser presumida: depende da compatibilidade entre mercados, infraestrutura, horários e condições operacionais.

A carteira considerada reúne 14 corredores potenciais de passageiros: Santos–Cajati; Sorocaba–Bauru; Bauru–Castilho; Sorocaba–Santos; Cajati–Curitiba; Cajati–Paranaguá; Campinas–São José dos Campos; São José dos Campos–São Sebastião; Ribeirão Preto–Barretos; Barretos–São José do Rio Preto; Botucatu–Presidente Epitácio; Sorocaba-Campinas; Campinas e Bauru–Panorama. Parte desses corredores aproveita faixas ferroviárias existentes, ociosas ou

desativadas, enquanto outros dependem de novas ligações ou da combinação entre diferentes trechos da malha.

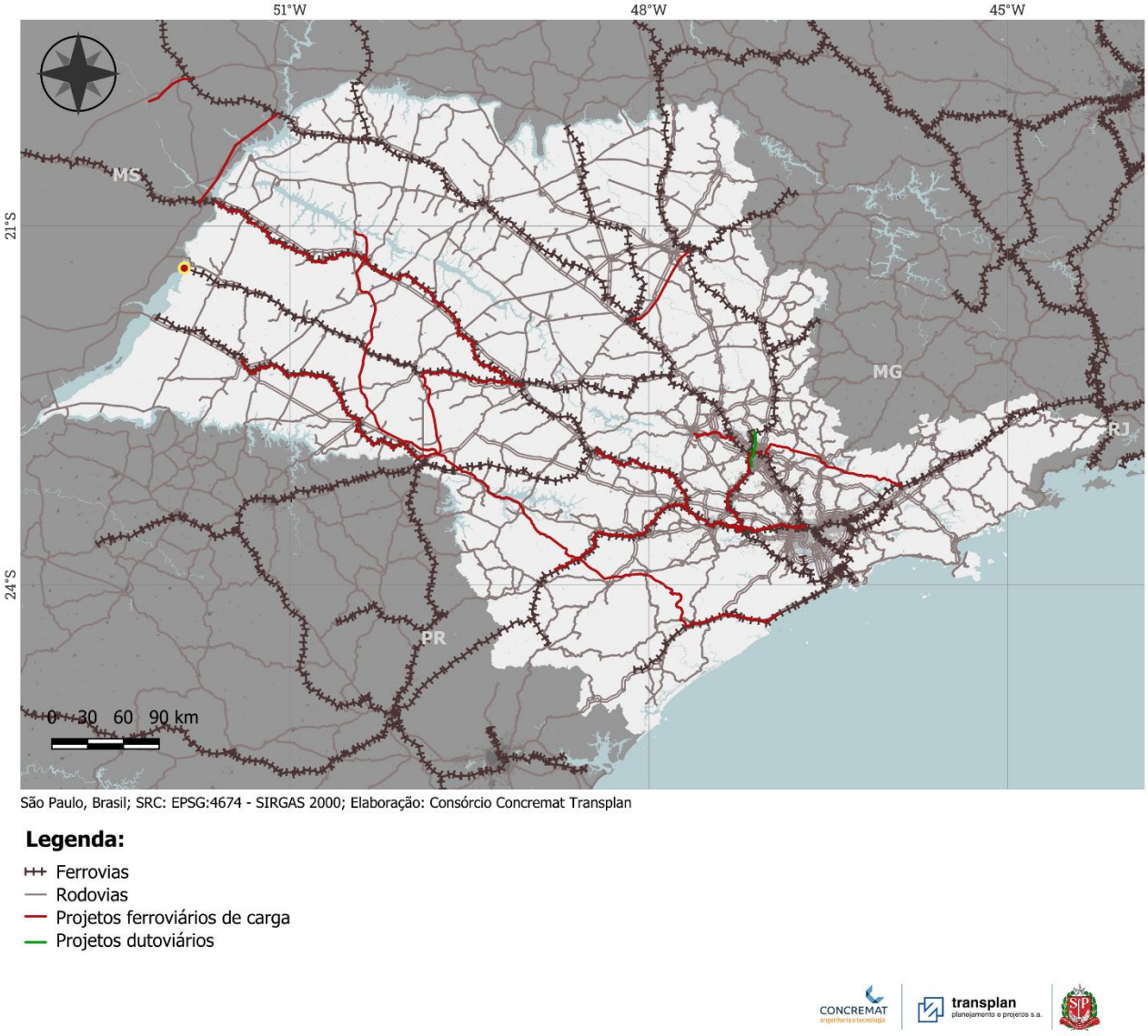
Para cargas, a carteira compreende os ramais Ribeirão Preto–Araraquara; Campinas–São José dos Campos; Castilho–Bauru; Presidente Prudente–Marília–Bauru; Botucatu–Iperó–Sorocaba; Itapeva–Itapetininga–Iperó; Sorocaba–São Paulo; Piracicaba–Sumaré; e Sorocaba–Campinas, além da dutovia entre Paulínia e Viracopos destinada à movimentação de combustível sustentável de aviação. Intervenções de maior abrangência, como a Ferrovia Hidroceânica e a nova ponte ferroviária em Panorama são ainda propostas a analisar, enquanto os projetos privados vinculados ao Programa Pró-Trilhos devem ser considerados como condições externas capazes de alterar os fluxos ferroviários no oeste paulista.

Figura 6-8: Projetos para corredores de passageiros.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

Figura 6-9: Projetos para corredores de carga.



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

A extensão e a diversidade da carteira mostram que não existe um único padrão de sistema intermodal aplicável a todo o interior. Alguns corredores conectam aglomerações urbanas com relações consolidadas de trabalho, ensino e serviços. Outros atravessam áreas de menor densidade e dependem da articulação entre cidades intermediárias para formar uma demanda suficiente. No transporte de cargas, alguns ramais atendem polos industriais e agroindustriais já estabelecidos, enquanto outros procuram criar conexões entre regiões produtoras, hidrovias, aeroportos e portos.

No transporte de passageiros, a viabilidade não depende apenas da população total localizada ao longo da ferrovia. A demanda potencial é determinada pela distribuição das viagens entre pares de municípios, pela concentração de empregos e serviços, pelos tempos rodoviários concorrentes e pela localização das estações. Também influenciam a escolha do modo a frequência, a confiabilidade, o preço e a necessidade de transbordos. Um corredor pode atravessar municípios populosos e ainda assim apresentar baixa captação se as estações estiverem distantes das centralidades ou mal conectadas ao transporte local.

A integração local assume papel decisivo. Serviços ferroviários regionais tendem a perder atratividade quando o passageiro precisa realizar longos deslocamentos de automóvel para alcançar a estação ou enfrenta esperas elevadas nas conexões com ônibus. A oferta de terminais integrados, linhas alimentadoras, estacionamentos, infraestrutura para bicicletas e caminhos adequados para pedestres amplia a área de captação das estações e reduz o peso das etapas inicial e final da viagem.

A possibilidade de utilizar infraestrutura ferroviária existente reduz parte da necessidade de novas faixas de domínio, mas não elimina os custos de implantação. Linhas ociosas ou desativadas podem exigir substituição de trilhos e dormentes, recuperação de pontes, adequação da sinalização, eliminação ou proteção de passagens em nível, implantação de estações e tratamento de ocupações na faixa ferroviária. A existência física do leito não significa que o corredor esteja disponível para operação imediata.

O corredor Santos–Cajati ilustra essa condição. A ligação pode ampliar a conectividade entre a Baixada Santista e o Vale do Ribeira e reduzir a dependência regional do transporte rodoviário. Ao mesmo tempo, a faixa ferroviária atravessa áreas urbanas e trechos sujeitos a ocupações, exigindo recuperação da infraestrutura e definição de seu uso. A demanda de passageiros deve ser considerada em conjunto com as possibilidades de movimentação de cargas e com as conexões ao Porto de Santos e a um eventual sistema portuário no litoral sul.

As extensões de Cajati a Curitiba e Paranaguá ampliariam a função interestadual do corredor, mas também aumentariam sua complexidade. Essas ligações dependeriam de compatibilidade com a malha e o planejamento do Paraná, de acordos entre entes públicos e operadores e de demanda suficiente para serviços de longa distância. Os dois destinos também exercem funções distintas: Curitiba constitui grande polo urbano e de serviços, enquanto Paranaguá está mais diretamente associada à logística portuária.

As ligações Sorocaba–Bauru, Bauru–Castilho, Botucatu–Presidente Epitácio e Bauru–Panorama atravessam parte importante do interior paulista e podem articular centros regionais hoje fortemente dependentes do transporte rodoviário. Entretanto, as distâncias envolvidas e a dispersão das origens e destinos exigem uma estrutura de serviços diferenciada. Nem todas as localidades precisam ser atendidas pelo mesmo padrão de trem. Serviços regionais, ligações de maior distância e conexões rodoviárias alimentadoras podem exercer funções complementares.

Nos corredores Campinas–São José dos Campos e São José dos Campos–São Sebastião, a demanda de passageiros está associada a regiões urbanas e industriais relevantes, mas a implantação exige conexões ferroviárias que não se encontram integralmente disponíveis. A ligação transversal entre Campinas e o Vale do Paraíba poderia reduzir a dependência da passagem pela Região Metropolitana de São Paulo, enquanto o prolongamento até São Sebastião poderia conectar o Vale do Paraíba ao litoral norte. Seus benefícios devem ser considerados em conjunto com os custos e as restrições topográficas das novas ligações.

Os corredores Ribeirão Preto–Barretos e Barretos–São José do Rio Preto conectam centralidades regionais e áreas de forte atividade agroindustrial. A demanda de passageiros pode ser reforçada por viagens de trabalho, saúde, educação e serviços. A presença de produção agroindustrial ao longo dos mesmos eixos cria possibilidade de utilização complementar para cargas, desde que existam terminais e conexões adequados e que a operação dos dois serviços seja compatível.

A combinação de passageiros e cargas pode ampliar a utilização da infraestrutura, mas impõe requisitos operacionais. Trens de passageiros demandam maior regularidade, velocidades mais elevadas e horários compatíveis com as necessidades dos usuários. Os trens de carga normalmente apresentam maior peso e comprimento, menor aceleração e permanência mais longa nos trechos. O compartilhamento pode exigir pátios de cruzamento, sinalização adequada, reforço da via, controle centralizado e janelas operacionais. Em corredores com frequência

elevada de passageiros ou movimentação intensa de cargas, podem ser necessários trechos duplicados ou instalações parcialmente segregadas.

A implantação do serviço de passageiros também não deve ser tratada como consequência automática da recuperação de uma linha para cargas. Uma ferrovia pode apresentar viabilidade logística e não possuir demanda suficiente para sustentar um serviço regular de passageiros. Nesse caso, a recuperação da infraestrutura para cargas pode preservar a faixa de domínio e manter aberta a possibilidade de introduzir passageiros no futuro, mas não justifica a aquisição imediata de material rodante, a construção de estações ou a contratação de uma operação deficitária.

De forma semelhante, uma ligação de passageiros não garante que a ferrovia seja adequada às cargas. A capacidade por eixo, as rampas, os raios de curva, o comprimento dos pátios e a conexão com terminais podem impedir a operação eficiente de composições pesadas. Por isso, a complementaridade deve ser avaliada corredor por corredor e não usada como justificativa genérica para somar demandas que possuem requisitos distintos.

No componente de cargas, a intermodalidade não se limita à implantação dos ramais. Seu funcionamento depende de terminais capazes de transferir produtos entre rodovias, ferrovias, hidrovias e dutovias. A localização desses terminais deve refletir a origem efetiva das cargas, e não apenas a proximidade com um município produtor. A área de captação varia conforme o produto, o custo rodoviário até o terminal, o volume movimentado e a disponibilidade de armazenagem.

A produção de biocombustíveis e proteína animal apresenta relações logísticas complementares. A fabricação de biodiesel e combustível sustentável de aviação pode utilizar óleos vegetais, gorduras animais, etanol e outros insumos. O processamento de grãos gera farelos empregados na alimentação animal, enquanto a produção de proteína pode originar gorduras utilizadas na fabricação de combustíveis. A instalação coordenada de unidades de esmagamento, refino, produção de ração, armazenagem e terminais pode reduzir deslocamentos e ampliar a agregação de valor no interior do Estado.

Essa integração não elimina movimentos em sentidos distintos. As unidades produtoras recebem matérias-primas agrícolas e insumos industriais e expedem combustíveis, farelos e outros produtos. Portanto, a avaliação logística deve considerar toda a cadeia, desde a produção e o armazenamento até as unidades de processamento, bases de distribuição, aeroportos e mercados consumidores. A análise de apenas um trecho pode deslocar o gargalo para outra etapa.

O transporte ferroviário tende a ser mais competitivo para fluxos de grande volume, concentrados e regulares. Parte da produção agroindustrial paulista, contudo, encontra-se dispersa entre numerosos produtores e municípios. Nesses casos, o transporte rodoviário continuará desempenhando a função de coleta até terminais de consolidação. A ferrovia passa a ser utilizada no trecho de maior distância, enquanto os caminhões permanecem nas pontas. A eficiência depende da redução dos tempos e custos de transbordo e de uma escala suficiente para formar composições ferroviárias.

Os ramais Ribeirão Preto–Araraquara e Piracicaba–Sumaré podem conectar áreas de elevada produção agroindustrial a eixos ferroviários estruturantes e unidades de processamento. A ligação Campinas–São José dos Campos pode exercer função transversal entre duas regiões industriais, embora sua justificativa dependa da identificação de fluxos que não sejam adequadamente atendidos pelas rotas existentes. Os eixos Castilho–Bauru e Presidente Prudente–Marília–Bauru ampliam as possibilidades de captação de cargas do oeste paulista e sua conexão com a malha principal.

Os ramais Botucatu–Iperó–Sorocaba, Itapeva–Itapetininga–Iperó e Sorocaba–São Paulo podem formar uma rede de integração entre o Sudoeste, a Região Metropolitana de Sorocaba e os principais mercados consumidores e corredores de exportação. A ligação Sorocaba–Campinas acrescenta uma conexão transversal entre polos industriais e logísticos. Como vários desses projetos compartilham trechos ou atendem áreas de influência parcialmente coincidentes, seus benefícios não devem ser somados sem considerar a competição entre rotas.

A Ferrovia Hidroceânica representa uma alternativa de escala superior. Sua concepção conecta a Hidrovia Tietê–Paraná, na região de Araçatuba, ao litoral sul, atravessando diferentes regiões do Estado. A utilidade do corredor depende de um conjunto extenso de investimentos e, principalmente, da implantação de uma nova infraestrutura portuária. Por essa razão, não se trata de uma intervenção autônoma: sua demanda, seu traçado e seus benefícios estão condicionados às decisões sobre o novo porto e sobre os demais corredores ferroviários que podem atender às mesmas cargas.

A nova ponte ferroviária em Panorama pode restabelecer ou ampliar a conexão da Malha Paulista com o Mato Grosso do Sul e captar fluxos associados à celulose e a outras cadeias produtivas. A intervenção pode modificar os volumes na ferrovia Itirapina–Panorama e produzir efeitos sobre os terminais e corredores paulistas. Como a demanda está associada a empreendimentos e operadores específicos, a análise deve distinguir benefícios para a rede estadual de benefícios diretamente apropriados pelos agentes privados.

Os ramais privados vinculados ao Programa Pró-Trilhos também podem alterar a distribuição das cargas, mas sua implantação não constitui decisão autônoma do PLI-SP 2050. Seus efeitos decorrem das conexões com a malha paulista, dos volumes provenientes de outros estados e da capacidade dos corredores de destino. Essas intervenções funcionam como condicionantes externos das projeções de carga e da utilização da rede.

A dutovia Paulínia–Viracopos possui natureza diferente dos projetos ferroviários. Sua função é estabelecer uma conexão dedicada entre um polo de produção ou distribuição e o aeroporto, especialmente para o abastecimento de combustível sustentável de aviação. A competitividade da dutovia depende do volume regular movimentado, da escala de produção, da capacidade de armazenagem no aeroporto e da comparação com o transporte rodoviário. Embora não compartilhe infraestrutura com os serviços de passageiros, integra o mesmo sistema intermodal ao conectar produção, distribuição e transporte aéreo.

A consolidação de polos de processamento junto a terminais intermodais pode reduzir custos logísticos e estimular o desenvolvimento regional. Contudo, a infraestrutura de transporte não é suficiente para determinar a localização das indústrias. Também influenciam a disponibilidade de matéria-prima, água, energia, mão de obra, áreas industriais, licenciamento e proximidade dos mercados. A criação de capacidade logística sem plantas ou cargas comprometidas pode resultar em terminais e ramais subutilizados.

Os impactos territoriais também diferem entre passageiros e cargas. As estações de passageiros podem favorecer centralidades urbanas, melhorar o acesso a serviços e estimular atividades comerciais. Terminais de carga demandam áreas maiores, acessos rodoviários para veículos pesados e afastamento de usos residenciais sensíveis. A implantação dos dois tipos de instalação no mesmo corredor deve evitar conflitos entre circulação urbana, travessias de pedestres, manobras ferroviárias e tráfego de caminhões.

A recuperação das faixas ferroviárias pode produzir benefícios ambientais pela transferência de viagens rodoviárias, mas envolve impactos locais. Obras em áreas urbanas podem exigir desapropriações, remoção de ocupações, tratamento de passagens em nível e controle de ruído e vibração. No meio rural, os corredores podem atravessar áreas protegidas, mananciais e comunidades. Projetos de grande extensão, como a Ferrovia Hidroceânica, apresentam impactos cumulativos que não podem ser avaliados apenas por trechos isolados.

A viabilidade institucional constitui outro elemento determinante. Parte da malha pertence à União ou está vinculada a concessões federais. A operação de novos serviços depende da disponibilidade dos trechos, das condições de acesso, dos direitos de passagem e da compatibilidade com contratos existentes. Nos corredores interestaduais, também são necessários acordos com outros estados e operadores. Para passageiros, somam-se a definição do poder concedente, a integração com os transportes locais e a responsabilidade pelas estações. Para cargas, são centrais as regras de acesso aos terminais e à malha principal.

A análise dos sistemas intermodais do interior deve, portanto, considerar redes completas, formadas por linhas, estações, terminais, acessos e serviços. A mera existência de uma faixa ferroviária não assegura viabilidade. Os corredores mais consistentes serão aqueles em que a infraestrutura se conecte a fluxos efetivos de passageiros ou cargas, apresente integração adequada com os demais modos e permita uma implantação compatível com a evolução da demanda. A combinação entre passageiros e cargas pode ampliar os benefícios, mas deve resultar de condições verificáveis em cada corredor, e não de uma hipótese geral de compartilhamento.

c) Encaminhamento

Os sistemas intermodais para o transporte de passageiros e cargas no interior do Estado de São Paulo serão encaminhados para análise fora da rede no Produto D-14. A avaliação deverá considerar os corredores como sistemas completos, abrangendo infraestrutura ferroviária, estações, terminais, acessos rodoviários, conexões hidroviárias e dutoviárias e serviços de transporte.

O Produto D-14 deverá comparar a viabilidade técnica, operacional, econômica, institucional, territorial, social e ambiental das alternativas. A análise deverá distinguir os investimentos comuns aos serviços de passageiros e cargas daqueles necessários exclusivamente a cada operação. Também deverá considerar diferentes possibilidades de implantação, incluindo operação inicial de cargas com preservação da possibilidade de passageiros, operação inicial de passageiros, compartilhamento desde a implantação e segregação parcial nos trechos de maior conflito.

Serão encaminhados ao D-14 os seguintes projetos de corredores regionais de passageiros:

- Ligação ferroviária Santos–Cajati: avaliação da conectividade entre a Baixada Santista e o Vale do Ribeira, considerando a recuperação da infraestrutura, as estações, a demanda regional, os trechos urbanos e a possibilidade de operação conjunta com cargas.
- Ligação ferroviária Sorocaba–Bauru: avaliação da conexão entre dois importantes polos regionais, de sua integração com a Malha Oeste e dos mercados intermediários atendidos.
- Ligação ferroviária Bauru–Castilho: avaliação da continuidade do eixo ferroviário em direção ao oeste paulista e de sua articulação com as ligações de passageiros e cargas que convergem para Bauru.
- Ligação ferroviária Sorocaba–Santos: avaliação das alternativas de conexão entre a Região Metropolitana de Sorocaba, o litoral e o Porto de Santos, considerando a complementaridade ou concorrência com outros acessos ao litoral.
- Ligação ferroviária Cajati–Curitiba: avaliação de uma conexão interestadual de passageiros entre o Vale do Ribeira e a capital paranaense, incluindo demanda, integração regional e compatibilidade institucional.
- Ligação ferroviária Cajati–Paranaguá: avaliação da conexão entre o Vale do Ribeira e o litoral do Paraná, considerando sua possível utilização por passageiros e cargas e sua relação com o Porto de Paranaguá.
- Ligação ferroviária Campinas–São José dos Campos: avaliação de um corredor transversal entre a Região Metropolitana de Campinas e o Vale do Paraíba, reduzindo a dependência de conexões pela Região Metropolitana de São Paulo.

- Ligação ferroviária São José dos Campos–São Sebastião: avaliação da conexão entre o Vale do Paraíba e o litoral norte, considerando a demanda regional, as restrições topográficas e sua relação com o Porto de São Sebastião.
- Ligação ferroviária Ribeirão Preto–Barretos: avaliação do serviço entre centralidades regionais situadas em área de intensa atividade agroindustrial e de sua compatibilidade com a movimentação de cargas.
- Ligação ferroviária Barretos–São José do Rio Preto: avaliação da continuidade do corredor regional de passageiros e de sua articulação com Ribeirão Preto, o noroeste paulista e os serviços rodoviários alimentadores.
- Ligação ferroviária Botucatu–Presidente Epitácio: avaliação de um corredor de longa extensão pelo oeste paulista, considerando a distribuição da demanda, os centros intermediários e diferentes padrões de serviço.
- Ligação ferroviária Bauru–Panorama: avaliação da conexão entre Bauru e a divisa com Mato Grosso do Sul, considerando sua complementaridade com outros corredores do oeste e com a nova ponte ferroviária em Panorama.

Também serão encaminhados os seguintes projetos associados às cargas e às cadeias agroindustriais e energéticas:

- Ramal ferroviário Ribeirão Preto–Araraquara: avaliação da conexão entre polos agroindustriais e a malha ferroviária estruturante, considerando fluxos de grãos, açúcar, etanol, insumos e produtos processados.
- Ramal ferroviário Campinas–São José dos Campos: avaliação dos fluxos industriais e agroindustriais captáveis pela ligação transversal entre Campinas e o Vale do Paraíba.
- Ramal ferroviário Castilho–Bauru: avaliação da captação de cargas do extremo oeste e de sua integração com Bauru e os demais eixos ferroviários estaduais.
- Ramal ferroviário Presidente Prudente–Marília–Bauru: avaliação de um eixo de consolidação das cargas do oeste paulista, incluindo produtos agrícolas, insumos, biocombustíveis e proteína animal.
- Ramal ferroviário Botucatu–Iperó–Sorocaba: avaliação da conexão entre a região de Botucatu, a Malha Oeste, Sorocaba e os corredores de acesso à Região Metropolitana de São Paulo e ao litoral.
- Ramal ferroviário Itapeva–Itapetininga–Iperó: avaliação da integração do sudoeste paulista com a malha ferroviária principal e da captação de cargas agrícolas, florestais e industriais.
- Ramal ferroviário Sorocaba–São Paulo: avaliação da capacidade e das condições de operação ferroviária entre a Região Metropolitana de Sorocaba e a Região Metropolitana de São Paulo.
- Ramal ferroviário Piracicaba–Sumaré: avaliação da conexão entre áreas produtoras e processadoras da região de Piracicaba e os corredores ferroviários e logísticos de Campinas.
- Ramal ferroviário Sorocaba–Campinas: avaliação de uma ligação transversal entre duas regiões industriais e logísticas, considerando os fluxos captáveis e a possível sobreposição com rotas existentes.
- Dutovia Paulínia–Viracopos: avaliação da movimentação de combustível sustentável de aviação entre o polo de Paulínia e o Aeroporto Internacional de Viracopos, considerando volumes, regularidade, armazenagem, segurança e comparação com o transporte rodoviário.

As seguintes intervenções também deverão integrar a análise:

- Ferrovia Hidroceânica: avaliação da ligação entre a Hidrovia Tietê–Paraná e o litoral sul, considerando sua dependência da implantação de nova infraestrutura portuária, a demanda captável, as conexões intermediárias e a concorrência com outros corredores ferroviários.

- Nova ponte ferroviária em Panorama: avaliação da conexão ferroviária com Mato Grosso do Sul e dos efeitos sobre a Malha Paulista, considerando principalmente os fluxos de celulose e outras cargas que possam utilizar o corredor.

Seus volumes, pontos de conexão e cronogramas deverão ser considerados como condicionantes externos capazes de alterar a demanda e a utilização da rede ferroviária paulista. A análise comparativa deverá considerar a demanda de passageiros, o volume e o tipo das cargas, a extensão recuperada ou implantada, o custo de capital, os custos operacionais, a disponibilidade da faixa de domínio, a necessidade de desapropriações, a capacidade dos trechos compartilhados, os terminais e estações necessários e a integração com os demais modos

Para os serviços de passageiros, deverão ser considerados tempo de viagem, frequência, população e empregos atendidos, acesso a saúde e educação, conexão com o transporte local, receita tarifária, necessidade de subsídio e benefícios sociais. Para cargas, deverão ser considerados tonelagem captável, distância rodoviária até os terminais, custos de transbordo, redução do custo logístico, transferência modal, regularidade dos fluxos, sazonalidade e conexão com unidades de processamento, hidrovias, portos e aeroportos.

Nos corredores com potencial de compartilhamento, a avaliação deverá separar os custos de recuperação da infraestrutura comum dos investimentos específicos de cada serviço. Também deverá estimar a capacidade disponível para passageiros e cargas, as janelas operacionais, a necessidade de pátios e duplicações e os efeitos de diferentes sequências de implantação.

O Produto D-11 registra os corredores e as oportunidades de integração entre serviços de passageiros, logística e desenvolvimento produtivo. O Produto D-14 deverá comparar as alternativas, identificar as configurações tecnicamente consistentes e estabelecer quais corredores justificam aprofundamento, considerando a possibilidade de implantação por etapas e a compatibilidade entre passageiros e cargas.

6.6 Expansão da capacidade do transporte de cargas na hidrovia Tietê-Paraná

a) Contextualização

A Hidrovia Tietê–Paraná ocupa posição estratégica no sistema logístico paulista por conectar áreas de produção agroindustrial do interior a terminais de transbordo, corredores ferroviários e rodoviários e, por meio deles, aos portos marítimos. Sua relevância decorre da capacidade de transportar grandes volumes com menor consumo energético e menor custo unitário em fluxos compatíveis com a navegação interior. A hidrovia também contribui para reduzir a concentração de cargas no modo rodoviário e ampliar a eficiência econômica e ambiental da matriz de transportes.

No Estado de São Paulo, o corredor formado pela navegação entre São Simão e Pederneiras, articulado à ferrovia entre Pederneiras, Itirapina e Santos, constitui uma das principais configurações intermodais associadas à hidrovia. Nesse sistema, as cargas chegam por rodovia aos terminais interiores, percorrem parte da viagem em comboios hidroviários e são transferidas para a ferrovia ou para outros corredores de acesso aos portos. O desempenho de cada componente condiciona o funcionamento do conjunto: restrições na navegação afetam os terminais e a ferrovia, enquanto limitações no transbordo ou no acesso portuário reduzem os benefícios da capacidade hidroviária.

Historicamente, a movimentação está concentrada em produtos agrícolas e granéis de grande volume, especialmente grãos, açúcar e derivados. Entretanto, os materiais analisados indicam interesse na incorporação de celulose, madeira, combustíveis, farelos, DDG e outras cargas com potencial de integração multimodal. A diversificação pode aumentar a utilização dos ativos

existentes e reduzir a exposição da hidrovia à sazonalidade de uma única cadeia produtiva, mas também introduz exigências distintas de armazenagem, segurança, regularidade, frequência e confiabilidade.

A entrada de novos operadores, terminais e fluxos tende a elevar a demanda sobre uma infraestrutura que apresenta limitações físicas e operacionais. Eclusas, canais de aproximação, vãos de pontes, atracadouros de espera e trechos com restrições de calado podem limitar o número, o tamanho e a frequência dos comboios. Como esses componentes funcionam de maneira encadeada, a capacidade efetiva do corredor não corresponde simplesmente à soma das capacidades nominais de suas estruturas. Ela é determinada pelos pontos mais restritivos e pela forma como o tráfego é coordenado.

As eclusas constituem elementos particularmente sensíveis. A passagem exige aproximação, espera, entrada, equalização dos níveis, saída e reorganização dos comboios. Quando a demanda se aproxima da capacidade operacional, pequenos atrasos podem formar filas e propagar seus efeitos para outros trechos. A ausência ou insuficiência de atracadouros de espera aumenta a dificuldade de organizar os comboios e pode criar condições inseguras durante períodos de maior movimentação ou de operação sob restrições.

As pontes também condicionam a capacidade da navegação. Vãos com largura ou altura limitadas podem restringir as dimensões dos comboios e exigir desmembramento, manobras adicionais ou condições específicas de passagem. Essas operações aumentam os tempos e custos e reduzem a regularidade do corredor. A adequação das pontes não se limita ao aumento físico dos vãos: envolve sinalização, proteção de pilares, condições hidráulicas e compatibilidade com a infraestrutura rodoviária ou ferroviária suportada pela obra.

A disponibilidade de calado constitui outro fator determinante. A Hidrovia Tietê–Paraná está inserida em um sistema de reservatórios utilizado simultaneamente para geração de energia, abastecimento, controle de cheias, irrigação, recreação e conservação ambiental. Em períodos de escassez hídrica, decisões relacionadas ao nível dos reservatórios e à operação das usinas podem reduzir as condições de navegação. A necessidade de diminuir o carregamento das embarcações ou interromper trechos compromete a confiabilidade e dificulta a celebração de contratos logísticos de longo prazo.

A ocorrência de interrupções possui efeitos que ultrapassam o período em que a navegação permanece limitada. Embarcadores que não conseguem assegurar a entrega podem transferir suas cargas para rodovias ou ferrovias e manter essa escolha mesmo depois do restabelecimento das condições hidroviárias. A perda de confiabilidade reduz a disposição dos agentes privados para investir em embarcações, terminais e instalações de armazenagem. Portanto, a garantia de níveis mínimos de serviço é tão importante quanto a ampliação da capacidade nominal.

A necessidade de expansão também deve ser interpretada à luz das projeções de demanda. Operadores privados indicam crescimento dos volumes associado à ampliação da utilização ferroviária, à implantação de novos terminais e à incorporação de cargas atualmente transportadas por rodovia. Caso esses movimentos ocorram simultaneamente, a capacidade percebida como segura para a operação contínua pode ser ultrapassada em determinados componentes. A saturação pode se manifestar inicialmente por aumento dos tempos de espera e perda de previsibilidade, antes de se tornar uma impossibilidade física de transportar volumes adicionais.

Esse processo pode produzir um ciclo adverso. A redução da confiabilidade diminui a atratividade da hidrovia para cargas que exigem maior regularidade, limita a diversificação e mantém a concentração em produtos com maior tolerância a variações de prazo. Com menor diversidade e previsibilidade de receitas, tornam-se mais difíceis os investimentos em frota, terminais e serviços. Ao mesmo tempo, o crescimento da produção deslocado para rodovias aumenta o

tráfego de veículos pesados, os custos de conservação, as emissões e a pressão sobre corredores já carregados.

A capacidade do sistema não depende apenas de obras. A coordenação dos comboios, o sequenciamento das passagens pelas eclusas, a comunicação entre terminais e operadores, a programação dos volumes e a disponibilidade de informações em tempo real influenciam o aproveitamento da infraestrutura. A inexistência de uma gestão integrada pode gerar filas e períodos ociosos mesmo quando os componentes físicos ainda possuem alguma capacidade disponível.

Uma central de controle de tráfego e operações poderia melhorar a programação, a visibilidade do corredor e a resposta a incidentes ou restrições. Para produzir resultados, essa estrutura precisaria reunir informações sobre posição e características dos comboios, condições de calado, disponibilidade das eclusas, filas, previsão de chegada aos terminais e ocorrências ao longo da via. A coordenação operacional também dependeria de regras compartilhadas entre gestores públicos, operadores hidroviários, terminais e responsáveis pelas estruturas de geração de energia.

A governança da hidrovia é complexa porque envolve diferentes entes federativos, órgãos gestores, empresas de energia, administradores das eclusas, operadores privados e proprietários ou concessionários de terminais. As decisões sobre níveis de reservatórios, manutenção, obras, segurança e prioridade de passagem podem estar distribuídas entre instituições com objetivos distintos. A fragmentação das competências dificulta a programação integrada e a definição das responsabilidades pelos investimentos.

Os terminais interiores constituem parte indissociável do problema. A ampliação da movimentação hidroviária depende de capacidade para recepção rodoviária, armazenagem, carregamento e descarregamento, além de conexões ferroviárias eficientes. A implantação de um novo terminal pode aumentar a demanda sobre eclusas e trechos críticos sem ampliar a capacidade do corredor. De modo semelhante, obras na hidrovia podem apresentar benefícios reduzidos quando os terminais ou os modos de conexão não conseguem absorver os volumes adicionais.

A expansão da capacidade deve, portanto, ser compreendida como a ampliação do desempenho do sistema, e não apenas como a execução de grandes obras. Intervenções pontuais em eclusas, pontes, canais de aproximação e atracadouros podem ser combinadas com melhorias na sinalização, gestão de tráfego, manutenção, monitoramento hidrológico e coordenação entre operadores. A importância relativa de cada medida depende do gargalo que limita o corredor e da forma como a demanda se distribui no tempo e no espaço.

O problema central consiste em assegurar que a Hidrovia Tietê–Paraná possa absorver o crescimento e a diversificação das cargas sem perda de confiabilidade e sem transferir ineficiências para os terminais, ferrovias, rodovias e portos conectados. Isso exige considerar conjuntamente capacidade física, condições hidrológicas, organização operacional, terminais intermodais e governança, reconhecendo que o desempenho da hidrovia resulta da interação entre todos esses componentes

b) Análise

Considerando que a hidrovia se encontra em plena operação, a análise inicial concentrou-se em levantar dados sobre seu funcionamento atual e em buscar intervenções já previstas pelo Governo do Estado. Foi realizado um levantamento completo dos principais pontos constituintes da hidrovia, desde seu tramo norte, iniciando no Rio Paraná na altura de São Simão (GO), passando pelo Canal Pereira Barreto, até Barra Bonita (SP) no Rio Tietê.

Junto à SEMIL, obtiveram-se dados sobre a navegação, incluindo: tipos de carga transportada, velocidades médias desenvolvidas, distâncias, tempos de embarque e desembarque, tempos de

enchimento e esvaziamento das câmaras das eclusas, ciclos de eclusagem e pontos de restrição à navegação dos comboios. Dentre os principais pontos críticos encontrados, dois se destacam: a atual incompatibilidade entre os comboios típicos da hidrovia e infraestrutura implantada e a vulnerabilidade da hidrovia à períodos de estiagem.

Os comboios típicos da Hidrovia Tietê-Paraná são conhecidos como Duplo-Tietê, possuem capacidade para transporte de 4 barcaças (2x2), totalizando 22 metros de largura de proa e capacidade de 6.000 toneladas (1.500 por barcaça). A infraestrutura física da hidrovia (eclusas e pontes), entretanto, foi projetada para permitir passagem de comboios de 11 metros de largura de proa, pois o comboio típico anterior era 2x1. Ainda que o comboio 2x2 seja mais benéfico para as transportadoras, as embarcações precisam destacar metade do carregamento e realizar operações de vai-e-volta com os empurradores para transpor obstáculos sempre que se aproximam de um ponto limitante, fato que gera filas e aumenta consideravelmente o tempo de viagem de cada embarcação.

Além dessa limitação, outro ponto considerável de restrição é o fechamento dos reservatórios das hidroelétricas em tempos de estiagem. Eventos climáticos extremos como os da crise hídrica de 2014-2016 podem fazer com que as hidroelétricas fechem suas eclusas para poupar água, impossibilitando a navegação pela hidrovia. No passado, esse acontecimento frustrou diversos transportadores do setor, que tiveram de entregar sua carga por alternativa rodoviária, consideravelmente mais cara do que o esperado. A confiabilidade da hidrovia é um fator pesado na escolha do modo e, portanto, constitui assunto de vital importância para sua viabilidade.

Pensando nas restrições existentes e visando melhorar a navegabilidade da hidrovia o Governo do Estado, na figura da SEMIL, apresentou 22 obras previstas para o trecho, listadas abaixo e separadas por *status*: **em andamento**, **em tratativas** e **outras obras**.

As obras em andamento contemplam:

- Ampliação do Canal de Nova Avanhandava e atracadouro de espera a jusante;
- Ponte na SP-461, proteção dos pilares e canal de navegação;
- Ponte na SP-425, ampliação do vão, a cargo do DER-SP;
- Ponte na SP-333, construção de nova ponte e proteção dos pilares, a cargo da Concessionária;
- Na SP-255, construção de nova ponte e proteção dos pilares, a cargo da Concessionária.

As obras em tratativas contemplam:

- Atracadouro de espera a montante de Nova Avanhandava;
- Atracadouro de espera da Eclusa de Promissão;
- Atracadouro de espera da Eclusa de Ibitinga;
- Canal de restituição de Bariri;
- Atracadouro de espera da Eclusa de Bariri;
- Ponte na SP-563, proteção dos pilares, a cargo do DER-SP;
- Ponte Jacaré, remoção de pilar, a cargo do DER-SP;
- Ponte na SP-425, proteção dos pilares, a cargo do DER-SP;
- Ponte na SP-191, construção de nova ponte, a cargo do DER-SP;
- Ponte na SP-147, remoção da ponte antiga, a cargo do DER-SP.

As outras obras listadas contemplam:

- Muro guia de Três Irmãos;
- Canal de aproximação de Nova Avanhandava;
- Atracadouro de espera da Eclusa de Barra Bonita;
- Canal de restituição de Botucatu;
- Istmo do Canal de Botucatu;
- Canal de Anhembi;

- Canal de Conchas.

Com a conclusão das intervenções previstas no âmbito de capacidade (transposição de pontes e eclusas) e navegabilidade em épocas de estiagem (aprofundamento do leito navegável), espera-se um aumento de atratividade e a entrada de novos investimentos privados na hidrovia, fato confirmado durante conversas com empresas de setores interessados. A entrada de novos players gerará maior fluxo de barcaças, contexto no qual a capacidade da hidrovia tornar-se-á novamente uma variável de interesse.

Para explorar o tema capacidade da hidrovia, faz-se necessário enxergar além das capacidades individuais dos gargalos físicos (pontes, eclusas). É preciso observar o sistema composto por: geometria, veículos, pontos de restrição e operação (velocidade, formação de filas etc.). Visando capturar o funcionamento desse sistema, construiu-se em *Visual Basic for Applications* (VBA) um modelo de simulação para a Hidrovia Tietê-Paraná. Esse modelo possibilitou explorar a hidrovia em diferentes condições de operação (nº de barcaças, esquema de filas, velocidades médias etc.).

Nas próximas etapas do plano, serão apresentados mais detalhes sobre as simulações realizadas. O modelo será estratégico na condução de experimentos, exploração de *trade-offs* e quantificação dos benefícios de diferentes táticas de regulação.

c) Encaminhamento

Com o aumento de utilização advindo das obras de melhoria propostas, espera-se que a hidrovia em breve atingirá sua capacidade máxima, limitando seu uso para futuros investimentos e prejudicando a operação de seus atuais usuários. Como intervenções físicas no leito navegável inferem em custos consideráveis para o Estado (alargamento de pontes, duplicações de eclusas, aprofundamento dos canais etc.), alternativas operacionais foram exploradas usando o modelo de simulação criado.

Ficou evidente, durante as simulações, que a utilização de embarcações adequadas à geometria da via, ou seja, embarcações 2x1, é muito mais benéfica para a hidrovia em termos de toneladas transportadas (pois se elimina o problema das filas), embora não seja a solução ótima para os transportadores individuais. A manutenção do perfil 2x2 de embarcação sem intervenções de duplicação das eclusas e pontes, faz com que a hidrovia atinja o colapso muito mais rapidamente que nos casos com embarcações 2x1.

Uma alternativa estudada foi a de utilização de **empurradores auxiliares** para fazer a transposição, sendo esses empurradores ou fornecidos pela própria empresa transportadora ou fornecidos pelo Estado.

Outra alternativa, foi a do **compartilhamento de cargas**. Considerando a restrição de largura já descrita anteriormente, é comum na hidrovia que existam filas em ambos os lados das eclusas/pontes, enquanto os comboios 2x2 atravessam os canais com uma metade da carga por vez. Se durante essas operações de vai-e-volta o empurrador vazio que retorna (chamado "escoteiro") trouxer a carga parada de outra empresa ao invés de atravessar vazio, o tempo de eclusagem das duas embarcações seria reduzido em cerca de 50%. Essa operação, embora vantajosa para ambas as partes, raramente acontece, pois os operadores temem danos à própria carga causados pelo empurrador da empresa auxiliar, o que não estaria coberto pelo seguro.

Considerando as opções, encontrou-se uma forma de incentivar todos os comportamentos benéficos à capacidade global da hidrovia: **a determinação da não prioridade para empurradores escoteiros (vazios)**. Essa medida serviria como:

1) Incentivo para operação com comboios 2x1
2) Incentivo para utilização privada de empurradores auxiliares junto às eclusas
3) Incentivo para acordos de compartilhamento de carga entre operadores

Dessa forma, estariam incentivados os comportamentos que permitem com que a hidrovia atinja sua capacidade máxima, sem vultuosos investimentos para duplicação da infraestrutura existente.

Apesar de não gerar custos construtivos, a medida proposta implica em um controle de filas para garantir que as determinações serão seguidas. A segunda proposta a ser estudada, portanto, é a de **implementação de um CCO para controle do tráfego na hidrovia**.

6.7 Desenvolvimento de novos portos, serviços e regulamentos para o transporte aquaviário de passageiros

a) Contextualização

O transporte aquaviário de passageiros no Estado de São Paulo compreende atividades com funções, escalas e requisitos distintos. Inclui as travessias utilizadas nos deslocamentos cotidianos, os serviços fluviais ou costeiros entre municípios, a navegação turística e recreativa e as operações de cruzeiros marítimos. Embora todas utilizem o meio aquático, cada atividade apresenta padrões próprios de demanda, infraestrutura, embarcações, regulação e integração com o território.

As travessias exercem função essencial de mobilidade. Em determinados locais, balsas e embarcações conectam redes viárias interrompidas por rios, canais ou braços de mar e evitam percursos terrestres muito mais longos. A qualidade desses serviços influencia o acesso da população a empregos, serviços públicos e atividades econômicas. Tempos de espera elevados, baixa confiabilidade e capacidade insuficiente afetam tanto passageiros quanto veículos e podem produzir filas e congestionamentos nos acessos.

A concessão das travessias estaduais e a previsão de investimentos em instalações, sistemas e modernização da frota. Também contempla um novo atracadouro para a ligação entre São Sebastião e Ilhabela, com ampliação da capacidade e preparação da infraestrutura para a eletrificação das embarcações. Essas intervenções constituem condições relevantes para a evolução do transporte aquaviário, mas não esgotam as possibilidades de novos serviços de passageiros.

No âmbito das discussões setoriais, a Secretaria de Turismo e Viagens tem apontado a existência de municípios com potencial para implantação de novos portos fluviais e estruturas náuticas, com o objetivo de formar circuitos de navegação turística e estimular novos serviços de transporte de passageiros. Essa estratégia não depende apenas da presença do rio, mas da capacidade de organizar pontos de embarque e desembarque, estruturar serviços e integrar os investimentos às políticas de turismo e desenvolvimento regional.

A abordagem também se articula às diretrizes em desenvolvimento no âmbito do Plano Estadual Hidroviário de São Paulo – PEH-SP, elaborado por meio de convênio entre a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística – SEMIL e a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAUUSP, que busca subsidiar o planejamento integrado da infraestrutura hidroviária e dos usos múltiplos das hidrovias paulistas.

Além das travessias existentes, o Estado dispõe de rios, reservatórios, canais e áreas costeiras com potencial para serviços regulares ou turísticos. Na Hidrovia Tietê–Paraná, municípios ribeirinhos manifestam interesse em utilizar o rio como elemento de mobilidade, lazer e desenvolvimento regional. Os dez locais inicialmente identificados para implantação ou melhoria de portos fluviais e estruturas náuticas deverão ser considerados segundo suas condições de

navegabilidade, demanda potencial, infraestrutura de acesso e possibilidade de integração com circuitos turísticos regionais.

A expressão "novo porto", nesse contexto, não significa necessariamente a implantação de uma instalação portuária de grande porte. Dependendo da demanda e do tipo de serviço, a infraestrutura pode assumir a forma de terminal de passageiros, píer, atracadouro, ponto de embarque e desembarque ou estrutura compartilhada com marina existente. A solução deve ser proporcional à escala das embarcações, à frequência das operações e às condições locais.

A navegação fluvial de passageiros pode exercer duas funções principais. A primeira é atender deslocamentos regulares entre comunidades, municípios ou pontos situados em margens distintas. A segunda é estruturar passeios, circuitos turísticos e rotas temáticas associados ao patrimônio natural, cultural e paisagístico. Um mesmo terminal pode atender às duas funções, mas os serviços possuem demandas e modelos econômicos diferentes.

Os serviços regulares dependem de frequência, confiabilidade, acessibilidade e integração tarifária e física com o transporte terrestre. Já o turismo apresenta maior sazonalidade e depende da atratividade dos destinos, da comercialização dos roteiros e da articulação com hospedagem, alimentação e atividades culturais. A combinação pode melhorar a utilização das instalações, desde que não comprometa a prioridade dos deslocamentos essenciais.

Na Baixada Santista, a presença de canais, áreas insulares e intensa integração entre os municípios cria oportunidades para serviços aquaviários urbanos e metropolitanos. As catraias de Santos demonstram a permanência de formas tradicionais de transporte pelo estuário, mas também evidenciam a necessidade de adequação das instalações, das embarcações e dos padrões de segurança. Novos serviços precisam ser articulados às redes de ônibus, VLT, terminais terrestres e polos de emprego.

A ampliação da navegação exige ordenamento do acesso às margens. Em diferentes trechos existem pontos informais de embarque, estruturas improvisadas e ocupações que podem comprometer a segurança, a acessibilidade e a conservação ambiental. A regulamentação de marinas, píeres e atracadouros deve definir padrões mínimos de implantação, operação e manutenção, sem impor exigências incompatíveis com serviços de pequena escala.

O transporte marítimo de passageiros associado aos cruzeiros constitui outra dimensão. Santos concentra as operações de embarque e desembarque do Estado e funciona como base de itinerários nacionais e internacionais. Essa concentração oferece escala e serviços especializados, mas limita a distribuição territorial dos benefícios do turismo marítimo e restringe a formação de roteiros com diferentes destinos paulistas.

São Sebastião, Ilhabela, Ubatuba, Cananéia e Iguape apresentam potencial para receber escalas, especialmente de embarcações de menor porte ou roteiros voltados a destinos naturais, históricos e culturais. As condições são diferentes em cada local. Alguns podem operar por fundeio e transferência de passageiros em embarcações menores; outros podem exigir píeres, terminais ou adaptações de instalações existentes. A possibilidade de receber uma escala também não implica capacidade para funcionar como base de embarque e desembarque.

Em Santos, a possibilidade de implantação de um novo terminal de passageiros na área do TECOM aparece como alternativa para ampliar a capacidade e reorganizar as operações. Em São Sebastião, a infraestrutura portuária e sua posição no litoral norte podem permitir função complementar, mas a convivência com cargas, travessias, apoio offshore e atividades urbanas exige coordenação. Em Ilhabela e outros destinos, a capacidade de recepção em terra, o transporte local e os limites ambientais podem ser mais restritivos que a própria aproximação dos navios.

A expansão dos cruzeiros produz fluxos concentrados em intervalos curtos. A chegada simultânea de grande número de passageiros pressiona terminais, vias urbanas, transporte

turístico, atrativos, comércio e serviços. Sem organização, o aumento das escalas pode gerar congestionamentos, degradação dos destinos e benefícios econômicos inferiores aos esperados.

O problema central consiste em estruturar uma rede diversificada de transporte aquaviário de passageiros que combine mobilidade cotidiana, turismo fluvial, navegação costeira e cruzeiros, respeitando as condições de demanda, segurança, navegabilidade, integração terrestre e capacidade ambiental de cada localidade. A criação de infraestrutura deve estar vinculada a serviços viáveis e a regras claras de operação, evitando instalações subutilizadas ou expansão desordenada do acesso às margens

b) Análise

A análise deve distinguir quatro grupos de serviços: travessias, transporte regular entre localidades, navegação turística fluvial ou costeira e cruzeiros marítimos. Essa separação é necessária porque a demanda, a obrigação de continuidade e a forma de financiamento variam. Travessias e ligações regulares podem exercer função pública essencial, enquanto passeios e cruzeiros respondem principalmente ao mercado turístico.

Nas travessias, os principais fatores são capacidade, frequência, tempo de espera, confiabilidade e integração com o sistema viário. O desempenho não depende apenas do número de embarcações. Atracadouros, rampas, áreas de acumulação, bilhetagem, manutenção e procedimentos de embarque condicionam a quantidade de passageiros e veículos atendidos.

A concessão das travessias estaduais altera o modelo de operação e investimento. A transferência das obrigações ao concessionário pode aumentar a previsibilidade, mas exige acompanhamento de metas, tarifas, qualidade, acessibilidade e continuidade. O novo atracadouro São Sebastião–Ilhabela deverá ser considerado como infraestrutura comprometida, evitando que sua capacidade seja novamente atribuída a projetos adicionais.

Para novos serviços regulares, a existência do rio ou canal não comprova demanda suficiente. Devem ser consideradas as origens e os destinos, a frequência necessária, os tempos totais de viagem e as alternativas terrestres. Um serviço aquaviário pode percorrer diretamente uma distância menor e ainda apresentar baixa atratividade quando os terminais estão afastados das centralidades ou as conexões terrestres aumentam o tempo total.

A regularidade também depende das condições de navegação. Variações de nível, correntes, ventos, ondas, neblina, detritos e restrições em canais podem afetar a operação. Nos reservatórios e rios, a localização dos atracadouros deve acompanhar as variações do nível da água. No litoral, as condições de abrigo e fundeio influenciam a possibilidade de operação durante todo o ano.

A seleção dos dez portos fluviais indicados pela área de turismo não deve se basear apenas na distribuição geográfica. A viabilidade depende da combinação entre condições náuticas, demanda, atrativos turísticos, acesso terrestre e capacidade municipal. Localidades próximas podem apresentar maior valor quando organizadas como circuito, permitindo que uma mesma embarcação e estrutura de apoio atendam a diferentes destinos.

O desenvolvimento de circuitos turísticos pode ampliar o tempo de permanência dos visitantes e distribuir receitas entre municípios ribeirinhos. Entretanto, os benefícios dependem da integração com hospedagem, alimentação, transporte local, eventos e atrativos. Um terminal isolado, sem serviços em terra ou estratégia de comercialização, tende a produzir movimentação limitada.

A sazonalidade é uma restrição relevante. Serviços estruturados apenas para fins de semana, férias ou eventos podem apresentar baixa utilização anual. A combinação de deslocamentos regulares, turismo e eventos pode melhorar o aproveitamento da infraestrutura, mas exige compatibilidade entre embarcações e horários. Em locais sem demanda cotidiana, instalações

modulares ou compartilhadas podem ser mais adequadas que terminais permanentes de maior porte.

A navegação turística e recreativa também pode gerar conflitos com cargas, pesca, esportes náuticos e usos ambientais. Na Hidrovia Tietê–Paraná, embarcações de passageiros podem compartilhar trechos com comboios de carga e aproximar-se de eclusas, terminais e canais operacionais. A segurança exige regras de circulação, comunicação, sinalização e prioridade compatíveis com as características de cada embarcação.

Nos acessos às margens, a informalidade pode representar tanto uma deficiência quanto uma evidência de demanda existente. A regularização não deve resultar apenas em proibição. Deve oferecer alternativas seguras de embarque e estabelecer critérios proporcionais para pequenos operadores, marinas e comunidades. Exigências excessivas podem eliminar serviços locais; padrões insuficientes podem manter riscos e impactos ambientais.

A infraestrutura deve contemplar acessibilidade universal, proteção contra quedas, iluminação, sinalização, áreas de espera, sanitários quando compatíveis com a escala e condições seguras de transição entre terra e embarcação. A variação do nível da água e o movimento das embarcações tornam a acessibilidade mais complexa que em terminais terrestres.

As embarcações devem ser compatíveis com a rota, a demanda e as condições ambientais. Serviços urbanos podem exigir unidades menores e frequentes. Travessias de veículos demandam balsas e áreas de acumulação. Circuitos turísticos podem utilizar embarcações de menor porte, enquanto operações costeiras exigem requisitos adequados de estabilidade, comunicação e salvamento. A eletrificação pode reduzir emissões locais e ruído, mas depende de autonomia, infraestrutura de recarga e disponibilidade de energia nos atracadouros.

A regulação envolve diferentes competências. A segurança da navegação e a habilitação das embarcações e tripulações se relacionam às autoridades marítimas. A exploração dos serviços e instalações pode envolver União, Estado, municípios, ANTAQ, autoridades portuárias e concessionários. O uso das margens depende da titularidade das áreas, das normas ambientais e da legislação municipal. Essa distribuição exige clareza sobre autorização, fiscalização, manutenção e responsabilidade em acidentes.

Nos serviços públicos, o regime de prestação deve assegurar frequência, continuidade, tarifa e qualidade. Nos serviços turísticos, a regulação pode concentrar-se na segurança, no ordenamento, na proteção ambiental e nas condições de acesso às instalações. Um único regime para atividades tão diferentes poderia criar obrigações inadequadas ou lacunas regulatórias.

A integração tarifária é especialmente relevante para serviços utilizados nos deslocamentos cotidianos. A cobrança separada do trecho aquaviário e das conexões terrestres pode tornar a viagem pouco competitiva. A bilhetagem integrada e os mecanismos de compensação entre operadores podem ampliar a utilização, mas exigem definição institucional e financeira.

Na Baixada Santista, os serviços aquaviários devem ser avaliados em relação ao VLT, às linhas de ônibus, às travessias e à mobilidade urbana. Uma nova ligação pode reduzir percursos terrestres ao atravessar diretamente o estuário, mas seu benefício depende da localização dos terminais e das conexões nas duas margens. Também devem ser considerados os conflitos com a navegação portuária e as áreas de segurança do Porto de Santos.

A operação das catraias possui valor funcional, histórico e cultural. Sua modernização pode preservar o serviço e melhorar segurança e acessibilidade, sem eliminar suas características locais. A substituição integral por embarcações de maior porte pode elevar custos e reduzir a flexibilidade em rotas de baixa demanda.

No turismo de cruzeiros, é necessário distinguir porto-base, ponto de escala e fundeio. Um porto-base exige terminal de passageiros, processamento de bagagens, controle de acesso,

abastecimento, destinação de resíduos, estacionamento e conexão com aeroportos e rodovias. Um ponto de escala recebe passageiros durante algumas horas e depende principalmente da capacidade de desembarque, recepção e distribuição turística. A infraestrutura e os custos são substancialmente diferentes.

Santos reúne as principais condições para permanecer como porto-base, devido à escala das operações, à proximidade da Região Metropolitana de São Paulo e à disponibilidade de serviços. A implantação de terminal na área do TECOM pode ampliar a capacidade, mas deve ser avaliada em relação aos acessos, aos usos portuários existentes e à operação do canal. A mudança de localização só se justifica se produzir ganhos operacionais e melhor integração terrestre.

São Sebastião apresenta potencial como base complementar ou ponto de escala. Sua capacidade depende da disponibilidade de instalações, da coexistência com as operações de carga e apoio offshore e da acessibilidade pelo litoral norte. A implantação de infraestrutura de grande porte deve ser compatível com o mercado potencial e com as restrições territoriais e ambientais.

Ilhabela já possui reconhecimento turístico e pode receber passageiros por fundeio, mas a concentração de visitantes pressiona o sistema viário, os atrativos e os serviços locais. O número de escalas deve ser compatível com a capacidade de recepção do município e com a proteção dos recursos naturais que sustentam a própria atividade turística.

Ubatuba, Cananéia e Iguape podem integrar roteiros diferenciados, especialmente com embarcações menores. Esses destinos apresentam ativos ambientais e culturais relevantes, mas também maior sensibilidade ecológica e limitações de acesso. A viabilidade depende menos da construção de grandes terminais e mais da adequação de pontos de desembarque, da organização de serviços receptivos e da compatibilidade com as condições de navegação.

A ampliação de escalas não garante benefícios locais elevados. Passageiros podem permanecer pouco tempo no destino ou consumir serviços contratados previamente pelas companhias. A avaliação econômica deve considerar gastos efetivamente retidos no município, geração de empregos, sazonalidade, custos públicos e possíveis impactos sobre outras atividades turísticas.

A capacidade de suporte dos destinos deve integrar a análise. Água, saneamento, resíduos, trânsito, segurança, serviços de saúde e conservação dos atrativos podem ser pressionados pela chegada simultânea de visitantes. O número e o porte dos navios precisam ser compatíveis com essa capacidade, evitando que o crescimento do turismo comprometa a qualidade urbana e ambiental.

Os impactos ambientais variam conforme a instalação e o serviço. Dragagem, píeres, marinas e terminais podem afetar margens, manguezais, praias e habitats aquáticos. As embarcações geram ruído, ondas, emissões e resíduos. Em áreas protegidas, a localização dos pontos e os limites de operação devem respeitar os objetivos de conservação e a presença de comunidades tradicionais.

A análise conjunta mostra que os investimentos mais consistentes são aqueles em que infraestrutura, serviço e destino se sustentam mutuamente. Não há benefício em implantar um porto sem operador ou demanda, assim como um serviço não se mantém sem terminais seguros e integração terrestre. A regulação deve permitir diferentes escalas de solução e assegurar que o crescimento ocorra de forma ordenada.

c) Encaminhamento

O desenvolvimento de novos portos, serviços e regulamentos para o transporte aquaviário de passageiros será encaminhado para análise fora da rede no Produto D-14. A avaliação abrangerá infraestrutura, demanda, modelo operacional, regulação, integração terrestre, viabilidade econômica, impactos territoriais e ambientais.

As intervenções comprometidas no programa de concessão das travessias, incluindo o novo atracadouro São Sebastião–Ilhabela, serão consideradas como condições existentes ou programadas. O D-14 não deverá contabilizá-las como novos projetos, mas poderá avaliar suas interfaces com serviços complementares e com o desenvolvimento do turismo aquaviário.

Serão encaminhados ao D-14 os seguintes projetos:

- Programa de portos fluviais e estruturas náuticas nos municípios indicados pela Secretaria de Turismo e Viagens

Avaliação das dez localidades identificadas, considerando demanda, navegabilidade, infraestrutura urbana, acessos terrestres, atrativos turísticos e possibilidades de formação de circuitos. As soluções poderão variar entre terminais, píeres, atracadouros e adequação de estruturas existentes.

- Programa de circuitos turísticos na Hidrovia Tietê–Paraná

Avaliação de rotas entre municípios ribeirinhos, integradas a atrativos naturais, culturais e históricos. O estudo deverá considerar sazonalidade, frequência, embarcações, permanência dos visitantes e articulação com hospedagem, alimentação e transporte local.

- Serviços regulares de transporte fluvial e costeiro entre municípios

Avaliação de ligações com função de mobilidade regional ou local, distinguindo-as dos passeios turísticos. Deverão ser analisados demanda, horários, tempo total de viagem, tarifa, integração com ônibus e continuidade do serviço.

- Sistema aquaviário de passageiros da Baixada Santista

Avaliação de ligações pelo estuário e canais da região, considerando as catraias existentes, novos serviços entre margens, integração com ônibus e VLT e compatibilidade com a navegação portuária.

- Programa de modernização e regularização das catraias

Avaliação de melhorias nas embarcações, atracadouros, segurança, acessibilidade e integração ao transporte local, preservando a função e as características culturais do serviço.

- Regulamentação de marinas, píeres, atracadouros e acessos às margens

Elaboração de critérios proporcionais para localização, implantação, operação, manutenção, segurança e proteção ambiental. A regulamentação deverá diferenciar instalações públicas, privadas, comunitárias e turísticas.

- Modelo regulatório para os serviços aquaviários de passageiros

Definição dos regimes aplicáveis às travessias, linhas regulares, transporte sob demanda, passeios e circuitos turísticos. A análise deverá esclarecer competências, formas de autorização ou contratação, obrigações, tarifas, fiscalização e responsabilidade pelos investimentos.

- Novo terminal de cruzeiros no Porto de Santos

Avaliação da implantação de terminal na área do TECOM ou em localização alternativa, comparando capacidade, acessos, custos, interferências com as cargas e benefícios em relação à infraestrutura existente.

- São Sebastião como base complementar ou ponto de escala de cruzeiros

Avaliação das alternativas de operação, incluindo embarque e desembarque, escala e fundeio. O projeto deverá considerar a infraestrutura necessária, o acesso terrestre, a coexistência com cargas e apoio offshore e a relação com Ilhabela.

- Pontos de escala em Ilhabela e Ubatuba

Avaliação das condições de fundeio ou atracação, capacidade de desembarque, transporte local, infraestrutura turística e limites ambientais e urbanos para recepção de passageiros.

- Pontos de escala em Cananéia e Iguape

Avaliação de operações com embarcações compatíveis com as condições de navegação e a sensibilidade ambiental do litoral sul. O projeto deverá considerar patrimônio histórico, comunidades tradicionais, unidades de conservação e capacidade dos serviços locais.

- Programa de articulação com companhias de cruzeiros e operadores turísticos

Avaliação da demanda do mercado, requisitos das embarcações, interesse por novos destinos, duração das escalas e possibilidades de inserção do litoral paulista nos roteiros nacionais e internacionais.

- Sistema de informações sobre transporte aquaviário de passageiros

Estruturação de base de dados sobre instalações, embarcações, rotas, passageiros, frequências, incidentes, sazonalidade e condições ambientais. O sistema deverá apoiar o planejamento, a fiscalização e a revisão periódica dos serviços.

A comparação dos projetos deverá considerar demanda, custo de implantação e operação, necessidade de recursos públicos, acessibilidade, integração com o transporte terrestre, segurança, regularidade, geração de renda local, capacidade de suporte dos destinos e impactos ambientais.

O Produto D-11 registra as oportunidades, restrições e alternativas associadas ao transporte aquaviário de passageiros. O Produto D-14 deverá comparar as localizações e os modelos de serviço, avaliar sua viabilidade e propor uma estrutura regulatória capaz de articular mobilidade, turismo, segurança da navegação e conservação ambiental.

6.8 Estratégias junto às plataformas digitais, visando à otimização do transporte de cargas

a) Contextualização

O transporte rodoviário de cargas apresenta ineficiências associadas ao desequilíbrio entre os fluxos de ida e volta. Em muitos mercados, o veículo transporta carga em um sentido, mas não encontra frete compatível para o retorno, realizando parte do percurso vazio. Essa situação reduz a produtividade da frota, eleva o custo por tonelada transportada, aumenta o consumo de combustível e contribui para emissões que poderiam ser evitadas.

A ocorrência de viagens vazias decorre de fatores estruturais. Os fluxos de carga não são necessariamente equilibrados entre duas regiões, os horários de entrega podem ser incompatíveis, as características dos veículos limitam os produtos que podem ser transportados e os motoristas nem sempre dispõem de informações sobre cargas de retorno. Também influenciam a fragmentação do setor, a presença de caminhoneiros autônomos e pequenas transportadoras e a baixa integração entre sistemas de embarcadores, operadores logísticos e terminais.

A contratação tradicional de fretes depende de redes de relacionamento, contatos telefônicos, intermediários e conhecimento prévio dos mercados. Esses mecanismos continuam relevantes, mas possuem alcance limitado e podem dificultar o encontro entre um veículo disponível e uma carga compatível em outra região. A falta de informação aumenta os períodos de espera e a probabilidade de retorno sem carga.

As plataformas digitais procuram reduzir essa assimetria ao reunir informações sobre oferta de veículos e demanda por transporte. Marketplaces e aplicativos de frete permitem que embarcadores, transportadoras e motoristas consultem oportunidades segundo origem, destino, tipo de veículo, carroceria, produto e período de disponibilidade. Quanto maior a base de usuários e a quantidade de cargas disponíveis, maior tende a ser a possibilidade de encontrar combinações compatíveis.

A digitalização não se limita à contratação do frete. As plataformas passaram a incorporar rastreamento, gestão de documentos, pagamentos, avaliação de parceiros, cálculo de custos, agendamento de carga e descarga e controle de pátios e docas. Essas funcionalidades podem reduzir não apenas as viagens vazias, mas também o tempo de espera e outras formas de improdutividade que ocorrem durante a operação.

As soluções disponíveis apresentam modelos de negócio distintos. Algumas funcionam como marketplaces generalistas, conectando cargas e veículos em diferentes setores. Outras são especializadas em cadeias produtivas específicas, nas quais o tipo de veículo, os requisitos sanitários ou as características do produto exigem maior controle. Também existem plataformas de integração logística voltadas ao agendamento, à gestão de janelas operacionais e ao intercâmbio de dados entre empresas.

No Brasil, a TruckPad[155] e a Fretebras[156] exemplificam plataformas com ampla atuação na conexão entre transportadores, caminhoneiros e oportunidades de frete. A Trizy[157] atua na integração da jornada logística, incluindo agendamento, documentos, rastreamento e gestão operacional. A Uboi[158] representa uma solução setorial voltada ao transporte de bovinos. A permanência dessas plataformas no mercado demonstra que a intermediação digital de cargas e a gestão eletrônica das operações já dispõem de modelos privados em funcionamento.

Tabela 6-3: Exemplos de plataformas digitais atuantes no mercado brasileiro.

Plataforma	Modelo predominante	Principais funções relacionadas à eficiência logística	Contribuição potencial
TruckPad	Plataforma logística e marketplace	Conexão entre transportadores e motoristas, gestão de embarques, rastreamento, documentos e pagamentos	Ampliação das oportunidades de contratação e melhor utilização dos veículos
Fretebras	Marketplace generalista de fretes	Busca de cargas por origem, destino, veículo e carroceria, negociação e disponibilidade para novos fretes	Identificação de cargas compatíveis com a rota e redução da probabilidade de retorno vazio

[155] TruckPad (2026). Soluções para Embarcadores e Transportadoras. Disponível em: https://www.truckpad.com.br. Acesso em: 06/08/2026.
[156] Fretebras (2026). Sobre a Plataforma. Disponível em: https://www.fretebras.com.br/quem-somos. Acesso em: 06/08/2026.
[157] Trizy (2026). Sobre a Plataforma. Disponível em: https://www.trizy.com.br/sobre-a-trizy. Acesso em: 06/08/2026.
[158] JBS (2025). Uboi, da JBS, ultrapassa 5 milhões de cabeças de gado transportadas no Brasil. Disponível em: https://www.jbs.com.br/imprensa/uboi-da-jbs-ultrapassa-5-milhoes-de-cabecas-de-gado-transportadas-no-brasil/. Acesso em: 06/08/2026.

Plataforma	Modelo predominante	Principais funções relacionadas à eficiência logística	Contribuição potencial
Trizy	Integração e gestão operacional	Agendamento, gestão de pátio e docas, rastreamento, documentos e comunicação entre os agentes	Redução de filas, esperas e improdutividade nas operações de carga e descarga
Uboi	Plataforma setorial	Contratação e gestão do transporte de bovinos, monitoramento e organização das viagens	Otimização de uma cadeia com requisitos específicos de veículo, segurança e bem-estar animal

Fonte: TruckPad, Fretebras, Trizy e Uboi. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

As experiências internacionais apresentam estrutura semelhante. Nos Estados Unidos, bolsas digitais de frete e plataformas de correspondência entre cargas e veículos atendem a um mercado rodoviário de grande escala[159] [160] [161]. Na Europa, plataformas operam entre diferentes países e incorporam soluções de interoperabilidade e documentação[162] [163]. Índia e China apresentam mercados extensos e fragmentados, nos quais a digitalização é utilizada para aproximar transportadores e embarcadores[164] [165].

Essas experiências demonstram que o desenvolvimento de plataformas não depende, necessariamente, da criação de um sistema público. A iniciativa privada possui incentivos para desenvolver os modelos de negócio, ampliar a base de usuários e incorporar funcionalidades que aumentem a eficiência. A atuação pública se torna mais relevante quando existem falhas que o mercado não consegue resolver, como ausência de padrões de dados, barreiras regulatórias, exclusão digital, riscos concorrenciais ou insuficiência de mecanismos de segurança e proteção das informações.

O problema a ser analisado consiste, portanto, em determinar se há uma lacuna que justifique intervenção específica do Estado de São Paulo ou se as plataformas existentes já oferecem as funções necessárias para aproximar cargas e veículos e reduzir deslocamentos vazios. Também deve ser considerado se eventual apoio público produziria benefício adicional ou apenas substituiria investimentos privados, favoreceria determinados operadores ou duplicaria soluções disponíveis.

b) Análise

A comparação das experiências indica que o mercado já oferece soluções para as principais etapas digitais do transporte rodoviário de cargas. Existem plataformas para publicação e busca de fretes, contratação de motoristas, localização dos veículos, gestão documental, pagamentos, rastreamento, agendamento de carga e descarga e controle de terminais. Não se identifica

[159] DAT Freight (2026). Official Website. Disponível em: https://www.dat.com. Acesso em: 06/08/2026.
[160] Uber Freight (2026). Official Website. Disponível em: https://www.uberfreight.com. Acesso em: 06/08/2026.
[161] McMaster-Carr (2026). Official Website. Disponível em: https://www.mcmaster.com. Acesso em: 06/08/2026.
[162] TIMOCOM (2026). Official Website. Disponível em: https://www.timocom.com. Acesso em: 06/08/2026.
[163] Teleroute (2026). Official Website. Disponível em: https://www.teleroute.com. Acesso em: 06/08/2026.
[164] Mahindra Logistics (2022). Acquisition of Rivigo's B2B Express Business. Disponível em: https://mahindralogistics.com/tabs/cms/files/MESPL-announcement.pdf. Acesso em: 06/08/2026.
[165] Full Truck Alliance (2026). Official Website. Disponível em: https://www.fulltruckalliance.com. Acesso em: 06/08/2026.

ausência geral de tecnologia que exija a criação de uma nova plataforma pelo poder público estadual.

A presença simultânea de plataformas generalistas, setoriais e de integração operacional também indica que não existe um único modelo de negócio adequado a todas as cadeias. Produtos agrícolas, animais vivos, cargas industrializadas, contêineres e mercadorias de alto valor possuem requisitos diferentes. A diversidade de soluções privadas permite que cada segmento adote as funcionalidades mais compatíveis com sua operação.

As plataformas generalistas dependem de escala e efeito de rede. Sua utilidade cresce com o número de embarcadores, transportadores e cargas disponíveis. A entrada de uma plataforma pública no mesmo mercado exigiria esforço elevado de adesão e poderia fragmentar ainda mais a base de usuários. Sem quantidade suficiente de cargas, o sistema público não conseguiria oferecer aos motoristas oportunidades equivalentes às plataformas privadas já consolidadas.

A criação ou contratação de uma plataforma específica pelo Estado também poderia produzir riscos concorrenciais. A escolha de um fornecedor ou padrão tecnológico poderia favorecer uma empresa, estabelecer dependência de determinada solução e dificultar a entrada de novos concorrentes. Além disso, o poder público teria de assumir custos contínuos de atualização, segurança cibernética, atendimento ao usuário, integração e armazenamento de dados

O valor de uma plataforma depende de liquidez, confiança dos usuários, receitas recorrentes e capacidade de adaptação. O risco de operação e inovação é mais adequadamente administrado por empresas que atuam nesse mercado do que por uma estrutura pública voltada a oferecer diretamente o mesmo serviço.

As plataformas podem contribuir para a descarbonização ao aumentar a taxa de ocupação dos veículos e reduzir a quilometragem percorrida sem carga. O benefício não decorre da eliminação automática de uma viagem, pois o caminhão ainda precisa realizar o percurso de retorno ou alcançar uma nova origem. O ganho ocorre quando a mesma quilometragem passa a transportar maior quantidade de carga ou quando o encontro entre operações permite reduzir desvios, reposicionamentos e deslocamentos improdutivos.

O efeito ambiental depende da existência de cargas compatíveis. Um veículo pode estar disponível para retorno, mas não possuir carroceria adequada, autorização, condição sanitária ou capacidade para transportar a carga ofertada. Os horários de coleta e entrega também podem ser incompatíveis com a jornada do motorista ou com os compromissos seguintes. Por isso, a quantidade de cargas anunciadas não corresponde diretamente à redução efetiva de viagens vazias.

Tabela 6-4: Efeitos potenciais das plataformas e possíveis efeitos ambientais.

Funcionalidade	Ineficiência enfrentada	Efeito operacional possível	Relação com a descarbonização
Correspondência entre cargas e veículos	Retorno vazio ou capacidade ociosa	Aumento da ocupação e aproveitamento do retorno	Redução da quilometragem vazia por tonelada transportada
Otimização de rotas	Desvios e reposicionamentos desnecessários	Redução da distância percorrida	Menor consumo de combustível e emissão por operação
Agendamento de carga e descarga	Filas e tempo de espera	Redução da permanência com o motor em funcionamento e melhor utilização do veículo	Redução do consumo durante espera e da improdutividade

Funcionalidade	Ineficiência enfrentada	Efeito operacional possível	Relação com a descarbonização
Rastreamento e informação em tempo real	Incerteza sobre veículo, carga e terminal	Reprogramação mais rápida diante de atrasos	Redução de deslocamentos e esperas evitáveis
Documentação eletrônica	Processos manuais e retenções	Menor tempo de liberação e menor risco de erro	Contribuição indireta pela redução de atrasos
Integração entre plataformas e sistemas	Informação fragmentada	Ampliação do universo de cargas e veículos compatíveis	Maior potencial de ocupação da frota

Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

A contribuição para a descarbonização deve ser considerada auxiliar. A digitalização não substitui a renovação da frota, o uso de combustíveis de menor impacto, a transferência modal nem a melhoria da infraestrutura. Seu efeito está associado à eficiência com que os veículos existentes são utilizados. Ainda assim, a redução de quilômetros vazios pode gerar resultados em prazo mais curto e sem necessidade de grandes investimentos físicos.

Também pode ocorrer efeito de retorno. A redução dos custos e o aumento da eficiência podem diminuir o preço do frete e estimular nova demanda por transporte rodoviário. Parte da economia de combustível obtida com a redução de viagens vazias pode ser compensada pelo crescimento do volume transportado ou pelo deslocamento de cargas de outros modos. Por isso, resultados informados por plataformas estrangeiras não devem ser aplicados diretamente à frota paulista.

A mensuração exigiria comparar a quilometragem total, a quilometragem carregada e o volume transportado antes e depois da adoção. Seria necessário distinguir redução real de deslocamentos vazios de simples transferência de usuários entre plataformas. Também deveriam ser considerados tipo de veículo, carga, distância, consumo de combustível, tempo de espera e eventual crescimento da demanda.

Entretanto, a ausência de quantificação estadual conclusiva não caracteriza falha suficiente para justificar a criação de uma política ou plataforma específica. O potencial ambiental pode ser reconhecido qualitativamente no D-11, enquanto os operadores privados mantêm os incentivos econômicos para reduzir a ociosidade. Em geral, cada viagem vazia evitada ou ocupada com nova carga representa ganho de receita para o transportador, o que alinha o benefício ambiental ao interesse econômico.

A adoção pode ser mais difícil para caminhoneiros autônomos e pequenas transportadoras com menor acesso digital ou menor capacidade administrativa. Contudo, essa dificuldade não exige um programa exclusivo para plataformas logísticas. Políticas horizontais de capacitação, inclusão digital, apoio às pequenas empresas e inovação podem atender a esse público sem selecionar uma empresa ou tecnologia.

O Estado de São Paulo já dispõe de instrumentos para apoio à pesquisa e à inovação. O Programa Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas – PIPE, da FAPESP, apoia pesquisa científica e tecnológica desenvolvida em pequenas empresas paulistas, inclusive projetos que resultem em novos produtos, processos, sistemas ou serviços[166]. Empresas de logística digital que apresentem inovação efetiva podem recorrer a esse tipo de mecanismo em condições semelhantes às de outros setores.

166

Também existem instrumentos nacionais de crédito, subvenção, pesquisa aplicada e desenvolvimento empresarial conduzidos por instituições como Finep, BNDES e EMBRAPII. Esses mecanismos reduzem a necessidade de constituir um fundo estadual setorial ou reservar recursos especificamente para aplicativos de contratação de fretes.

A utilização dos programas existentes preserva a neutralidade concorrencial. As empresas concorrem segundo regras gerais de mérito, inovação e viabilidade, sem que o órgão responsável pela política de transportes escolha previamente uma plataforma. Esse arranjo permite apoiar novas tecnologias quando houver conteúdo inovador e benefício demonstrável, sem transformar o Estado em operador, contratante exclusivo ou promotor comercial de uma solução privada.

As experiências analisadas mostram, portanto, que a função econômica dessas plataformas já é desempenhada pelo mercado privado brasileiro. Há soluções capazes de conectar cargas e veículos, organizar operações setoriais e integrar agendamentos, documentos e terminais. O Estado não precisa desenvolver uma nova plataforma, subsidiar permanentemente os operadores existentes nem instituir mecanismo financeiro exclusivo.

c) Encaminhamento

As plataformas digitais podem contribuir de maneira auxiliar para a descarbonização do transporte rodoviário de cargas, sobretudo pela redução de viagens de retorno vazias, pelo aumento da ocupação dos veículos e pela diminuição de esperas e deslocamentos improdutivos. Esses benefícios estão associados ao aumento da eficiência operacional e complementam, sem substituir, as políticas de renovação da frota, combustíveis de menor impacto e transferência modal.

O mercado privado brasileiro já apresenta diferentes modelos de negócio para atender a essas funções. Há marketplaces generalistas, plataformas especializadas em cadeias produtivas e soluções de integração operacional. A diversidade e a permanência dessas iniciativas indicam que não existe lacuna de oferta que justifique a criação de uma plataforma estadual ou a contratação de um sistema público concorrente.

Também não se recomenda a concessão de subsídios, incentivos ou divulgação institucional direcionados a plataformas específicas. Essa atuação poderia favorecer determinados agentes, produzir dependência tecnológica e substituir investimentos que já possuem retorno econômico privado.

Empresas que desenvolvam soluções efetivamente inovadoras poderão utilizar os instrumentos horizontais de apoio à pesquisa, desenvolvimento empresarial e inovação já disponíveis no Estado de São Paulo, especialmente os programas da FAPESP. A utilização desses mecanismos permite apoiar projetos segundo critérios gerais de mérito e adicionalidade, sem necessidade de fundo ou programa exclusivo para aplicativos de transporte de cargas.

O Estado poderá continuar disponibilizando dados públicos de infraestrutura e transporte, promovendo inclusão digital e aplicando as normas gerais de proteção de dados, segurança e concorrência. Essas atividades integram políticas transversais e não configuram projeto específico decorrente desta seção.

O Produto D-11 registra a existência do problema das viagens vazias, reconhece o potencial auxiliar das plataformas para aumentar a eficiência e reduzir emissões e conclui que os modelos necessários já são ofertados pelo mercado privado. Não se identifica necessidade de intervenção estadual específica, razão pela qual o assunto se encerra neste produto.

7 INFRAESTRUTURA E GESTÃO RODOVIÁRIA

As contribuições recebidas nos contatos setoriais evidenciam demandas por expansão, adequação e conservação da infraestrutura rodoviária paulista, acompanhadas da necessidade de aprimorar sua gestão. Essas demandas abrangem diferentes escalas, desde novas ligações e ampliações de capacidade em corredores logísticos até intervenções localizadas em acessos, travessias e vias rurais. Sua avaliação exige considerar a função de cada trecho, as condições de tráfego, a segurança dos usuários e a articulação com as demais redes de transporte.

Este capítulo reúne os temas relacionados à implantação de novas rodovias, à ampliação e modernização da capacidade existente, à redução de sinistros envolvendo usuários vulneráveis e cargas perigosas, à regulação e priorização de demandas rodoviárias e à pavimentação, recuperação ou estadualização de vias em áreas rurais. A análise considera tanto as necessidades de intervenção física quanto os procedimentos para receber, qualificar e comparar solicitações de municípios, empresas e outros agentes, incluindo as exigências específicas da circulação de cargas especiais.

O objetivo é estabelecer bases para distinguir problemas que demandam novas ligações ou aumento de capacidade daqueles que podem ser enfrentados por adequações pontuais, medidas operacionais ou aperfeiçoamentos na gestão. Conforme sua natureza e escala, as propostas poderão subsidiar as simulações do Produto D-12 ou os aprofundamentos do Produto D-14. Esse encaminhamento busca relacionar as intervenções às necessidades demonstradas do sistema e apoiar sua avaliação segundo critérios de desempenho, segurança, acessibilidade e viabilidade de implantação.

7.1 Programa de novas rodovias

a) Contextualização

Função das novas ligações na organização da rede rodoviária

A malha rodoviária paulista apresenta elevada capilaridade e desempenha função central na circulação de passageiros, no abastecimento urbano e no escoamento da produção industrial e agropecuária. Apesar de sua abrangência, o crescimento das áreas urbanizadas, a redistribuição territorial das atividades econômicas, a implantação de novos polos produtivos e logísticos e o aumento dos fluxos entre regiões modificaram as condições para as quais parte dessa rede foi originalmente planejada. Como resultado, determinadas relações territoriais continuam dependentes de percursos indiretos, travessias urbanas ou segmentos que concentram diferentes tipos de tráfego.

Nesse contexto, a implantação de novas rodovias, prolongamentos e contornos pode complementar a estrutura existente, criar conexões entre corredores que atualmente não se comunicam de forma direta e oferecer alternativas para trechos sujeitos a congestionamentos, restrições físicas ou conflitos com áreas urbanizadas. Diferentemente de intervenções destinadas apenas a ampliar a capacidade de uma rodovia existente, esses projetos modificam a configuração da rede ao acrescentar novos segmentos, estabelecer novas ligações entre municípios ou desviar fluxos para trajetos alternativos.

Para fins desta análise, o Programa de Novas Rodovias compreende principalmente a implantação de novos traçados, o prolongamento de rodovias existentes, a construção de contornos urbanos e a criação de rotas alternativas. As duplicações, faixas adicionais, vias marginais e demais intervenções concentradas na ampliação ou modernização da infraestrutura existente são tratadas separadamente no Programa de Ampliação e Modernização da Capacidade Rodoviária. Essa delimitação evita sobreposição entre as duas frentes e permite avaliar de forma específica os efeitos decorrentes da inclusão de novos segmentos na rede.

Novas conexões e redução de percursos indiretos

Em diferentes regiões do Estado, a ausência de conexões diretas entre rodovias estruturantes obriga veículos de carga e passageiros a utilizar trajetos mais extensos ou segmentos com características incompatíveis com a função que passaram a exercer. Os prolongamentos rodoviários podem preencher essas descontinuidades, aproximar centros regionais, ampliar a área de influência de corredores existentes e melhorar o acesso a polos industriais, agroindustriais, logísticos e turísticos.

A carteira analisada inclui propostas com funções territoriais distintas. Algumas procuram estabelecer ligações entre grandes eixos rodoviários; outras pretendem ampliar a conectividade de regiões com menor densidade de infraestrutura ou oferecer alternativas para corredores condicionados por restrições ambientais, topográficas ou urbanas. Também existem projetos destinados a conectar áreas produtivas a instalações logísticas, terminais intermodais, aeroportos e corredores de acesso ao litoral.

A justificativa de uma nova ligação, entretanto, não pode se apoiar apenas na redução geométrica das distâncias. A introdução de um novo segmento altera a distribuição dos fluxos na rede e pode produzir efeitos sobre rodovias concorrentes ou complementares, sobre os acessos municipais e sobre a localização futura das atividades econômicas. Por essa razão, a avaliação deve considerar a demanda efetivamente desviada ou induzida, a economia de tempo, a redução dos custos operacionais, a conectividade proporcionada e a função que a ligação exercerá no conjunto da rede estadual.

Contornos urbanos e conflitos entre tráfego regional e circulação local

A expansão urbana ao longo das rodovias incorporou diversos trechos originalmente periféricos ao tecido das cidades. Nessas situações, uma mesma infraestrutura passa a atender simultaneamente ao tráfego de longa distância, aos deslocamentos cotidianos da população e ao acesso a atividades comerciais, industriais e residenciais instaladas em suas margens. Essa sobreposição reduz a fluidez, aumenta o número de acessos e interseções, amplia os riscos de acidentes e cria barreiras à mobilidade urbana.

Os contornos rodoviários constituem uma alternativa para retirar o tráfego de passagem, especialmente veículos pesados, das áreas urbanizadas. Ao criar um percurso externo, essas intervenções podem reduzir conflitos em travessias urbanas, melhorar as condições de segurança, diminuir tempos de viagem e permitir que o trecho anterior assuma função predominantemente local. Essa solução aparece na carteira de projetos para municípios de diferentes portes e regiões do Estado, refletindo a recorrência dos conflitos entre expansão urbana e circulação rodoviária.

A implantação de um contorno, contudo, também pode estimular novas ocupações em suas margens e reproduzir, no longo prazo, o problema que procurava solucionar. Sua análise deve, portanto, estar articulada ao planejamento municipal, ao controle de acessos e às regras de uso e ocupação do solo. Também deve considerar os efeitos sobre atividades econômicas localizadas no traçado antigo, a acessibilidade aos núcleos urbanos e a necessidade de conexões adequadas entre a nova via e a rede local.

Rotas alternativas e resiliência do sistema rodoviário

A concentração de fluxos em poucos corredores torna o sistema mais vulnerável a acidentes, obras, eventos climáticos extremos, interrupções operacionais e picos sazonais de demanda. Novas rotas podem ampliar a redundância da rede e oferecer alternativas para a circulação entre regiões, reduzindo a dependência de segmentos críticos. Esse papel é particularmente relevante em acessos metropolitanos, ligações entre o planalto e o litoral, corredores associados ao transporte de cargas e trechos submetidos a condicionantes topográficas ou ambientais.

A contribuição de uma rota alternativa depende, porém, de sua capacidade de atrair parte relevante dos fluxos e de oferecer desempenho compatível com os trajetos existentes. Uma nova ligação com baixa demanda, conexões inadequadas ou custos elevados de implantação e operação pode gerar benefícios insuficientes em relação aos impactos produzidos. Também devem ser consideradas possíveis transferências de tráfego para rodovias locais, áreas ambientalmente sensíveis ou municípios que atualmente não recebem fluxos intensos de passagem.

Relação entre infraestrutura e desenvolvimento territorial

Novas rodovias podem ampliar a acessibilidade a mercados, reduzir custos logísticos e favorecer a integração entre áreas produtivas e centros de consumo. Esses efeitos podem contribuir para o desenvolvimento regional, especialmente quando a infraestrutura elimina uma descontinuidade relevante ou melhora o acesso de determinada região a corredores de maior capacidade. A implantação de novas ligações também pode modificar a atratividade relativa dos municípios e influenciar decisões de localização de empreendimentos industriais, logísticos, comerciais e imobiliários.

Esses efeitos não são automáticos nem necessariamente distribuídos de maneira equilibrada. Os benefícios dependem da existência de atividades econômicas, serviços, mão de obra, infraestrutura complementar e políticas territoriais capazes de aproveitar a melhoria da acessibilidade. Ao mesmo tempo, novos eixos podem induzir ocupação dispersa, valorização imobiliária, pressão sobre áreas rurais e protegidas e deslocamento de atividades anteriormente concentradas em outros corredores.

Por esse motivo, o Programa de Novas Rodovias deve ser compreendido como uma política de reorganização da rede e do território, e não apenas como uma relação de obras viárias. A seleção das intervenções deverá considerar sua função no sistema estadual, os fluxos que poderão ser atendidos, a integração com outras infraestruturas e os efeitos econômicos, urbanos, ambientais e sociais associados à abertura de novos traçados.

Diversidade e maturidade da carteira de projetos

Os contatos setoriais, os estudos já desenvolvidos e os instrumentos de planejamento do Estado resultaram em uma carteira extensa e heterogênea. Ela reúne desde propostas conceituais, ainda dependentes da definição do traçado e da demonstração de demanda, até projetos com localização, extensão e conexões preliminarmente estabelecidas. Também coexistem intervenções de alcance local, como determinados contornos urbanos, e ligações de caráter regional capazes de alterar de forma mais abrangente a distribuição dos fluxos rodoviários.

Essa diversidade exige distinguir os projetos ainda sujeitos à avaliação de mérito daqueles já comprometidos por contratos, concessões ou decisões governamentais. As obras comprometidas integram a configuração futura de referência da rede, enquanto as demais alternativas deverão ter seus efeitos comparados antes de sua eventual priorização. Também será necessário identificar projetos parcialmente coincidentes, complementares ou concorrentes, evitando que intervenções sobre o mesmo corredor sejam avaliadas como benefícios independentes.

O problema de planejamento consiste, portanto, em verificar quais novas ligações respondem a necessidades efetivas de conectividade, mobilidade, logística, segurança ou resiliência e quais apresentam benefícios suficientes para justificar seus custos e impactos. A extensão da carteira torna inadequada uma decisão baseada apenas na demanda institucional ou na descrição isolada de cada proposta. Os projetos precisam ser organizados por função, grau de maturidade e relação com a rede existente, criando uma base coerente para a análise comparativa de seus efeitos nos cenários futuros do PLI-SP 2050.

b) Análise

Organização funcional da carteira de projetos

A carteira de novas rodovias reúne intervenções com funções, escalas e níveis de maturidade distintos. A avaliação não deve tratar todos os projetos como soluções equivalentes nem utilizar apenas a extensão implantada ou o volume de tráfego previsto como critérios de comparação. Uma nova ligação regional, um prolongamento destinado a conectar dois corredores, um contorno urbano e uma rota alternativa respondem a problemas diferentes e produzem efeitos distintos sobre a rede e o território.

Os projetos podem ser organizados em quatro grupos funcionais principais:

- novas ligações destinadas a criar conexões inexistentes entre regiões ou corredores estruturantes;
- prolongamentos de rodovias voltados ao fechamento de descontinuidades da rede;
- contornos destinados a desviar o tráfego de passagem de áreas urbanizadas;
- rotas alternativas destinadas a aumentar a redundância e a resiliência do sistema.

Essa classificação deve ser complementada pela identificação do problema específico que cada intervenção pretende resolver. A existência de uma proposta de traçado não demonstra, por si só, a necessidade de implantação. Cada projeto deverá estar relacionado a uma deficiência verificável, como percursos excessivamente longos, travessias urbanas críticas, baixa conectividade regional, saturação de corredores existentes, ausência de alternativas em segmentos vulneráveis ou dificuldade de acesso a polos produtivos e logísticos.

Separação entre projetos comprometidos e alternativas para avaliação

A carteira contém intervenções em diferentes estágios de desenvolvimento. Algumas já estão contratadas, integradas a concessões ou incorporadas a decisões governamentais. Outras permanecem em estudo ou em nível conceitual. Essa distinção é necessária para evitar que obras já comprometidas sejam novamente avaliadas como alternativas de investimento.

As intervenções comprometidas deverão integrar a rede futura considerada como referência, conforme o tratamento realizado no Produto D-10. Sua presença altera as condições de tráfego nas quais as propostas ainda não comprometidas serão avaliadas. Assim, o benefício de uma nova rodovia não deverá ser estimado em relação à rede atual, mas em relação à rede futura já acrescida das obras contratadas ou com implantação prevista.

Os projetos ainda não comprometidos constituem as alternativas a serem testadas. A separação entre essas categorias evita a superestimação dos benefícios e permite verificar se uma proposta permanece necessária após a entrada em operação das intervenções já programadas. Também reduz o risco de avaliar simultaneamente projetos concorrentes como se todos pudessem produzir, de forma independente, o mesmo desvio de tráfego.

Avaliação da função de cada nova ligação

Para cada proposta, a primeira etapa consiste em definir sua função principal na rede. Essa função deverá indicar quais origens e destinos serão conectados, quais corredores existentes poderão ter seus fluxos redistribuídos, que tipo de tráfego será atendido e qual problema operacional ou territorial será enfrentado.

Uma ligação destinada ao transporte de cargas deve ser analisada em relação aos polos produtivos, terminais logísticos, ferrovias, portos e centros consumidores conectados. Uma ligação de caráter predominantemente metropolitano deve considerar os deslocamentos cotidianos, a distribuição espacial da população e dos empregos e a integração com a rede urbana. Projetos localizados em áreas turísticas devem incorporar a sazonalidade e as variações de demanda nos períodos de maior movimento.

Algumas propostas podem exercer simultaneamente funções logísticas, regionais e urbanas. Nesses casos, a análise deverá identificar os diferentes grupos beneficiados e os períodos em que cada tipo de demanda predomina. Essa decomposição é importante porque médias anuais podem ocultar congestionamentos sazonais, picos horários ou fluxos direcionais que justificam determinada intervenção.

Também deverá ser verificada a compatibilidade entre o objetivo declarado e a configuração proposta. Um traçado apresentado como alternativa a um corredor saturado somente cumprirá essa função se oferecer conexões, distância, tempo de viagem e condições operacionais capazes de atrair parte relevante do tráfego. Da mesma forma, uma ligação destinada a apoiar o desenvolvimento regional deverá proporcionar acesso efetivo aos municípios e às áreas produtivas, sem funcionar apenas como corredor de passagem.

Análise dos prolongamentos rodoviários

Os prolongamentos de rodovias podem produzir ganhos importantes quando eliminam descontinuidades e conectam eixos que atualmente exigem desvios. Entre os efeitos potenciais estão a redução de distâncias, a redistribuição de fluxos, o aumento da área de influência dos corredores e a criação de novas alternativas para viagens regionais.

A avaliação deverá considerar, entretanto, se a conexão proposta representa a solução mais eficiente para o problema identificado. Em alguns casos, melhorias pontuais na rede existente podem produzir parte dos benefícios esperados com menor custo e menor impacto. Em outros, a nova ligação pode transferir o gargalo para interseções ou trechos adjacentes que não possuem capacidade suficiente para receber o tráfego adicional.

Por esse motivo, o prolongamento não deve ser analisado apenas em seu segmento novo. Devem ser avaliados seus pontos de conexão, os acessos intermediários, as rodovias que receberão os fluxos desviados e os possíveis efeitos sobre os municípios atravessados. A capacidade e as condições operacionais da infraestrutura situada antes e depois do novo trecho podem limitar o desempenho do projeto.

Análise dos contornos urbanos

Os contornos urbanos exigem uma análise específica da composição e da distribuição do tráfego. Deve-se distinguir o fluxo de passagem, que poderá ser transferido para o novo traçado, do tráfego que possui origem ou destino na própria área urbana e continuará utilizando a via existente. Quando a maior parte das viagens está relacionada às atividades locais, o contorno pode desviar apenas uma parcela limitada do movimento e não eliminar os congestionamentos observados.

A atratividade do novo percurso dependerá da diferença de distância e tempo em relação à travessia urbana, da localização dos acessos, das condições de operação e da eventual cobrança de pedágio. Se o contorno aumentar significativamente o percurso ou o custo da viagem, parte dos veículos poderá permanecer no traçado antigo. Em especial, deve-se evitar que o novo segmento seja concebido sem mecanismos capazes de orientar o tráfego pesado para a rota externa.

A análise deverá mensurar os efeitos tanto no contorno quanto na via urbana que será aliviada. Entre os resultados relevantes estão a redução do volume de veículos pesados na área urbana, a diminuição dos conflitos em interseções e acessos, a variação dos tempos de viagem e a melhoria das condições para pedestres, ciclistas e transporte coletivo. Também devem ser considerados os efeitos sobre estabelecimentos dependentes do tráfego de passagem e as oportunidades de requalificação do trecho que perderá sua função rodoviária predominante.

Os benefícios de longo prazo dependem ainda da gestão territorial. A abertura de acessos e a ocupação desordenada das margens podem transformar gradualmente o contorno em uma nova

avenida urbana. A eventual implantação deverá ser acompanhada por coordenação com os municípios, controle de acessos e compatibilização com os planos diretores e as regras de parcelamento e uso do solo.

Análise das rotas alternativas e da resiliência

As rotas alternativas podem reduzir a dependência de corredores críticos e ampliar as opções de circulação durante interrupções. Seu valor não se limita, portanto, ao desempenho em condições normais. A avaliação deverá considerar também situações de acidentes, obras, deslizamentos, inundações, interdições e picos excepcionais de demanda.

A análise em condições usuais deverá verificar o volume de tráfego atraído, a redução de tempo e distância e o alívio produzido nos corredores existentes. Para avaliar a resiliência, poderão ser simuladas situações de redução de capacidade ou indisponibilidade temporária de segmentos estratégicos. A comparação permitirá identificar se a nova rota oferece uma alternativa operacional efetiva ou apenas acrescenta infraestrutura com baixa utilização.

Esse exame é especialmente importante em ligações submetidas a condicionantes topográficas e ambientais, em acessos ao litoral e em corredores que concentram fluxos metropolitanos, turísticos e de cargas. Nesses casos, o benefício de redundância deve ser explicitado, mas não confundido com os ganhos obtidos no funcionamento cotidiano da rede.

Efeitos sobre o tráfego e o desempenho da rede

A implantação de uma nova rodovia modifica as escolhas de rota e pode alterar os volumes em uma área muito mais ampla do que o seu entorno imediato. Os resultados deverão ser avaliados para o segmento implantado, para as vias aliviadas e para os corredores que passarão a receber tráfego adicional.

Entre os principais indicadores a serem considerados estão:

- volume de tráfego atraído para o novo segmento;
- composição do fluxo entre veículos leves e pesados;
- redução de tráfego nos corredores e nas travessias urbanas existentes;
- variação dos tempos e das distâncias de viagem;
- alteração dos veículos-quilômetro e veículos-hora percorridos;
- mudanças na relação volume-capacidade e nos níveis de saturação;
- efeitos sobre a confiabilidade dos deslocamentos;
- variação dos custos operacionais e logísticos;
- redistribuição dos fluxos entre rotas concorrentes.

A redução de tempo em um corredor isolado não é suficiente para caracterizar benefício sistêmico. Um projeto pode melhorar determinado trecho e, ao mesmo tempo, aumentar percursos totais, transferir congestionamentos ou criar novas pressões em acessos e interseções. A análise deverá considerar o saldo dos efeitos produzidos no conjunto da rede.

Também deverá ser examinada a possibilidade de tráfego induzido. A melhoria da acessibilidade pode alterar destinos, horários, localização de atividades e frequência das viagens. Embora parte desses efeitos represente benefício econômico, o aumento da circulação pode reduzir, ao longo do tempo, os ganhos iniciais de fluidez e ampliar os impactos ambientais e territoriais.

Relação com a logística e a integração modal

As novas ligações com função logística deverão ser avaliadas em articulação com os demais componentes do sistema de transportes. A proximidade de um porto, terminal ferroviário ou instalação logística não assegura integração efetiva. É necessário verificar se o traçado oferece acesso compatível com veículos pesados, se os pontos de conexão possuem capacidade adequada e se os horários e condições de operação atendem aos fluxos esperados.

A análise também deverá identificar situações em que a nova rodovia possa reforçar a dependência do transporte rodoviário em fluxos potencialmente atendidos por ferrovia ou hidrovia. O ganho rodoviário deve ser examinado no contexto da estratégia multimodal do PLI-SP 2050, evitando que a solução de um gargalo local produza incentivos contrários à distribuição modal pretendida.

Por outro lado, novas ligações podem desempenhar função complementar ao facilitar o acesso de curta distância a terminais intermodais. Nesses casos, os benefícios devem incluir a melhoria da conectividade de primeira ou última etapa e os efeitos sobre a utilização das infraestruturas ferroviárias, hidroviárias ou portuárias associadas.

Efeitos territoriais e desenvolvimento regional

A melhoria da acessibilidade constitui condição importante, mas não suficiente, para induzir desenvolvimento. A análise deverá identificar quais atividades econômicas podem efetivamente se beneficiar, quais mercados se tornam mais acessíveis e se existem terrenos, mão de obra, serviços públicos e infraestrutura complementar capazes de sustentar novas atividades.

Deve-se evitar atribuir automaticamente a cada nova rodovia efeitos positivos sobre emprego, renda ou desconcentração produtiva. Alguns projetos podem apenas redistribuir atividades entre municípios ou reforçar polos já consolidados. Outros podem facilitar o escoamento da produção sem produzir encadeamentos econômicos relevantes nas áreas atravessadas.

A avaliação territorial deve considerar a variação da acessibilidade a empregos, mercados, equipamentos e serviços, bem como os efeitos potenciais sobre o uso do solo. A abertura de novos eixos pode estimular expansão urbana dispersa, ocupação de áreas rurais e valorização imobiliária. Nos contornos, esse processo pode comprometer a função de desvio; nos prolongamentos e novas ligações, pode aumentar a demanda por acessos e reduzir gradualmente o desempenho operacional.

A eventual expectativa de desenvolvimento deverá ser acompanhada de medidas de planejamento territorial, controle de acessos e articulação municipal. Sem essas condições, o projeto rodoviário pode induzir ocupação desordenada e elevar os custos futuros de provisão de infraestrutura e serviços públicos.

Condicionantes ambientais, sociais e de implantação

As novas rodovias tendem a apresentar impactos ambientais e territoriais mais expressivos do que intervenções realizadas dentro da faixa de domínio existente. Os traçados podem afetar vegetação nativa, recursos hídricos, mananciais, unidades de conservação, áreas agrícolas, territórios tradicionais e regiões sujeitas a enchentes, escorregamentos ou outros riscos naturais.

Essas condicionantes devem ser consideradas desde a avaliação estratégica, antes da definição de um traçado definitivo. O objetivo não é substituir o licenciamento ambiental, mas identificar propostas com restrições capazes de alterar substancialmente os custos, os prazos ou a própria viabilidade da implantação. Projetos que atravessam áreas sensíveis podem exigir túneis, viadutos, dispositivos de drenagem, passagens de fauna, desapropriações extensas ou alterações relevantes de traçado.

Também deverão ser examinados os efeitos sobre comunidades e propriedades interceptadas, a fragmentação do território, a alteração de acessos locais e a necessidade de reassentamentos. A comparação entre alternativas deve considerar não somente o investimento inicial, mas também os custos de mitigação, compensação, conservação e operação ao longo da vida útil da infraestrutura.

Comparação entre projetos e alternativas

A extensão e a diversidade da carteira tornam necessária uma avaliação em etapas. Inicialmente, os projetos deverão passar por uma verificação de consistência, destinada a confirmar o problema enfrentado, a função do novo segmento, os pontos de conexão, a extensão aproximada, o estágio de desenvolvimento e a relação com outras intervenções.

Na sequência, as propostas deverão ser examinadas quanto à possibilidade de sobreposição. Um mesmo corredor pode conter uma duplicação, um prolongamento, um contorno e uma rota alternativa com objetivos parcialmente coincidentes. Simular todas as intervenções de forma acumulada, sem testar suas relações, pode gerar dupla contagem de benefícios e produzir uma configuração de rede pouco realista.

Os projetos poderão ser avaliados individualmente e em combinações coerentes. A análise individual permite identificar sua contribuição marginal. Os agrupamentos, por sua vez, permitem verificar complementaridades, dependências e efeitos acumulados. Projetos concorrentes deverão ser comparados em cenários separados, enquanto intervenções complementares poderão ser reunidas quando sua funcionalidade depender da implantação conjunta.

A comparação deverá reunir indicadores de desempenho da rede e critérios não capturados diretamente pela modelagem. Além dos fluxos, tempos de viagem, saturação e custos operacionais, deverão ser considerados segurança viária, acessibilidade regional, integração modal, resiliência, impactos urbanos e ambientais, necessidade de desapropriações, complexidade de implantação, maturidade dos estudos e ordem de grandeza dos investimentos.

Tratamento da incerteza

Parte dos projetos possui apenas traçados conceituais ou descrições preliminares. Nessas situações, os resultados das simulações devem ser interpretados como indicação do potencial da ligação, e não como estimativa definitiva de seus benefícios. A representação na rede deverá explicitar as hipóteses adotadas para velocidade, capacidade, extensão, conexões e eventual cobrança de tarifa.

Quando houver incerteza relevante, poderão ser testadas variações desses parâmetros. A comparação entre alternativas de traçado ou padrões operacionais permitirá verificar se os benefícios permanecem consistentes diante de diferentes hipóteses. Projetos cujos resultados dependam de condições muito específicas deverão ser identificados como sensíveis e submetidos a aprofundamento antes de eventual priorização.

A demanda futura também constitui fonte de incerteza. Mudanças demográficas, produtivas, tecnológicas e logísticas podem alterar a utilização das novas ligações. A avaliação em diferentes horizontes deverá permitir distinguir projetos necessários para atender problemas mais imediatos daqueles cuja justificativa depende de transformações territoriais ainda incertas.

Síntese da abordagem de avaliação

A análise do Programa de Novas Rodovias deverá identificar quais intervenções efetivamente melhoram a conectividade, reduzem conflitos urbanos, aumentam a resiliência ou corrigem descontinuidades relevantes da rede. A avaliação não deverá partir da premissa de que toda nova ligação representa ganho sistêmico. Os benefícios dependerão da demanda atraída, das conexões estabelecidas, dos efeitos sobre os demais corredores e da compatibilidade do projeto com as condições territoriais e ambientais.

As propostas ainda não comprometidas e com potencial de alterar a configuração da rede deverão ser encaminhadas à simulação no Produto D-12. Os resultados permitirão comparar os projetos com a rede futura já acrescida das obras comprometidas, mensurar seus efeitos marginais e identificar alternativas concorrentes ou complementares. Essa avaliação fornecerá uma base comum para a posterior hierarquização dos investimentos, sem substituir os estudos

de viabilidade, os projetos de engenharia, o licenciamento ambiental e a análise econômico-financeira necessários às etapas subsequentes.

c) Encaminhamento

As intervenções ainda não comprometidas que acrescentam novos segmentos ou modificam a configuração da malha rodoviária serão encaminhadas para simulação em rede no Produto D-12. A modelagem deverá estimar a capacidade de cada projeto de atrair e redistribuir fluxos, reduzir tempos e distâncias de viagem, aliviar travessias urbanas, melhorar a conectividade regional e ampliar a resiliência do sistema.

As obras já contratadas ou incorporadas à programação governamental não serão tratadas como alternativas novas. Elas deverão compor a rede futura de referência, conforme o tratamento dado às obras comprometidas no Produto D-10. Antes da simulação, a carteira deverá ser conferida para eliminar duplicidades entre os projetos originados dos contatos setoriais e aqueles incorporados a partir do Plano de Governo.

Serão encaminhados ao Produto D-12 os seguintes projetos:

Prolongamentos de rodovias

- Prolongamento entre Embu das Artes e Cotia, com extensão aproximada de 15,7 km — R906;
- prolongamento da SP-340 entre Paulínia e Jaguariúna, com extensão aproximada de 14,4 km — R907;
- prolongamento da SP-354 até Itapevi, com extensão aproximada de 26,9 km — R908;
- prolongamento da Rodovia Castello Branco em direção a Marília, com extensão aproximada de 69,9 km — R909;
- prolongamento da Rodovia José Roberto Magalhães Teixeira até Jaguariúna, com extensão aproximada de 19,5 km — R910;
- prolongamento da Rodovia Carvalho Pinto até Cachoeira Paulista, com extensão aproximada de 42,7 km — R911;
- extensão da SP-070, Rodovia Carvalho Pinto, até Roseira;
- prolongamento da SP-304 até a SP-340.

Novos traçados e ligações regionais

- ligação entre Eldorado e Capão Bonito, como alternativa à SP-139;
- novo traçado da SP-310;
- novo traçado da SP-304.

Contornos urbanos e ligações destinadas ao desvio do tráfego de passagem

- Contorno de Piracicaba Sul, com extensão aproximada de 18,7 km — R930;
- Contorno de Santo Antônio de Posse, com extensão aproximada de 6,1 km — R931;
- Contorno de Pompéia, com extensão aproximada de 17,8 km — R932;
- Contorno de Itapetininga, com extensão aproximada de 12,5 km — R933;
- Contorno de Bragança Paulista, com extensão aproximada de 9,1 km — R934;
- Contorno de Mogi das Cruzes;
- Contorno de Piedade;
- Contorno de Sorocaba;
- Contorno de Presidente Prudente;
- contornos previstos para a região do Circuito das Águas.

Rotas alternativas e intervenções voltadas à redundância da rede

- túnel rodoviário entre Santos e São Vicente, com extensão aproximada de 10,6 km — R943;

- Linha Verde rodoviária, com extensão aproximada de 41,4 km — R945.

A relação deverá ser consolidada antes da preparação da rede de simulação. Os resultados da modelagem deverão ser complementados pela caracterização territorial e ambiental das áreas de influência. Essa avaliação deverá considerar conflitos urbanos, indução de ocupação, áreas protegidas, mananciais, riscos climáticos, necessidade de desapropriações e integração com os instrumentos municipais de planejamento. Tais elementos não são plenamente representados pelo modelo de transportes, mas podem alterar os custos, os prazos e a viabilidade das alternativas.

O Produto D-11 registra o problema, delimita a carteira e define o encaminhamento das propostas. O Produto D-12 deverá simular os projetos e suas combinações, mensurar os efeitos sobre a rede e fornecer os resultados necessários à comparação e à posterior hierarquização das intervenções. A simulação não substituirá os estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental nem a definição dos traçados de engenharia, mas permitirá identificar quais propostas apresentam contribuição mais relevante para o funcionamento futuro do sistema rodoviário paulista.

7.2 Programa de ampliação e modernização da capacidade rodoviária

a) Contextualização

A rede rodoviária paulista concentra parcela expressiva dos deslocamentos de passageiros e do transporte de cargas do Estado, conectando regiões metropolitanas, polos industriais e agroindustriais, centros de distribuição, áreas turísticas, terminais intermodais, aeroportos e portos. A intensidade e a diversidade desses fluxos fazem com que determinados corredores desempenhem simultaneamente funções locais, regionais e de longa distância.

O crescimento da circulação, a expansão das áreas urbanizadas e a transformação da estrutura produtiva aumentaram a pressão sobre rodovias que, em muitos casos, foram projetadas para volumes e padrões de tráfego diferentes dos atuais. Em trechos mais demandados, essa pressão se manifesta pela aproximação ou superação da capacidade operacional, pela redução das velocidades, pela formação recorrente de congestionamentos e pela perda de confiabilidade dos tempos de viagem.

Os problemas não se distribuem de maneira uniforme ao longo da rede. Alguns corredores apresentam restrições contínuas de capacidade, enquanto outros concentram gargalos em segmentos curtos, interseções, acessos, pontes, viadutos ou aproximações de áreas urbanas. Também existem situações em que a capacidade da pista principal é suficiente, mas o desempenho do corredor é comprometido por entradas e saídas inadequadas, entrelaçamentos, conversões, acessos lindeiros ou dispositivos incompatíveis com os fluxos atuais.

Escopo do Programa de Ampliação e Modernização

O Programa de Ampliação e Modernização da Capacidade Rodoviária reúne intervenções realizadas predominantemente sobre a infraestrutura existente. Seu objetivo é aumentar a capacidade, melhorar o desempenho operacional, eliminar gargalos localizados e adaptar os elementos físicos da malha às características contemporâneas do tráfego.

O Programa compreende:

- duplicações de rodovias;
- implantação de terceiras faixas e faixas adicionais;
- implantação ou ampliação de vias marginais;
- modernização de alças e dispositivos de acesso;
- reconfiguração de interseções;

- construção ou adequação de viadutos e passagens em desnível;
- ampliação de faixas de aproximação e áreas de entrelaçamento;
- adequação geométrica de curvas, acessos e retornos;
- reforço ou ampliação de obras de arte especiais;
- demais intervenções capazes de modificar a capacidade ou o desempenho operacional dos corredores existentes.

Essa delimitação diferencia o Programa daquele voltado à implantação de novas rodovias. Novos traçados, prolongamentos, contornos e rotas que acrescentam ligações à malha são tratados no Programa de Novas Rodovias. A presente seção concentra-se nas intervenções que ampliam ou reorganizam a oferta em corredores já existentes, ainda que determinadas obras, como marginais, alças ou viadutos, acrescentem segmentos complementares à representação da rede.

Mudanças no perfil do tráfego e inadequação da infraestrutura

Parte da infraestrutura rodoviária estadual foi concebida quando os veículos comerciais possuíam dimensões, capacidades e configurações diferentes das atuais. A disseminação de combinações veiculares mais longas e pesadas ampliou as exigências sobre raios de curva, rampas, acostamentos, faixas de aceleração e desaceleração, áreas de entrelaçamento, pavimentos, pontes, viadutos e dispositivos de acesso.

Em locais com geometria inadequada, veículos de grande porte podem precisar ocupar mais de uma faixa para realizar manobras, reduzir intensamente a velocidade ou interferir no fluxo da pista principal. Essas situações diminuem a capacidade efetiva da rodovia, elevam a variabilidade dos tempos de viagem e aumentam os conflitos com veículos leves. O problema tende a ser mais intenso nos corredores com elevada participação de caminhões e nos acessos a instalações industriais, terminais logísticos e áreas portuárias.

A modernização da infraestrutura não deve, portanto, ser entendida apenas como conservação ou recuperação física. Trata-se de adequar a configuração operacional da rodovia à demanda contemporânea, corrigindo elementos que limitam a circulação mesmo quando o pavimento e as demais estruturas se encontram em condições regulares de uso.

Gargalos localizados e efeito sobre o corredor

O desempenho de uma rodovia pode ser condicionado por um número limitado de pontos críticos. Interseções em nível, acessos com faixas de aproximação insuficientes, pontes estreitas, viadutos com capacidade incompatível, trechos sem possibilidade segura de ultrapassagem e segmentos urbanos com grande quantidade de entradas laterais podem reduzir o desempenho de um corredor muito além de sua extensão física.

Nessas condições, a modernização de um dispositivo ou de uma obra de arte especial pode produzir ganhos relevantes sem exigir a duplicação integral da rodovia. A implantação de faixas adicionais em aclives, a ampliação de aproximações, a reorganização de alças e a construção de interseções em desnível podem reduzir interferências e recuperar parte da capacidade perdida.

Por outro lado, intervenções pontuais executadas sem uma leitura do corredor podem apenas transferir o congestionamento para o segmento seguinte. A ampliação de uma pista, ponte ou viaduto precisa ser compatível com a capacidade dos trechos adjacentes, das interseções e dos acessos. Por essa razão, o Programa deve considerar tanto obras lineares quanto intervenções localizadas, avaliando seus efeitos sobre o funcionamento do sistema rodoviário como um todo.

Sobreposição entre tráfego urbano e rodoviário

Em diversos municípios, a expansão urbana alcançou rodovias originalmente implantadas fora dos núcleos ocupados. Esses trechos passaram a funcionar simultaneamente como corredores regionais e como componentes do sistema viário municipal. O tráfego de longa distância passou

a compartilhar a infraestrutura com viagens locais, linhas de transporte coletivo, motociclistas, pedestres e veículos que acessam diretamente estabelecimentos e bairros lindeiros.

Essa sobreposição reduz a capacidade operacional, amplia os movimentos de entrada, saída e travessia e aumenta os conflitos entre usuários com velocidades e padrões de deslocamento distintos. Nos horários de maior demanda, o congestionamento urbano pode comprometer a continuidade de corredores logísticos regionais. Ao mesmo tempo, a circulação intensa de veículos pesados afeta a mobilidade e a segurança das áreas urbanizadas.

A implantação de vias marginais, dispositivos em desnível, alças, faixas de aproximação e acessos controlados pode contribuir para separar os fluxos locais do tráfego de passagem. Essas intervenções também podem melhorar a ligação entre a rodovia e o sistema viário municipal, desde que sejam planejadas em conjunto com os municípios e compatibilizadas com os planos diretores, a ocupação das margens e a localização dos polos geradores de tráfego.

Os efeitos sobre a segurança constituem parte relevante dessa adequação, mas não esgotam o objeto do Programa. As políticas específicas de redução de acidentes com usuários vulneráveis e de mitigação de riscos associados a cargas perigosas são tratadas em seções próprias. Nesta seção, a segurança é considerada em sua relação com a geometria, a capacidade, a segregação e o desempenho operacional da infraestrutura.

Diversidade territorial das necessidades de ampliação

A carteira de intervenções abrange contextos territoriais distintos. Nas regiões metropolitanas e nos principais polos industriais, a pressão decorre da combinação entre deslocamentos cotidianos, tráfego intermunicipal e transporte de cargas. No interior, os problemas podem estar relacionados ao crescimento do agronegócio, à concentração de caminhões em corredores de escoamento e à necessidade de conectar áreas produtivas a terminais e mercados.

No litoral, a demanda combina fluxos portuários, mobilidade regional e movimentos turísticos sujeitos a fortes variações sazonais. Em corredores que atravessam áreas urbanizadas, a necessidade de ampliação frequentemente se associa à segregação entre tráfego local e de passagem. Em rodovias de pista simples, faixas adicionais e duplicações podem responder a limitações de ultrapassagem, diferenças de velocidade e crescimento persistente dos volumes.

Essa diversidade impede a adoção de uma solução única para toda a malha. A duplicação integral pode ser adequada em corredores com volumes elevados e saturação contínua, enquanto faixas adicionais podem atender segmentos nos quais a restrição se concentra em aclives ou pontos específicos. Vias marginais podem ser mais apropriadas para trechos urbanizados, e a modernização de dispositivos pode solucionar gargalos de conexão sem ampliar toda a rodovia.

Relação com as concessões e a administração direta

Uma parcela relevante das obras de ampliação e modernização está inserida em contratos de concessão, em lotes recentemente estruturados ou em programas de investimento das concessionárias. Outra parcela se localiza em rodovias sob administração direta do Estado. A carteira reúne, portanto, projetos com diferentes responsáveis, fontes de financiamento, estágios de maturidade e condições de implementação.

Nas concessões, as intervenções podem estar previstas nos contratos originais, em revisões contratuais ou em novos compromissos de investimento. Em outros casos, a inclusão de uma obra pode demandar avaliação de sua compatibilidade com o contrato e de possíveis repercussões tarifárias ou sobre o equilíbrio econômico-financeiro. Nas rodovias administradas diretamente, a implantação depende da programação orçamentária, do desenvolvimento dos projetos, do licenciamento e da disponibilidade de recursos.

Essa diversidade institucional deve ser considerada na organização da carteira, mas não substitui a avaliação da função de cada intervenção. O fato de uma obra estar associada a determinado corredor concedido ou programa de governo não demonstra, isoladamente, seu benefício marginal. É necessário distinguir as intervenções já comprometidas daquelas que permanecem como alternativas para o planejamento de longo prazo.

Carteira extensa e necessidade de avaliação integrada

Os contatos setoriais, os programas rodoviários e a carteira de obras do Estado resultaram em um conjunto amplo de propostas. Entre elas encontram-se programas de duplicação e de implantação de terceiras faixas, intervenções em vias marginais, adequações de alças e dispositivos, novas passagens em desnível, ampliações de pontes e viadutos e faixas de aproximação em diferentes regiões.

Parte dessas obras já está contratada ou possui execução prevista e, portanto, integra a configuração futura de referência da rede. Outra parte permanece em estudo, em contratação ou em estágio conceitual e deverá ser avaliada como alternativa. Há ainda intervenções que podem se sobrepor territorialmente ou atuar sobre o mesmo gargalo, exigindo compatibilização antes da avaliação.

A extensão da carteira reforça a necessidade de organizar as propostas por corredor, função, estágio de maturidade e natureza da intervenção. Uma duplicação, uma faixa adicional, uma marginal e a modernização de um dispositivo em uma mesma rodovia podem ser complementares, concorrentes ou representar diferentes níveis de solução para o mesmo problema. Sem essa consolidação, existe risco de dupla contagem de benefícios ou de combinação de obras incompatíveis.

O problema central consiste, portanto, em identificar quais intervenções sobre a malha existente são necessárias para atender à demanda futura e quais configurações produzem os melhores resultados para o conjunto da rede. Essa avaliação deverá considerar não apenas o aumento nominal da capacidade, mas também a eliminação de gargalos, a confiabilidade dos deslocamentos, a segregação de fluxos, a integração com o território e a compatibilidade entre os diferentes projetos previstos para cada corredor

b) Análise

Organização da carteira por natureza da intervenção

A carteira reúne obras com escalas e funções distintas. Algumas alteram a capacidade de segmentos extensos, como duplicações e implantação de faixas adicionais. Outras atuam sobre gargalos localizados, como alças, interseções, viadutos, pontes e faixas de aproximação. Há ainda intervenções, como vias marginais e dispositivos em desnível, cuja função principal é separar o tráfego local do fluxo regional.

A avaliação deve organizar os projetos nas seguintes categorias funcionais:

- duplicações e ampliações contínuas de capacidade;
- terceiras faixas e faixas adicionais;
- vias marginais e segregação de fluxos;
- modernização de alças, acessos e interseções;
- viadutos, pontes e demais obras de arte especiais;
- faixas de aceleração, desaceleração, aproximação e entrelaçamento;
- adequações geométricas com efeito sobre a capacidade ou a velocidade operacional.

Essa organização é necessária porque o benefício esperado e a forma de representação no modelo variam conforme o tipo de intervenção. Uma duplicação pode alterar diretamente a capacidade, a velocidade e o nível de serviço de um trecho. A modernização de um dispositivo

pode reduzir atrasos e conflitos em um ponto específico. Uma via marginal pode modificar a distribuição entre tráfego local e de passagem. Os projetos não devem ser avaliados por uma metodologia única sem considerar essas diferenças.

Definição do problema que fundamenta cada projeto

Antes da simulação, cada intervenção deverá estar associada a um problema operacional verificável. Entre os principais problemas estão a saturação recorrente, a baixa velocidade em períodos críticos, a insuficiência de oportunidades de ultrapassagem, a interferência de acessos laterais, os entrelaçamentos, a mistura entre tráfego urbano e rodoviário e a inadequação de dispositivos ao volume e ao tipo de veículo em circulação.

A existência de um projeto ou sua inclusão em uma carteira institucional não demonstra, por si só, a necessidade de implantação. A análise deverá verificar se o tipo e a dimensão da intervenção são compatíveis com a restrição observada. Uma duplicação integral pode ser excessiva quando o problema se concentra em poucos segmentos. Da mesma forma, uma faixa adicional localizada pode ser insuficiente quando o corredor apresenta saturação contínua em extensão significativa.

Para cada projeto, deverão ser identificados o trecho atendido, o período em que ocorre a restrição, a composição do tráfego, os pontos de conexão, os segmentos adjacentes e a capacidade atualmente disponível. Essa caracterização permitirá distinguir limitações estruturais de capacidade de problemas associados à operação, à geometria ou à organização dos acessos.

Separação entre obras comprometidas e alternativas

As obras contratadas, em execução ou incorporadas aos compromissos governamentais deverão integrar a rede futura de referência, conforme o tratamento realizado no Produto D-10. As intervenções ainda em estudo ou sem compromisso formal de implantação constituirão as alternativas a serem avaliadas no Produto D-12.

Essa separação é particularmente importante porque diversos corredores possuem uma sequência de investimentos previstos em concessões. A avaliação de uma nova duplicação, faixa adicional ou marginal deve considerar a capacidade que já estará disponível após a conclusão das obras comprometidas. Caso contrário, os benefícios poderão ser estimados em relação a uma situação de oferta que não corresponde ao horizonte futuro do Plano.

A classificação deverá ser atualizada antes da simulação. Projetos inicialmente registrados como alternativas podem ter avançado para contratação ou execução, enquanto outros podem ter sofrido alterações de escopo. A rede de referência e os cenários alternativos devem refletir a situação consolidada da carteira no momento da modelagem.

Análise das duplicações

A duplicação amplia de forma significativa a capacidade nominal e pode melhorar a separação entre sentidos de circulação, as oportunidades de ultrapassagem e a regularidade das viagens. Seus benefícios tendem a ser maiores em corredores com volumes elevados, forte participação de veículos pesados, saturação persistente e diferenças relevantes de velocidade entre os veículos.

O aumento de capacidade pode transferir filas e congestionamentos para segmentos posteriores, acessos urbanos, pontes ou interseções que permaneçam com configuração inferior. Uma duplicação não deve ser avaliada como elemento isolado quando sua operação depende da capacidade dos trechos adjacentes.

Em corredores com demanda sazonal, como acessos ao litoral e áreas turísticas, a análise deverá distinguir o desempenho médio das condições observadas nos períodos de pico. Uma obra pode apresentar utilização moderada durante grande parte do ano e, ainda assim, produzir benefícios

relevantes em períodos críticos. Essa característica deverá ser explicitada para evitar que indicadores médios ocultem o problema que motivou a intervenção.

Análise das terceiras faixas e faixas adicionais

As faixas adicionais constituem alternativa intermediária entre a manutenção da pista simples e a duplicação integral. Sua eficácia depende da localização, da extensão, do relevo, da composição do tráfego e das condições de entrada e saída da faixa.

Em trechos com aclives e elevada participação de caminhões, uma faixa adicional pode reduzir a interferência de veículos lentos e recuperar a velocidade do fluxo. Em outros contextos, terceiras faixas contínuas podem ampliar a capacidade de corredores já duplicados. A análise deve diferenciar essas funções, pois os parâmetros operacionais e os resultados esperados são distintos.

Faixas muito curtas, localizadas inadequadamente ou encerradas antes de pontos críticos podem produzir entrelaçamentos e conflitos que reduzem os benefícios. A simulação deverá considerar não somente o acréscimo de capacidade, mas também as condições de transição, a extensão útil e a relação com interseções e acessos próximos.

Nos corredores em que existem propostas tanto de duplicação quanto de faixas adicionais, as alternativas deverão ser comparadas em cenários separados. A implantação simultânea somente deve ser testada quando os projetos atuarem em segmentos diferentes ou apresentarem funções claramente complementares.

Análise das vias marginais

As vias marginais podem separar os deslocamentos locais do tráfego de longa distância, reduzir a interferência de acessos diretos na pista principal e melhorar a articulação com o sistema viário municipal. Seus benefícios são particularmente relevantes em trechos submetidos à urbanização intensa e à multiplicação de polos geradores de viagens.

A implantação de marginais não representa apenas acréscimo de faixas. Ela modifica a distribuição funcional do corredor. A pista expressa passa a concentrar os fluxos regionais, enquanto as marginais organizam acessos, viagens locais e movimentos entre bairros ou atividades lindeiras.

Para que essa configuração seja efetiva, deve haver controle dos pontos de entrada e saída, continuidade suficiente das marginais e integração adequada com as vias municipais. Trechos descontínuos ou com conexões mal posicionadas podem criar novos gargalos nas transições entre as pistas. A análise deverá considerar os fluxos transferidos, a redução dos movimentos na pista principal e o desempenho dos pontos de conexão.

Também deverá ser examinada a possibilidade de as marginais estimularem ocupação adicional e novos acessos ao longo da rodovia. Sem coordenação com os municípios e controle do uso do solo, o aumento inicial de capacidade pode ser gradualmente consumido pela expansão urbana e pela geração de novas viagens locais.

Análise de alças, dispositivos e interseções

Alças e dispositivos constituem pontos de convergência, divergência e cruzamento de fluxos. Mesmo quando representam uma parcela pequena da extensão da rede, podem determinar a capacidade efetiva de um corredor. Raios de curva insuficientes, faixas de aceleração curtas, movimentos conflitantes e entrelaçamentos podem provocar redução de velocidade, retenções e formação de filas sobre a pista principal.

A modernização desses elementos deverá ser relacionada ao tipo de movimento que provoca o gargalo. A solução pode envolver ampliação de raios, segregação de conversões, novas alças,

aumento das faixas de armazenamento, implantação de faixas de aceleração e desaceleração ou separação em níveis.

O efeito de cada intervenção deverá ser avaliado sobre o conjunto do dispositivo, e não apenas sobre um movimento isolado. A melhoria de uma alça pode aumentar o fluxo recebido por outro ramo e transferir a fila para uma aproximação adjacente. Nos principais entroncamentos, a análise deverá verificar o equilíbrio entre as capacidades de entrada, saída e continuidade.

Algumas adequações possuem alcance predominantemente local e podem não ser representadas de forma direta pelo modelo estratégico. Nesses casos, seus efeitos deverão ser traduzidos em parâmetros compatíveis com a escala da modelagem, como redução do tempo de percurso, aumento da capacidade do segmento, alteração da penalidade de conversão ou melhoria da conexão entre links. Quando nem mesmo essa representação agregada for tecnicamente adequada, o projeto deverá ser identificado como dependente de estudo operacional ou de microssimulação posterior.

Análise de viadutos, pontes e obras de arte especiais

Pontes, viadutos e passagens em desnível podem funcionar como restrições de capacidade quando possuem número de faixas, geometria ou condições operacionais inferiores às dos trechos adjacentes. A ampliação ou substituição dessas estruturas pode eliminar estrangulamentos e permitir o aproveitamento efetivo da capacidade existente no restante do corredor.

A análise deverá verificar se a obra de arte constitui efetivamente o ponto limitante e se sua adequação não apenas transfere a restrição para outro segmento. Também deverão ser consideradas as interrupções e alterações de tráfego durante a construção, especialmente em corredores com poucas rotas alternativas.

No caso das passagens em desnível, os benefícios podem decorrer da eliminação de cruzamentos, da redução das interrupções e da segregação dos movimentos. Esses efeitos deverão ser representados por alterações nos tempos, nas capacidades e nas possibilidades de conversão da rede.

Segurança viária e limitações da modelagem estratégica

A ampliação e a modernização podem reduzir conflitos de circulação, melhorar as condições de ultrapassagem, separar movimentos e adequar a infraestrutura aos veículos pesados. Esses efeitos possuem potencial para melhorar a segurança viária, mas não são estimados integralmente por um modelo estratégico de transportes.

A redução de acidentes deverá ser examinada de forma complementar, considerando o histórico de sinistros, a composição do tráfego, o tipo de conflito, as características geométricas e a exposição dos usuários. A simples ampliação da capacidade não garante redução de acidentes. Em determinadas situações, o aumento da velocidade pode introduzir novos riscos se não for acompanhado de desenho viário, fiscalização e tratamento adequado das áreas urbanizadas.

Do mesmo modo, intervenções voltadas principalmente à correção de uma condição geométrica ou de segurança podem apresentar benefícios relevantes mesmo quando seus efeitos sobre tempos e fluxos forem limitados. A interpretação dos resultados do D-12 deverá reconhecer essa diferença e não utilizar exclusivamente os ganhos de mobilidade como critério de mérito.

A carteira apresenta diferentes intervenções previstas para uma mesma rodovia ou região. Um corredor pode reunir propostas de duplicação, terceira faixa, marginal e modernização de dispositivos, além de obras já comprometidas em contratos de concessão.

Efeitos econômicos, urbanos e ambientais

O aumento da capacidade pode reduzir tempos de viagem, custos operacionais e variabilidade dos deslocamentos, produzindo benefícios para passageiros e transportadores. Nos corredores logísticos, esses ganhos podem melhorar o acesso a polos produtivos, terminais e mercados. Nas áreas urbanizadas, a segregação de fluxos pode reduzir interferências e melhorar a circulação local.

Esses efeitos devem ser contrapostos aos custos e impactos da implantação. Mesmo dentro de corredores existentes, duplicações e marginais podem exigir desapropriações, supressão de vegetação, interferências em cursos d'água, remanejamento de redes e alteração de acessos a propriedades e bairros. Pontes, viadutos e dispositivos podem apresentar elevada complexidade construtiva e produzir impactos temporários relevantes durante as obras.

A avaliação territorial deverá verificar a presença de áreas urbanizadas, mananciais, unidades de conservação, áreas sujeitas a inundação ou escorregamento e outros condicionantes. Embora esses fatores não sejam integralmente representados no modelo de rede, podem alterar significativamente os custos, os prazos e a viabilidade dos projetos.

Síntese da abordagem

A análise deverá determinar onde a capacidade existente é insuficiente, qual elemento da infraestrutura produz a restrição e qual intervenção apresenta maior aderência ao problema. A ampliação não deve ser tratada como resposta automática ao crescimento do tráfego. Duplicações, faixas adicionais, marginais e modernizações devem ser comparadas, sempre que possível, como soluções de diferentes escalas para o mesmo corredor.

As intervenções ainda não comprometidas e com capacidade de alterar o desempenho da rede serão encaminhadas ao Produto D-12. A simulação deverá estimar seus efeitos marginais em relação à rede futura de referência e apoiar a comparação entre projetos individuais e combinações coerentes. Os resultados deverão ser complementados por análises de segurança, implantação, custos e condicionantes territoriais, especialmente nos casos em que os benefícios não possam ser integralmente capturados pela modelagem estratégica.

c) Encaminhamento

As intervenções ainda não comprometidas que alteram a capacidade, a velocidade operacional, as conexões ou a distribuição dos fluxos na malha rodoviária serão encaminhadas para simulação em rede no Produto D-12. As obras já contratadas, em execução ou incorporadas aos compromissos governamentais deverão compor a rede futura de referência, conforme o tratamento realizado no Produto D-10, não sendo avaliadas como alternativas adicionais.

Antes da modelagem, a carteira deverá ser consolidada para identificar sobreposições entre os projetos originados dos contatos setoriais, os programas rodoviários e as intervenções incorporadas a partir do Plano de Governo. Projetos repetidos deverão ser representados uma única vez, preservando-se a versão mais atualizada de seu escopo e estágio de implantação.

Serão encaminhados ao Produto D-12 os seguintes programas e projetos:

Programa de Duplicações

- Programa de Duplicações — R912 a R929 e R944, compreendendo os trechos individualizados na carteira, entre os quais se encontram as ligações Taquaritinga–Pirangi, Sorocaba–Piedade, São Roque–Castello Branco, Atibaia–Piracaia, Vinhedo–Viracopos, Itapira–divisa com Minas Gerais, Sorocaba–Porto Feliz e Juquiá–Piedade;
- duplicação da SP-063 entre Itatiba e Bragança Paulista;
- duplicação da SP-354, Rodovia Edgar Máximo Zambotto, até Jarinu;
- duplicação da Rodovia Marechal Rondon — SP-300;
- duplicação da SP-055 entre Caraguatatuba e Ubatuba;

- programa de duplicações na região do Circuito das Águas;
- duplicação da Rodovia Presidente Tancredo Neves — SP-322;
- duplicação da SP-031;
- duplicação da SP-463;
- duplicação da SP-129;
- duplicações na SP-097, abrangendo os dois segmentos registrados separadamente na carteira;
- duplicação da SP-165;
- duplicações na SP-425, abrangendo os dois segmentos registrados separadamente na carteira;
- duplicações na SP-056, abrangendo os segmentos ainda não comprometidos registrados na carteira.

Os trechos individualizados do Programa de Duplicações deverão ser reconciliados com os projetos do Plano de Governo. A mesma intervenção não deverá ser representada simultaneamente pelo código da carteira original e por seu registro posterior na programação governamental.

Programa de Terceiras Faixas e Faixas Adicionais

- Programa de Terceiras Faixas — R64, R77 e R937 a R942;
- terceira faixa ou faixa adicional no corredor Campinas–Jundiaí, com extensão de referência de aproximadamente 35,2 km;
- terceira faixa ou faixa adicional no corredor Rio Claro–São José do Rio Preto, com extensão de referência de aproximadamente 209 km;
- terceira faixa ou faixa adicional no corredor Ribeirão Preto–Jundiaí, com extensão de referência de aproximadamente 278 km;
- terceira faixa ou faixa adicional no corredor Itu–Jundiaí, com extensão de referência de aproximadamente 44,2 km;
- terceira faixa ou faixa adicional no corredor Campinas–Valinhos, com extensão de referência de aproximadamente 20,5 km;
- terceira faixa ou faixa adicional no corredor Campinas–Sorocaba, com extensão de referência de aproximadamente 62,7 km;
- implantação de faixas adicionais na região do Circuito das Águas;
- implantação de três faixas de rolamento no corredor entre Campinas e Jacareí.

A definição dos cenários deverá distinguir faixas adicionais localizadas, destinadas principalmente à ultrapassagem de veículos lentos, de terceiras faixas contínuas em rodovias já duplicadas. Também deverão ser verificados os segmentos que coincidem com propostas de duplicação, evitando a avaliação cumulativa de alternativas concebidas para solucionar o mesmo problema.

Programa de Vias Marginais

- Programa de Marginais — R63, permanecendo excluído o antigo projeto R48;
- implantação ou ampliação de vias marginais na região do Circuito das Águas;
- implantação de vias marginais em Campinas, nas rodovias SP-075 e SP-340;
- implantação de viadutos e vias marginais em Jundiaí, entre os quilômetros 54 e 61 da SP-330.

A preparação dos cenários deverá identificar os trechos atendidos, os acessos reorganizados e a distribuição esperada entre o tráfego local e o tráfego de passagem. A representação das marginais não deverá se limitar ao aumento genérico da capacidade da pista principal quando a finalidade do projeto for segregar fluxos e reordenar acessos.

Modernização de alças, dispositivos e interseções

- requalificação do Contorno Sul de Ribeirão Preto, incluindo nova alça de acesso à SP-322;
- implantação da alça de acesso entre a SP-021 e a SP-066, atendendo Suzano e Poá;
- demais intervenções de modernização de alças, acessos, retornos, interseções e faixas de aproximação que venham a ser individualizadas no Programa de Modernização Rodoviária.

O programa estadual de implantação de dispositivos em rodovias administradas pelo DER/SP, abrangendo acessos, retornos, passagens em desnível e alças nas rodovias SP-457, SPI-328/326, SP-107, SP-139, SP-261, SP-425, SP-379, SP-332 e SP-427 e na Estrada Municipal ESP-328, encontra-se classificado como comprometido. Suas intervenções deverão integrar a rede futura de referência quando produzirem alterações representáveis na escala do modelo.

Viadutos e obras de arte especiais

- duplicação do viaduto sobre a Rodovia Santos Dumont, na continuidade da duplicação da Rodovia Miguel Melhado, principal acesso rodoviário ao Aeroporto Internacional de Viracopos;
- viadutos associados ao projeto de marginais em Jundiaí, entre os quilômetros 54 e 61 da SP-330;
- demais pontes, viadutos e passagens em desnível que forem individualizados no Programa de Modernização Rodoviária e que representem restrições relevantes à capacidade dos corredores.

Requalificações com possível efeito sobre o desempenho da rede

- requalificação do Contorno de São Roque;
- requalificação do corredor entre Iguape e Jacupiranga;
- requalificação da SP-123;
- requalificação da Rodovia Oswaldo Cruz;
- requalificação do corredor entre Sete Barras e Iporanga.

Essas requalificações deverão ser encaminhadas à simulação somente quando seu escopo incluir alteração identificável da capacidade, da velocidade operacional, das conexões ou dos tempos de percurso. Intervenções restritas à recuperação do pavimento, conservação ou correção física sem efeito mensurável sobre os parâmetros da rede não deverão constituir cenários autônomos no D-12.

Programa de Modernização Rodoviária

- desdobramento do Programa de Modernização Rodoviária em intervenções individualizadas por rodovia, município, localização, função e escopo;
- seleção, após a individualização, dos componentes que alteram a capacidade, a velocidade, as conexões ou a distribuição dos fluxos e que, portanto, podem ser representados no D-12.

O Programa de Modernização Rodoviária aparece na carteira com abrangência estadual, mas ainda não possui detalhamento suficiente para constituir um cenário de rede. Seu encaminhamento dependerá da identificação de projetos específicos, evitando a representação genérica de um programa sem localização e parâmetros operacionais definidos.

Para a preparação dos cenários, cada intervenção deverá possuir informações mínimas sobre localização, extensão, configuração atual, configuração futura, número de faixas, capacidade, velocidade, conexões, horizonte de implantação e relação com outras obras. Nos casos em que os dados de engenharia ainda não estiverem disponíveis, poderão ser adotadas hipóteses padronizadas, desde que explicitadas e aplicadas de forma consistente.

As simulações deverão ser realizadas inicialmente por projeto ou por conjunto tecnicamente indivisível. Posteriormente, poderão ser formados pacotes por corredor ou região, reunindo obras efetivamente complementares. Projetos concorrentes, como duplicação e faixa adicional sobre o mesmo segmento, deverão ser avaliados em cenários separados. Obras já comprometidas não deverão ser somadas novamente aos cenários alternativos.

Nas intervenções localizadas, como alças, viadutos e faixas de aproximação, os efeitos deverão ser traduzidos em parâmetros compatíveis com a escala do modelo estratégico. Quando a modelagem em rede não for capaz de representar adequadamente a operação do dispositivo, o D-12 deverá registrar essa limitação e indicar a necessidade de estudo operacional específico ou microssimulação em etapa posterior.

O Produto D-11 registra o problema, consolida os tipos de intervenção e define a carteira a ser encaminhada. O Produto D-12 deverá simular os projetos representáveis em rede, comparar seus efeitos marginais e produzir os resultados necessários à seleção e à hierarquização das alternativas. A modelagem não substituirá os estudos de engenharia, segurança viária, viabilidade econômica, licenciamento ambiental e estruturação contratual necessários à eventual implantação.

7.3 Segurança viária

a) Contextualização

Segurança viária como componente do planejamento logístico

A segurança viária constitui dimensão fundamental do planejamento da infraestrutura e da operação dos transportes. Os sinistros de trânsito produzem mortes, lesões, interrupções de tráfego, danos materiais, custos para os serviços de saúde e emergência e perdas de produtividade. Quando envolvem cargas perigosas, podem provocar também contaminação do solo e dos recursos hídricos, incêndios, explosões, evacuações e interrupções prolongadas de corredores logísticos.

No Estado de São Paulo, a extensão da malha rodoviária, a intensidade da circulação e a sobreposição entre tráfego regional e deslocamentos locais produzem situações de risco distintas. Em trechos próximos a áreas urbanizadas, pedestres, ciclistas e motociclistas compartilham o espaço com veículos de maior porte e velocidade. Nos corredores de cargas, veículos que transportam produtos perigosos circulam por rodovias com diferentes padrões geométricos, atravessando áreas densamente ocupadas e territórios ambientalmente sensíveis.

A reunião dessas duas frentes em uma única análise permite tratar a segurança como atributo transversal do sistema rodoviário. Usuários vulneráveis e cargas perigosas apresentam riscos e medidas de tratamento específicos, mas compartilham a necessidade de bases de dados qualificadas, identificação de pontos críticos, adequação da infraestrutura, gestão de velocidades, fiscalização e coordenação entre os responsáveis pela operação e pela resposta aos sinistros.

Usuários vulneráveis nas interfaces entre rodovias e áreas urbanas

Rodovias originalmente implantadas para atender a deslocamentos regionais passaram, em diversos municípios, a desempenhar também funções próprias do sistema viário urbano. A expansão das cidades alcançou as margens dessas vias, multiplicando acessos a bairros, estabelecimentos comerciais, instalações industriais, escolas, pontos de ônibus e outros polos geradores de viagens.

Nesses segmentos, o tráfego de longa distância convive com deslocamentos cotidianos realizados a pé, por bicicleta ou motocicleta. A diferença de massa e velocidade em relação aos

automóveis, ônibus e caminhões aumenta a probabilidade de consequências graves quando ocorre uma colisão. Para pedestres e ciclistas, a ausência de calçadas, acostamentos adequados, travessias protegidas e infraestrutura segregada amplia a exposição. Para motociclistas, além da exposição física, pesam a circulação entre veículos, as diferenças de velocidade, as condições do pavimento e a intensa utilização da motocicleta em viagens de trabalho e serviços de entrega.

O problema tende a ser mais grave nas aproximações urbanas, interseções, pontos de ônibus, acessos a empreendimentos e trechos nos quais a rodovia constitui a única conexão entre bairros ou comunidades situados em lados opostos da pista. Nessas condições, a segurança depende tanto do projeto rodoviário quanto da organização territorial e dos deslocamentos locais.

Riscos associados ao transporte de cargas perigosas

O transporte de cargas perigosas exige medidas específicas porque um sinistro de trânsito pode produzir consequências muito superiores àquelas diretamente associadas à colisão ou ao tombamento. A natureza e a extensão do dano dependem do produto transportado, da quantidade liberada, das características do local, das condições meteorológicas e da capacidade de resposta das equipes envolvidas.

As ocorrências podem estar relacionadas a fatores anteriores ao sinistro, como carregamento inadequado, falha de manutenção, fadiga ou capacitação insuficiente do motorista. Durante o evento, influenciam a geometria da via, a velocidade, a visibilidade, o pavimento, os acostamentos, a sinalização e os dispositivos de contenção. Após o acidente, a gravidade dos impactos depende da rapidez na identificação da carga, da comunicação entre os agentes, da disponibilidade de equipamentos e da existência de planos de contingência compatíveis com o produto e o território afetado.

Curvas acentuadas, descidas longas, desníveis entre pista e acostamento, locais com risco de colisão traseira e trechos sem áreas adequadas de parada ou descanso merecem atenção especial. Também são relevantes os segmentos próximos a áreas urbanas, mananciais, cursos d'água, unidades de conservação, instalações industriais e áreas de captação para abastecimento público.

Qualidade e integração das informações

O Estado dispõe de informações provenientes de diferentes órgãos, concessionárias e sistemas de registro. Para os usuários vulneráveis, o InfoSiga constitui uma fonte relevante para localizar ocorrências e caracterizar vítimas e circunstâncias. Para cargas perigosas, as bases administradas no âmbito da SEMIL e da CETESB permitem examinar localização, produto envolvido, impacto e atendimento realizado.

A existência dessas bases não elimina problemas de compatibilidade, duplicidade e cobertura. Variações no número de registros podem refletir diferenças no reporte das ocorrências, e não apenas variações efetivas da sinistralidade. A classificação dos usuários, dos produtos transportados, das causas e dos impactos precisa seguir critérios consistentes para permitir comparação entre períodos, trechos e órgãos gestores.

A análise também exige integração com dados de volume de tráfego, composição da frota, geometria, velocidade, condições do pavimento, iluminação, sinalização, clima e uso do solo. A contagem absoluta de sinistros não informa, isoladamente, o nível de risco. Trechos com maior circulação tendem a registrar mais ocorrências, enquanto segmentos de menor movimento podem apresentar taxas elevadas ou acidentes de grande severidade.

Articulação com a política estadual de segurança viária

Cabe destacar que a priorização dos usuários vulneráveis já constitui uma diretriz estruturante do Plano de Segurança Viária do Estado de São Paulo (PSV-SP), fundamentado na abordagem

do Sistema Seguro e da Visão Zero, segundo a qual nenhuma morte ou lesão grave no trânsito é aceitável e o sistema viário deve ser concebido para acomodar as inevitáveis falhas humanas sem que estas resultem em consequências fatais. Nesse contexto, o Plano reconhece explicitamente que pedestres, ciclistas e motociclistas apresentam maior vulnerabilidade às consequências dos sinistros em razão da limitada proteção física proporcionada pelos seus modos de deslocamento, estabelecendo esses grupos como prioridade para o planejamento, implementação e monitoramento das políticas públicas de segurança viária.

Para operacionalizar essa estratégia, o PSV-SP estrutura suas ações em oito eixos estratégicos alinhadas ao Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS) - Gestão da Segurança Viária, Gestão da Informação, Vias Seguras, Educação, Comunicação, Fiscalização, Veículos Seguros e Atendimento às Vítimas - contemplando um conjunto integrado de ações voltadas à redução da exposição ao risco, ao gerenciamento da velocidade, ao aprimoramento da infraestrutura viária, ao fortalecimento da fiscalização, à promoção de comportamentos seguros, à incorporação de tecnologias veiculares e ao aperfeiçoamento da resposta pós-sinistro. Essa abordagem integrada reconhece que a redução consistente da mortalidade depende da atuação coordenada sobre todos os componentes do sistema de mobilidade, e não apenas sobre o comportamento dos usuários.

O diagnóstico apresentado no PLI reforça a aderência entre os padrões observados nos pontos críticos e as diretrizes estabelecidas pelo PSV-SP. A elevada participação de motociclistas, pedestres e ciclistas nos segmentos urbanos evidencia a necessidade de intervenções que priorizem a redução dos conflitos entre modos de transporte e o controle da energia dos impactos, enquanto a maior participação de veículos pesados nos trechos rurais indica a importância de medidas voltadas à mitigação da severidade das colisões e ao gerenciamento dos riscos operacionais nesses corredores.

No âmbito do PLI-SP 2050, as intervenções futuras deverão estar alinhadas às diretrizes do PSV-SP, que já contempla um conjunto de ações voltadas à redução de mortes e lesões graves no trânsito, fundamentadas nos princípios do Sistema Seguro. Nesse contexto, os resultados do PLI corroboram a priorização dos usuários vulneráveis e fornecem evidências que reforçam a implementação dessas diretrizes no planejamento e na execução das intervenções em infraestrutura de transportes.

b) Análise

A análise de sinistros de trânsito apresentada no Produto D-6 considerou três dimensões complementares: a exposição ao risco, a probabilidade de ocorrência e a severidade das consequências. Para usuários vulneráveis, a exposição está relacionada à presença de pedestres, ciclistas e motociclistas, ao volume e à velocidade do tráfego motorizado e à necessidade de cruzar ou utilizar a rodovia. Para cargas perigosas, a exposição inclui o volume transportado, a frequência das viagens, o tipo de produto, as características da rota e a presença de receptores humanos e ambientais.

A priorização não deve se basear somente no número absoluto de sinistros. Devem ser calculadas, conforme a disponibilidade de dados, taxas por volume de tráfego, extensão do trecho ou estimativa de circulação dos grupos expostos. A severidade deverá receber tratamento próprio, distinguindo ocorrências sem vítimas, com feridos e com óbitos, bem como sinistros com derramamento, incêndio, explosão ou impacto ambiental.

A combinação dessas dimensões permite diferenciar:

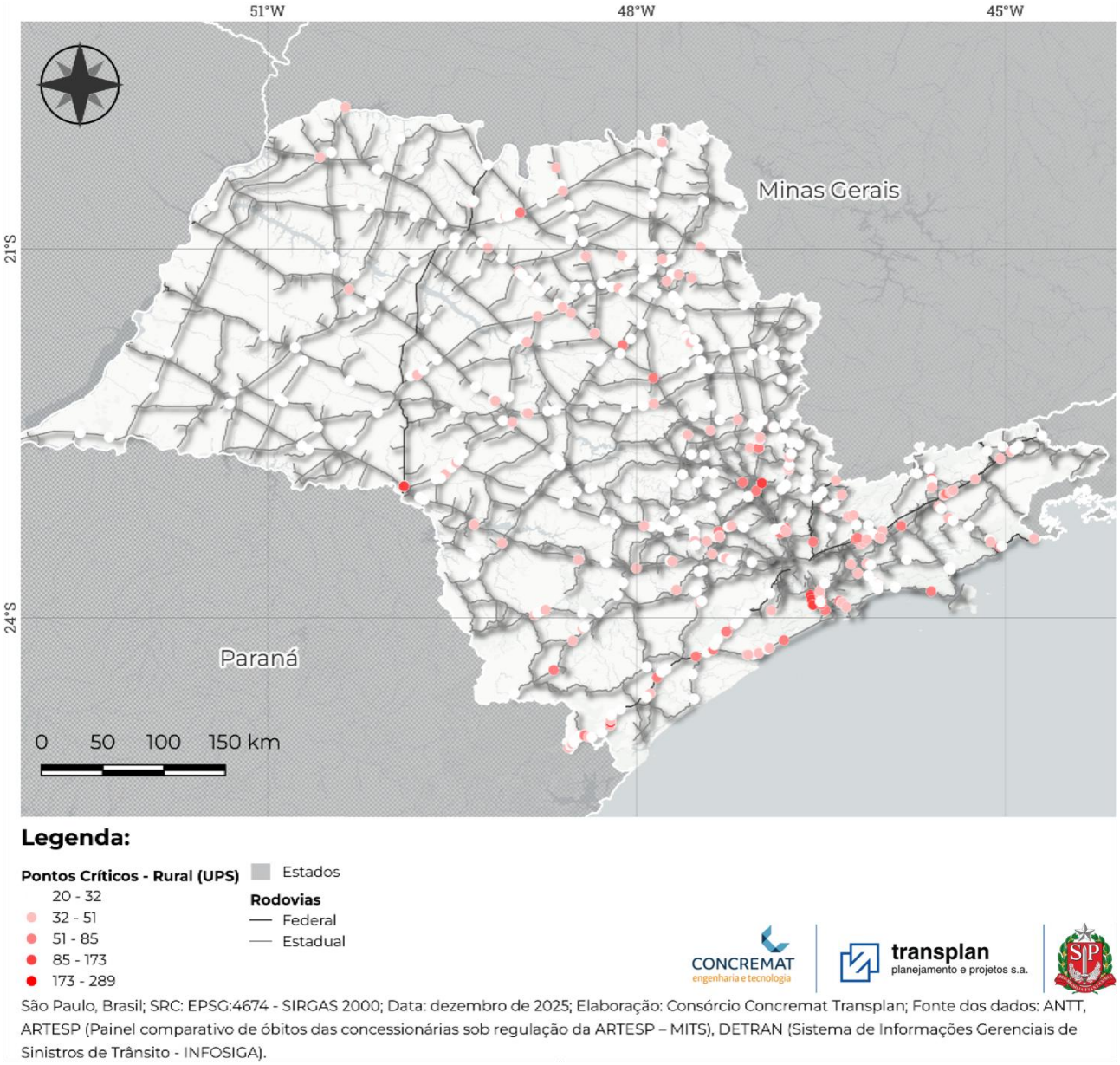
- trechos com grande número de ocorrências devido ao elevado volume de tráfego;
- trechos com frequência moderada, mas taxas de sinistralidade elevadas;
- locais com poucas ocorrências, mas consequências potencialmente graves;

- pontos nos quais usuários vulneráveis ou áreas ambientalmente sensíveis apresentam exposição desproporcional;
- corredores nos quais deficiências de infraestrutura aparecem de forma recorrente entre as circunstâncias dos sinistros.

Análise espacial dos sinistros

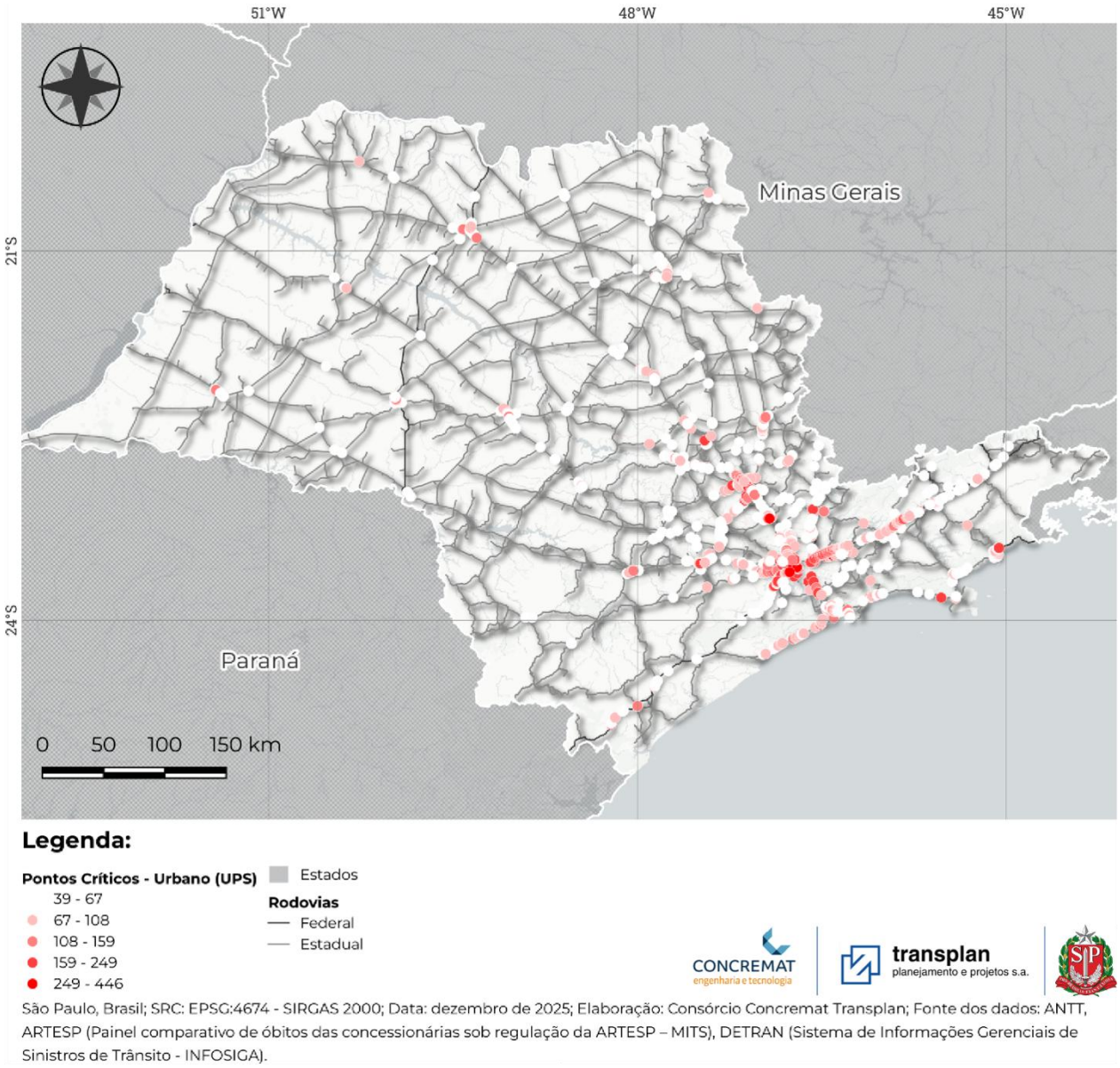
A localização das ocorrências deverá ser relacionada à malha rodoviária, aos limites urbanos, aos polos geradores de viagens e às características do território. A análise espacial permitirá identificar concentrações de sinistros, sequências de segmentos críticos e padrões associados a determinados tipos de infraestrutura ou uso do solo. Abaixo são apresentados os mapas de pontos críticos obtidos do produto D-6.

Figura 7-1: Pontos críticos em áreas rurais



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

Figura 7-2: Pontos críticos em áreas urbanas



Fonte: Elaboração: Consórcio Concremat Transplan.

Usuários vulneráveis e características dos deslocamentos

Nos segmentos urbanos e periurbanos, a análise deverá identificar por que pedestres, ciclistas e motociclistas utilizam a rodovia. Entre as situações possíveis estão viagens pendulares, acesso ao trabalho, deslocamentos escolares, entregas, acesso a pontos de ônibus e ausência de rotas locais alternativas.

Essa caracterização influencia a escolha da intervenção. Quando a rodovia separa bairros e equipamentos, podem ser necessárias travessias protegidas ou passarelas acessíveis. Quando ciclistas utilizam o acostamento para viagens cotidianas, a solução pode envolver infraestrutura segregada e continuidade das conexões. Em trechos com grande circulação de motociclistas, devem ser examinados os conflitos nas interseções, a velocidade, a visibilidade, o pavimento e os movimentos de entrada e saída.

As estratégias possíveis incluem:

- calçadas e rotas acessíveis nas áreas de aproximação;

- travessias em nível protegidas ou passagens em desnível;
- ciclovias ou estruturas segregadas nos trechos de maior exposição;
- pontos de ônibus com áreas adequadas de espera e acesso;
- iluminação nos locais de travessia e embarque;
- reconfiguração de acessos e interseções;
- redução e fiscalização de velocidade em segmentos críticos;
- sinalização e dispositivos de alerta;
- vias marginais ou rotas locais destinadas a separar deslocamentos urbanos do tráfego regional.

A escolha deve responder às causas e aos padrões observados. A instalação isolada de uma passarela, por exemplo, pode apresentar baixa utilização se aumentar excessivamente o percurso ou não oferecer condições de acessibilidade. Medidas de redução de velocidade podem perder efetividade quando dependem apenas de sinalização, sem compatibilidade com o desenho da via e a fiscalização. Ressalta-se que o PSV já aborda as ações relacionadas aos usuários vulneráveis cabendo o PLI apenas seguir as diretrizes apresentadas, por exemplo:

- **Incentivo e Normatização Municipal (Ação 1.3.4)**: Define diretrizes estaduais e minutas de regulamentação para que os municípios adotem práticas integradas de proteção a pedestres, ciclistas e motociclistas.
- **Desenho Viário Seguro na Malha Urbana (Ação 3.1.1)**: Publicação do **Guia Técnico Estadual de Desenho Viário Seguro**, focado no dimensionamento de vias que protejam pedestres, ciclistas e motociclistas.
- **Diretrizes em Contratos de Concessão e Manutenção (Ações 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.4)**: Obriga a inclusão de parâmetros de infraestrutura segura para pedestres e ciclistas nos contratos de concessão rodoviária, corredores de transporte coletivo (BRT/VLT) e contratos de manutenção de rodovias estaduais.
- **Proteção Pedestral em Rodovias (Ação 3.1.5)**: Criação do **Manual Rodoviário para Pedestres do DER-SP**, estabelecendo parâmetros para trechos de rodovias estaduais que cruzam perímetros urbanos.
- **Tratamento de Pontos Críticos e Apoio Municipal (Ações 3.2.1 e 3.2.2)**: Prioriza a readequação física de trechos de alto risco de atropelamentos e colisões e prevê repasse de recursos estaduais aos municípios para projetos de mobilidade ativa.
- **Plano Cicloviário Estadual (Ação 3.3.2)**: Estrutura a implantação de ciclovias/ciclofaixas conectadas em trechos rodoviários críticos e a exigência de bicicletários em estações de transporte coletivo.
- **Intervenções de Segregação de Tráfego no PLI**: Projetos do PLI como o *Contorno de Pompéia*, o *Anel Viário de Jeriquara* e a criação de vias marginais em polos industriais têm como objetivo remover o tráfego pesado das travessias urbanas, reduzindo diretamente os conflitos com o trânsito local e os acidentes com usuários vulneráveis.

Acidentes com cargas perigosas

O PSV-SP trata sobre o transporte de produtos e cargas perigosas no eixo de **Educação**, além de ações complementares no eixo de **Veículos Seguros** para frotas de carga:

- **Ação 4.3.1 / Produto 4.3.1.1 (Eixo Educação)**: **Revisão dos conteúdos das capacitações de motoristas profissionais**, que prevê explicitamente o alinhamento da capacitação em **Transporte de Produtos Perigosos (MOPP)** aos princípios do Sistema Seguro.

- **Detalhamento**: Atualiza periodicamente os conteúdos pedagógicos e teóricos ministrados aos condutores profissionais.
- **Responsáveis**: DETRAN-SP (Diretoria de Segurança Viária - DSV) em articulação com SEMIL-SP, ARTESP e DER-SP.

Embora focado no transporte de cargas de forma ampla, o PSV estabelece diretrizes de controle e fiscalização que abrangem veículos transportadores de cargas perigosas:

- **Ação 7.1.1 / Produto 7.1.1.1 (Eixo Veículos Seguros)**: **Elaboração do Manual de Procedimentos de Fiscalização de Veículos de Grande Porte**, focado nos sistemas de segurança e na manutenção preventiva de veículos de carga.
- **Ação 7.1.2 / Produto 7.1.2.1 (Eixo Veículos Seguros)**: **Procedimento estadual padrão de vistoria para veículos de transporte de carga**, garantindo o cumprimento de critérios técnicos de inspeção e prazos periódicos.

c) Encaminhamento

O tratamento da segurança viária será distribuído entre os produtos subsequentes conforme a natureza da intervenção. As medidas que alteram a configuração ou a capacidade da rede serão associadas aos projetos simulados no Produto D-12. As medidas locais, operacionais, regulatórias e de contingência, cujos efeitos não são adequadamente capturados pela macrossimulação, deverão ser aprofundadas fora da rede no Produto D-14.

Integração da segurança aos projetos simulados no D-12. Os projetos de novas rodovias e de ampliação ou modernização da capacidade deverão considerar a segurança viária como dimensão de avaliação. Esse tratamento abrangerá:

- novas rodovias e prolongamentos;
- contornos urbanos e rotas alternativas;
- duplicações de rodovias;
- terceiras faixas e faixas adicionais;
- vias marginais;
- modernização de alças e dispositivos;
- reconfiguração de interseções;
- viadutos e passagens em desnível;
- faixas de aceleração, desaceleração e aproximação.

Essas intervenções podem aumentar a segurança ao separar sentidos e tipos de tráfego, reduzir ultrapassagens de risco, eliminar cruzamentos conflitantes, desviar veículos pesados de áreas urbanizadas e adequar a infraestrutura às características da frota atual. Portanto, seus benefícios não deverão ser limitados aos ganhos de capacidade e redução dos tempos de viagem.

Projetos de duplicação em corredores estaduais, como as duplicações da SP-294, SP-258, SP-284, SP-425, SP-031 e SP-129, visam eliminar o tráfego em pista simples com fluxos opostos. De acordo com dados e estudos compilados no *Clearinghouse* da FHWA (*Federal Highway Administration*), a conversão de rodovias de pista simples para pista dupla dividida, com canteiro central ou barreira física (*convert 2-lane undivided to 4-lane divided*), pode reduzir em 40% a 65% as colisões frontais (*head-on collisions*) e os sinistros de maior severidade, incluindo acidentes fatais e com lesões graves, ao eliminar o risco de ultrapassagens indevidas e de saídas de faixa.

A implantação de vias marginais, como na SP-270, SP-055 e nos acessos a polos industriais e comerciais, como em Registro, separa os deslocamentos urbanos de baixa velocidade do fluxo rodoviário de alta velocidade, aumentando a segurança da mobilidade ativa e dos modos de transporte de menor porte.

Para cada projeto encaminhado ao D-12, deverá ser verificada a sobreposição com os trechos críticos identificados no mapa de sinistros. Os resultados da simulação, como alteração de fluxos, velocidades e circulação de veículos pesados, deverão subsidiar uma avaliação complementar dos possíveis efeitos sobre a segurança viária.

Quando um projeto desviar tráfego de uma área urbana ou de um corredor com concentração de sinistros, a análise deverá registrar a redução da exposição no trecho aliviado e o eventual aumento da exposição na rota que receberá os fluxos. Nos projetos de ampliação, deverão ser avaliados os riscos associados ao aumento de velocidade e à permanência de acessos, travessias e pontos de conflito.

O D-14 deverá comparar as soluções e estimar seus custos, sua cobertura territorial e sua contribuição potencial para reduzir mortes e lesões graves. Nos casos em que as medidas integrarem projetos rodoviários mais amplos, a análise deverá evitar dupla contagem de custos e benefícios.

O D-11 registra como diretriz a integração entre as bases do InfoSiga, SEMIL/CETESB, DER-SP, ARTESP, concessionárias e órgãos de segurança e emergência. O D-14 deverá detalhar requisitos para padronização, eliminação de duplicidades, georreferenciamento, classificação das ocorrências e acompanhamento dos indicadores.

A governança deverá definir responsabilidades pela alimentação, validação, consolidação e publicação dos dados. Também deverá estabelecer procedimentos para que os resultados das análises sejam incorporados à priorização de obras, aos contratos de concessão, aos programas do DER-SP e às políticas do Plano de Segurança Viária.

O Produto D-11 consolida os problemas, indica os fatores de risco e estabelece a segurança como critério transversal do planejamento rodoviário. O Produto D-12 deverá incorporar os efeitos dos projetos de infraestrutura sobre a distribuição dos fluxos e fornecer dados para avaliar suas consequências potenciais sobre a segurança. O Produto D-14 deverá aprofundar os projetos locais, operacionais e institucionais, comparar alternativas e indicar as condições necessárias para sua implementação.

7.4 Regulação e priorização de demandas rodoviárias

a) Contextualização

A regulação e a priorização de demandas rodoviárias abrangem duas questões relacionadas. A primeira corresponde às condições necessárias para a circulação de cargas especiais, incluindo a identificação de corredores, a superação de restrições físicas, os procedimentos de autorização e a cobrança de tarifas associadas às operações. A segunda envolve o recebimento, a análise e a hierarquização das solicitações de empresas e municípios por acessos, retornos, dispositivos, vias marginais, passarelas, pontos de ônibus, melhorias de segurança e outras intervenções na malha estadual.

As duas frentes dependem de critérios transparentes para transformar demandas individuais em decisões coerentes com o planejamento da rede. Uma solicitação pode atender a uma necessidade legítima de segurança, mobilidade ou desenvolvimento econômico, mas também pode produzir interferências na rodovia, gerar custos públicos, afetar contratos de concessão ou beneficiar de forma concentrada um empreendimento específico. Por isso, a existência da demanda não deve resultar automaticamente na inclusão de uma obra na carteira estadual.

Circulação de cargas especiais

Cargas especiais são aquelas que, por suas dimensões, peso ou indivisibilidade, exigem condições específicas de transporte. Essa categoria abrange equipamentos industriais,

transformadores, estruturas metálicas, componentes de geração de energia, equipamentos destinados a operações portuárias e offshore e outros bens que ultrapassam os limites usuais de peso ou gabarito. Não se confunde, portanto, com cargas perigosas, cuja classificação decorre principalmente das propriedades do produto transportado e do risco de vazamento, incêndio, explosão ou contaminação.

O transporte de cargas especiais possui relevância para cadeias industriais que dependem da fabricação e do deslocamento de equipamentos de grande porte. A capacidade de transportar esses bens entre unidades produtivas, portos, instalações de energia e outros destinos influencia custos, prazos e decisões de localização. Uma rota inviável ou excessivamente onerosa pode reduzir a competitividade de empresas instaladas no Estado e direcionar operações para outros corredores ou portos.

Esses deslocamentos dependem da emissão de Autorizações Especiais de Trânsito, da programação da operação e, conforme as características da carga, de escoltas, interrupções temporárias, retirada de obstáculos e acompanhamento por concessionárias ou órgãos rodoviários. Pontes, viadutos, passarelas, pórticos, praças de pedágio, cabos, raios de curva, inclinações e dispositivos de acesso podem funcionar como restrições ao percurso.

Além das limitações físicas, as operações estão sujeitas a cobranças relacionadas à autorização, ao uso da infraestrutura e aos serviços prestados pelas concessionárias. Os materiais analisados registram diferenças expressivas entre rotas estaduais e federais. Em simulações apresentadas pela LOGIPESA, as taxas TUV, PRF, TAP e TO somaram aproximadamente R$ 120,5 mil no percurso entre Guarulhos e o Porto de Santos e R$ 81,6 mil entre Guarulhos e o Porto de São Sebastião. Para o percurso entre Guarulhos e o Porto de Itaguaí, realizado por corredor federal que não aplicava TAP e TO nas condições examinadas, o valor indicado foi de aproximadamente R$ 18,7 mil. Esses valores possuem caráter exemplificativo, mas evidenciam que a estrutura de cobrança pode influenciar a seleção das rotas e dos destinos portuários.

A Portaria ARTESP nº 17, de 24 de setembro de 2007, constitui uma das referências identificadas para a cobrança de operações especiais nas rodovias concedidas. A evolução dos veículos, das cargas, dos sistemas de pedágio e dos contratos de concessão indica a necessidade de verificar a atualidade dos parâmetros, a uniformidade dos procedimentos e a aderência dos valores cobrados aos custos efetivamente gerados por cada operação.

Solicitações apresentadas por municípios e empresas

Municípios e empresas apresentam regularmente demandas por intervenções nas rodovias estaduais. Entre as solicitações recorrentes encontram-se acessos a empreendimentos, retornos, rotatórias, dispositivos em desnível, vias marginais, faixas de aceleração e desaceleração, passarelas, pontos de ônibus, iluminação, sinalização, pavimentação e adequações de segurança.

Essas demandas podem decorrer da expansão urbana, da implantação de instalações industriais ou logísticas, do aumento da produção agropecuária, do crescimento do tráfego de caminhões ou da existência de conflitos e acidentes. Em alguns casos, a intervenção atende a uma deficiência preexistente da rodovia. Em outros, surge como consequência direta de um empreendimento que altera o volume ou o padrão de circulação.

A análise ocorre atualmente por diferentes canais e instituições, conforme a administração do trecho, a natureza da solicitação e a responsabilidade pela implantação. DER-SP, ARTESP, concessionárias, secretarias estaduais e administrações municipais podem participar do processo. A fragmentação dificulta o acompanhamento das solicitações, a comparação entre demandas e a comunicação ao interessado sobre documentos, etapas, competências e prazos.

As contribuições recebidas nos fóruns regionais e no formulário do PLI-SP foram organizadas em uma base com pontos e traçados associados às solicitações. Essa base constitui um ponto de

partida para a criação de uma sistemática permanente, mas ainda requer eliminação de duplicidades, complementação de informações e definição de critérios comuns de elegibilidade, análise e priorização.

O desafio consiste em criar um processo capaz de receber as solicitações, verificar sua consistência, identificar o responsável pelo problema e comparar as alternativas de forma transparente. Esse processo deverá permitir tanto o tratamento de pequenas intervenções locais quanto a identificação de demandas com potencial para originar projetos estruturantes

b) Análise

Duas frentes, um mesmo problema de decisão

As duas frentes tratadas nesta seção compartilham uma característica que as distingue dos programas examinados nas seções anteriores. Nas novas rodovias e nas ampliações de capacidade, a carteira parte de projetos identificados pelo planejamento. Aqui, a iniciativa parte predominantemente de agentes externos: transportadores e embarcadores que precisam deslocar uma carga específica, municípios que reivindicam um acesso ou uma travessia e empresas que dependem de um dispositivo para operar. Cabe ao Estado converter esse fluxo contínuo de pedidos em decisões comparáveis, justificadas e rastreáveis.

Por essa razão, a análise não se limita ao mérito de cada solicitação. Ela deve estruturar o processo pelo qual as demandas são recebidas, qualificadas, localizadas, filtradas e comparadas, de modo que as decisões individuais permaneçam coerentes com as prioridades da rede e possam ser revistas quando as condições se alterarem.

Cargas especiais: corredores, restrições e cobrança

A análise das cargas especiais deve partir da identificação das origens e dos destinos recorrentes dessas operações, como polos industriais, fabricantes de equipamentos de grande porte, instalações de geração de energia e portos. A partir desses pares, podem ser delimitados corredores preferenciais e verificados, ao longo de cada um, os elementos que limitam o peso, a altura, a largura ou o raio de giro das composições.

Essa verificação deverá produzir um inventário georreferenciado das restrições, contendo, entre outros elementos:

- capacidade de carga e gabarito de pontes e viadutos;
- altura livre de passarelas, pórticos e redes aéreas;
- configuração de praças de pedágio e de dispositivos de acesso;
- raios de curva e rampas incompatíveis com composições especiais;
- trechos que exigem interrupção do tráfego ou retirada temporária de obstáculos.

O inventário permitirá distinguir restrições pontuais, removíveis por intervenções de menor custo, daquelas que inviabilizam o corredor e exigem rota alternativa. Também permitirá verificar se a adequação de poucos pontos críticos seria suficiente para consolidar rotas estaduais competitivas até os portos e os principais polos produtivos.

A estrutura de cobrança deverá ser examinada em conjunto com as restrições físicas. As diferenças observadas entre rotas estaduais e federais indicam que taxas e tarifas podem deslocar operações para corredores e portos fora do Estado, independentemente das condições das vias. A revisão dos parâmetros vigentes deverá verificar a correspondência entre os valores cobrados e os custos efetivamente gerados pela autorização, pela escolta, pelo acompanhamento e pelo uso da infraestrutura, bem como a uniformidade dos procedimentos entre as rodovias concedidas e as administradas pelo DER-SP.

Método para a qualificação e a priorização das solicitações

As solicitações de municípios e empresas exigem um método aplicado em etapas sucessivas, no qual cada etapa qualifica ou descarta demandas antes que a seguinte seja executada. Essa sequência evita que a análise técnica seja consumida por pedidos incompletos, fora da competência estadual ou já atendidos por ações em curso, e assegura que as demandas comparadas entre si tenham sido submetidas aos mesmos critérios.

O método proposto compreende as seguintes etapas:

- registro padronizado, com identificação do solicitante, descrição do pedido, localização georreferenciada e informações mínimas sobre custo, prazo e maturidade;
- verificação de admissibilidade, destinada a confirmar competência, clareza, finalidade pública, relevância setorial e ausência de duplicidade;
- caracterização territorial, com identificação dos municípios, regiões e unidades de planejamento interceptados pela intervenção e do órgão responsável pelo trecho;
- triagem de restrições e riscos territoriais;
- hierarquização multicritério das demandas admitidas;
- publicação e acompanhamento da situação de cada solicitação.

O registro padronizado é condição para as etapas seguintes. Demandas descritas apenas em texto, sem localização precisa ou sem identificação do responsável, não podem ser cruzadas com as bases territoriais nem comparadas entre si. A localização deve ser informada como ponto, linha ou polígono, conforme a natureza da intervenção, e o solicitante deve ser vinculado a uma instituição e a um representante identificados.

A verificação de admissibilidade responde a cinco perguntas objetivas: se a matéria é de logística ou transportes e de alçada estadual; se é possível identificar o que se pede; se o pedido atende a interesse coletivo, e não a benefício exclusivamente privado; se possui repercussão para o sistema de transportes além do ponto local; e se não está contemplado por ação, projeto ou processo em curso. O resultado deverá ser registrado em parecer, com justificativa obrigatória nos casos de reprovação ou de aprovação com ressalvas.

Essa etapa enfrenta diretamente a questão apontada na contextualização: a existência da demanda não deve resultar automaticamente em uma obra na carteira estadual. O critério de finalidade pública permite separar intervenções de interesse coletivo de pedidos cuja necessidade decorre exclusivamente de um empreendimento específico, casos em que a responsabilidade pela implantação deverá ser examinada à parte.

As demandas admitidas deverão ser cruzadas com camadas oficiais de restrição e de risco. As restrições, como unidades de conservação de proteção integral, terras indígenas, territórios quilombolas, manguezais e áreas embargadas, segregam a demanda do ordenamento ordinário, salvo exceção metodológica registrada. Os riscos, como áreas de proteção de mananciais, áreas contaminadas, bens tombados e áreas suscetíveis a inundação ou a movimentos de massa, não excluem a demanda, mas geram ressalvas que a acompanham nas etapas seguintes.

A comparação entre as demandas remanescentes deverá combinar duas leituras. A primeira avalia a favorabilidade do território em que a intervenção se localiza, a partir de critérios ambientais, sociais, territoriais, econômicos e de rede. A segunda avalia atributos da própria demanda, como maturidade, custo, prazo e grau de definição das estimativas. Os pesos dos critérios deverão ser definidos pelo Método de Análise Hierárquica (AHP), com verificação da consistência dos julgamentos e registro das matrizes utilizadas.

A definição dos pesos não deve depender do julgamento de um único técnico. O método admite a consulta a especialistas, com consolidação das matrizes individuais pela média geométrica, desde que cada julgamento apresente razão de consistência inferior a 0,10. Os pesos, as matrizes e os resultados deverão ser homologados e preservados, permitindo reproduzir cada ordenamento e explicar ao solicitante a posição atribuída à sua demanda.

Ferramenta de apoio à decisão: SICARD

Para operacionalizar o método, foi desenvolvido o SICARD — Sistema Inteligente de Cadastro e Ranking de Demandas, aplicação web que reúne, em um único ambiente, o recebimento, a análise, a hierarquização e o acompanhamento das duas frentes tratadas nesta seção: a circulação de cargas especiais e as solicitações de municípios e empresas por intervenções na malha estadual. O sistema combina processamento geoespacial, análise multicritério pelo método AHP e trilha de auditoria das decisões.

O SICARD foi construído sobre a infraestrutura, as ferramentas e os conceitos do software livre e de código aberto (open source), entre os quais o banco de dados PostgreSQL com a extensão espacial PostGIS, a biblioteca geoespacial GDAL, o motor de reconhecimento óptico de caracteres Tesseract e bibliotecas abertas de mapas interativos. Essa base dispensa licenças proprietárias, adota padrões abertos de dados geográficos e de integração entre sistemas e torna a ferramenta extremamente versátil: novas camadas, critérios, fluxos de análise e fontes de dados podem ser incorporados sem a reconstrução de sua arquitetura.

Para a circulação de cargas especiais, o sistema:

- mantém o inventário georreferenciado das restrições físicas, como pontes, viadutos, passarelas, pórticos, praças de pedágio, raios de curva e rampas, em camada consultável sobre a malha rodoviária;
- registra os corredores preferenciais e permite verificar, para cada par de origem e destino, as restrições interceptadas ao longo do percurso;
- reúne os parâmetros de cobrança aplicáveis a cada trecho, permitindo comparar os valores entre rotas estaduais e federais;
- recebe as solicitações de adequação física dos corredores e as submete ao mesmo fluxo de admissibilidade e hierarquização aplicado às demais demandas.

Para as solicitações de municípios e empresas, o sistema:

- recebe as demandas por formulário padronizado para planos, programas e projetos, com localização por ponto, linha ou polígono, indicada no mapa ou enviada em arquivo geográfico;
- incorpora documentos recebidos pelo SEI, lendo os arquivos em PDF, inclusive páginas digitalizadas, e sugerindo valores para os campos do cadastro com indicação da página e do trecho de origem;
- vincula o solicitante ao cadastro de instituições e pessoas do SIGMA-PLI, que também controla o acesso e os perfis dos usuários;
- identifica, a partir da geometria, os municípios, as regiões de governo, as regiões administrativas, as regiões metropolitanas, as UGRHIs e as zonas do ZEE-SP interceptados, bem como o órgão responsável pelo trecho rodoviário;
- sinaliza possíveis duplicidades, a partir da proximidade geográfica e da semelhança entre as descrições;
- estrutura o parecer de admissibilidade pelos cinco critérios, com registro da decisão e emissão do parecer em PDF;
- realiza a triagem de restrição e risco sobre biblioteca de camadas homologadas e o cruzamento com os trechos críticos de sinistralidade;
- hierarquiza as demandas em fases independentes e combináveis, relativas à favorabilidade territorial e aos atributos da demanda, com pesos AHP definidos individualmente ou por consulta colaborativa a especialistas;
- informa ao solicitante a situação da demanda, as etapas cumpridas, as competências envolvidas e os prazos, e publica em painel a localização e a situação das solicitações.

Embora a configuração atual concentre as entradas no formulário de cadastro e nos documentos do SEI, a arquitetura do SICARD foi concebida para receber demandas e dados de outras fontes, tais como:

- canais de ouvidoria e de atendimento ao cidadão;
- protocolos e sistemas de gestão de prefeituras e de consórcios intermunicipais;
- carteiras de projetos do DER-SP, da ARTESP e das concessionárias;
- pedidos de Autorização Especial de Trânsito e registros das operações de cargas especiais;
- contribuições de consultas públicas, audiências e fóruns regionais;
- serviços web geográficos de órgãos públicos, nos padrões abertos WMS e WFS;
- bases de sinistros, contagens volumétricas e monitoramento de tráfego;
- planilhas e bases tabulares de outros órgãos e entidades;
- integração direta com outros sistemas por interface de programação de aplicações (API).

Cada demanda percorre situações predefinidas, como em análise, aprovada, reprovada, em hierarquização, ranqueada e em execução, e somente as transições previstas são admitidas. A distinção de perfis separa quem registra e revisa as demandas, quem emite parecer e calcula a hierarquização e quem homologa as configurações e os resultados.

O sistema não substitui o julgamento técnico. A decisão de admissibilidade, a confirmação das duplicidades e a validação dos dados extraídos de documentos permanecem atribuições do analista. O que o SICARD assegura é que esses julgamentos sejam registrados segundo critérios uniformes, sobre informações georreferenciadas e com rastreabilidade suficiente para que cada decisão possa ser consultada, justificada e revista.

c) Encaminhamento

O tratamento desta seção será distribuído conforme a natureza das demandas. As intervenções que alteram a configuração ou a capacidade da rede serão associadas às simulações do Produto D-12. Os aspectos regulatórios, tarifários, operacionais e de gestão das solicitações, cujos efeitos não são capturados pela macrossimulação, deverão ser aprofundados no Produto D-14, tendo o SICARD como ambiente de registro, análise e acompanhamento.

Cargas especiais

O Produto D-14 deverá, a partir das informações mantidas no SICARD:

- delimitar os corredores preferenciais para cargas especiais entre os polos produtivos, as instalações de energia e os portos;
- consolidar o inventário georreferenciado das restrições físicas e indicar as intervenções necessárias à sua superação;
- revisar os parâmetros de cobrança vigentes, incluindo a Portaria ARTESP nº 17/2007, comparando-os com os praticados em rodovias federais e com os custos efetivos das operações;
- propor a padronização dos procedimentos de autorização entre DER-SP, ARTESP e concessionárias.

As intervenções de adequação física que alterem a capacidade dos corredores, como a ampliação ou a substituição de obras de arte especiais, deverão ser conferidas quanto à sobreposição com os projetos encaminhados ao D-12 nas seções 7.1 e 7.2, evitando dupla contagem.

Solicitações de municípios e empresas

A base de contribuições recebidas nos fóruns regionais e no formulário do PLI-SP constitui a carteira inicial do SICARD. Os registros são consolidados no sistema, com eliminação de

duplicidades, complementação da localização e da identificação do solicitante e vinculação de cada solicitação ao órgão responsável pelo trecho.

As demandas admitidas deverão ser classificadas conforme sua escala:

- intervenções que alteram a capacidade, as conexões ou a distribuição dos fluxos, como vias marginais, dispositivos em desnível e acessos de maior porte, encaminhadas à simulação no D-12 em conjunto com os programas das seções 7.1 e 7.2;
- intervenções locais, como pontos de ônibus, iluminação, sinalização, travessias e acessos de pequeno porte, avaliadas no D-14 pela hierarquização multicritério do SICARD, sem simulação em rede;
- solicitações associadas a empreendimento específicos, examinadas quanto à responsabilidade pela implantação e à eventual participação do empreendedor nos custos.

As demandas localizadas em trechos críticos de sinistralidade identificados na seção 7.3 deverão ser registradas como tal, de modo que os benefícios de segurança viária sejam considerados na priorização mesmo quando os ganhos de mobilidade forem reduzidos.

O Produto D-14 deverá ainda definir:

- os critérios e os pesos da hierarquização das solicitações, homologados a partir da consulta a especialistas;
- as responsabilidades do DER-SP, da ARTESP, das concessionárias e dos municípios em cada etapa do processo;
- os prazos de resposta e a forma de comunicação ao solicitante;
- a periodicidade de revisão da carteira e de republicação do ordenamento;
- as fontes de entrada adicionais a serem integradas ao SICARD e a ordem de sua incorporação.

O SICARD constitui o instrumento permanente dessa sistemática. Sua versatilidade permite que as solicitações recebidas após a conclusão do PLI-SP 2050 continuem a ser tratadas pelos mesmos critérios e que novas fontes de dados sejam integradas à medida que se tornem disponíveis, preservando o histórico das decisões e subsidiando as revisões periódicas do Plano.

O Produto D-11 registra o problema, propõe o método e apresenta a ferramenta que o operacionaliza. O Produto D-12 deverá simular as intervenções representáveis em rede. O Produto D-14 deverá aprofundar os aspectos regulatórios e tarifários das cargas especiais, consolidar a carteira de solicitações e definir os critérios, as responsabilidades e os procedimentos necessários à operação continuada da sistemática.

7.5 Pavimentação, recuperação ou estadualização de rodovias em áreas rurais

a) Contextualização

Em diferentes regiões do Estado de São Paulo, comunidades rurais, assentamentos, pequenos núcleos populacionais e áreas produtivas dependem de estradas municipais ou vicinais para acessar sedes urbanas, serviços públicos e corredores rodoviários de maior capacidade. Essas vias constituem o primeiro segmento de diversas viagens de passageiros e cargas, mesmo quando não integram formalmente a malha estadual.

A qualidade e a continuidade desses acessos influenciam o deslocamento da população para unidades de saúde, escolas, centros comerciais e serviços administrativos. Também condicionam o transporte da produção agropecuária, a chegada de insumos, o atendimento de emergências e a circulação associada ao turismo rural. Quando a via apresenta pavimento inadequado, pontes

com restrições ou manutenção insuficiente, os efeitos alcançam o funcionamento econômico e social do território atendido.

O problema não se limita à ausência de pavimentação. Algumas estradas possuem revestimento, mas apresentam degradação, drenagem deficiente, pontes incompatíveis com os veículos atuais ou interrupções recorrentes durante períodos de chuva. Em outros casos, a via oferece condições regulares, mas sua classificação administrativa já não corresponde à função que passou a exercer.

O desenvolvimento das atividades econômicas e a expansão das relações entre municípios podem transformar uma estrada originalmente local em uma ligação de interesse regional. Trechos antes utilizados apenas para acesso a propriedades rurais podem passar a conectar municípios, atender cadeias produtivas, integrar circuitos turísticos ou constituir a principal rota até serviços públicos de maior complexidade.

Essa mudança de função cria um descompasso entre a responsabilidade administrativa e a utilização efetiva da infraestrutura. Municípios de menor porte podem não possuir recursos técnicos e financeiros suficientes para conservar vias que recebem tráfego regional ou volumes expressivos de veículos pesados. A deterioração resultante afeta usuários de diferentes localidades e atividades econômicas que ultrapassam os limites municipais.

A precariedade dos acessos também pode ampliar desigualdades territoriais. A distância até uma cidade não depende apenas da extensão do percurso. As condições da estrada, a presença de pontes, a ocorrência de interrupções e a velocidade possível influenciam o tempo necessário para alcançar hospitais, escolas e outros serviços. Esse problema assume maior relevância para comunidades que dependem de poucos caminhos ou não dispõem de rotas alternativas.

As estradas rurais também integram as cadeias logísticas do Estado. A produção agropecuária depende dessas vias para alcançar armazéns, unidades de processamento, entrepostos, terminais e rodovias estruturantes. Condições inadequadas aumentam tempos de viagem, consumo de combustível, desgaste dos veículos e perdas de produtos, especialmente em cadeias que trabalham com cargas perecíveis ou janelas operacionais restritas.

A ausência de rotas alternativas torna algumas áreas especialmente vulneráveis a chuvas intensas, inundações, erosões, deslizamentos e danos em pontes. Esses eventos podem isolar comunidades, interromper o transporte escolar, dificultar o atendimento de saúde e impedir o escoamento da produção. As mudanças climáticas podem ampliar a frequência ou a intensidade dessas ocorrências em determinadas regiões.

O problema central consiste, portanto, em identificar quais estradas municipais e vicinais exercem função social, econômica ou territorial suficiente para justificar a atuação do Estado e qual modalidade de intervenção apresenta maior aderência a cada situação.

b) Análise

A Pavimentação, recuperação e estadualização correspondem a instrumentos distintos. A pavimentação modifica o padrão físico de uma estrada não pavimentada para proporcionar condições mais regulares de circulação. A recuperação atua sobre uma infraestrutura existente que perdeu qualidade ou capacidade de atendimento. A estadualização altera a responsabilidade administrativa e pode ser acompanhada, ou não, por obras de melhoria.

Essas medidas não devem ser tratadas como etapas obrigatoriamente vinculadas. Uma estrada municipal pode receber pavimentação ou recuperação por meio de convênio sem ser transferida ao Estado. Da mesma forma, a estadualização não garante, por si só, a execução imediata de obras. A escolha deve considerar a função da via, a capacidade técnica e financeira dos responsáveis, os custos de implantação e conservação e o arranjo mais adequado para sua operação.

A estadualização poderá ser considerada quando a via apresentar interesse público supramunicipal e desempenhar função relevante para a integração territorial. A transferência de responsabilidade não deverá ocorrer apenas porque o município enfrenta dificuldade de manutenção. Será necessário demonstrar que o trecho exerce função compatível com a malha estadual e que sua incorporação representa uma solução mais adequada do que os demais instrumentos disponíveis.Esses instrumentos podem viabilizar obras em trechos prioritários sem exigir a transferência definitiva da titularidade.

A seleção das vias deverá considerar a acessibilidade aos serviços públicos. O mapeamento das rotas entre as comunidades e as unidades de saúde, estabelecimentos de ensino, sedes municipais e demais centros de atendimento permitirá identificar as intervenções com maior potencial de redução dos tempos de deslocamento e dos riscos de isolamento. Assentamentos rurais, comunidades quilombolas, comunidades indígenas e núcleos populacionais mais afastados poderão exigir atenção específica.

A função econômica também deverá ser avaliada. Pontes estreitas ou com baixa capacidade estrutural podem impedir a circulação dos veículos utilizados na produção contemporânea, enquanto trechos sem pavimentação ou drenagem adequada podem limitar o escoamento em determinados períodos. Entretanto, a relevância de uma via não deverá ser medida somente pelo volume transportado. Estradas que atendem pequenos produtores, circuitos turísticos ou atividades locais podem possuir importância elevada para a economia regional, ainda que não apresentem fluxos comparáveis aos grandes corredores.

A análise deverá incorporar ainda a resiliência e a continuidade dos acessos. Drenagem, estabilidade de taludes, dimensionamento de pontes, disponibilidade de rotas alternativas e capacidade de recuperação após eventos críticos deverão fazer parte da avaliação das intervenções. A prioridade deverá considerar tanto as condições usuais de circulação quanto a importância da via durante emergências.

O tratamento do tema como política permanente de conectividade rural permite superar uma lógica baseada apenas em demandas pontuais. Uma carteira georreferenciada e periodicamente atualizada poderá direcionar os investimentos para os trechos que ampliem o acesso da população, fortaleçam a produção regional e integrem as áreas rurais à rede estadual de maneira técnica e institucionalmente sustentável.

c) Encaminhamento

O tema será encaminhado por meio de dois programas previstos no Caderno de Ações:

- **Programa de Estadualização de Rodovias Municipais**: acompanhamento e conclusão das intervenções de pavimentação e requalificação já previstas em aproximadamente 480,4 km de estradas distribuídas por 50 municípios. Por se tratar de uma carteira comprometida, seus projetos deverão integrar a configuração futura de referência.
- **Programa de Logística Rural**: estruturação de uma nova carteira de intervenções em estradas municipais e pontes rurais, priorizando a conectividade das comunidades, o acesso a serviços públicos, o escoamento da produção e a continuidade da circulação. Os projetos deverão ser individualizados e avaliados conforme sua função social, econômica e regional.

Os dois programas serão encaminhados para análise fora da rede no Produto D-14, que deverá avaliar seus critérios de priorização, custos, benefícios sociais e econômicos, responsabilidades institucionais e condições de implantação e manutenção. Quando forem identificadas intervenções capazes de alterar de forma relevante a conectividade ou os fluxos da rede de transportes, seus possíveis efeitos poderão ser considerados com base nos resultados das simulações desenvolvidas nos demais produtos do PLI-SP 2050.

8 MOBILIDADE E DESENVOLVIMENTO DO SETOR AÉREO

A ampliação das opções de deslocamento e a melhoria da conectividade regional envolvem modos de transporte com funções e escalas distintas. Nos contatos setoriais, destacaram-se o fortalecimento da infraestrutura cicloviária e o melhor aproveitamento do sistema aeroportuário paulista. Esses temas se relacionam às condições de acesso da população aos serviços de transporte, à integração entre redes e às oportunidades de desenvolvimento econômico e turístico nos municípios.

Este capítulo aborda, de um lado, o apoio ao Plano Cicloviário do Estado de São Paulo e às rotas cicloturísticas e religiosas, considerando a continuidade dos percursos, a segurança nas interfaces com rodovias e a integração com o transporte coletivo. De outro, examina estratégias para o desenvolvimento do setor aéreo, com atenção à concentração da demanda nos principais aeroportos, à capacidade de expansão de Viracopos, à acessibilidade terrestre e à utilização dos aeroportos regionais. A análise contempla também os instrumentos de incentivo à oferta de serviços aéreos e suas condições de continuidade e efetividade.

As propostas são examinadas conforme as necessidades específicas de cada modo e sua contribuição para a conectividade do território paulista. Os encaminhamentos distinguem as intervenções passíveis de avaliação na rede de transportes, no Produto D-12, das medidas que exigem aprofundamento econômico, institucional ou regulatório no Produto D-14, estabelecendo a relação entre infraestrutura, oferta de serviços e condições de acesso.

8.1 Apoio ao plano cicloviário do ESP, rotas ciclo turísticas e religiosas

a) Contextualização

O apoio ao Plano Cicloviário do Estado de São Paulo insere a bicicleta no planejamento da mobilidade e da infraestrutura regional. A política possui base normativa na Lei Estadual nº 10.095, de 26 de novembro de 1998, que instituiu o Plano Cicloviário do Estado, e no Decreto Estadual nº 63.881, de 3 de dezembro de 2018, que regulamentou sua implementação.

O Plano estabelece uma referência para a articulação de ciclovias, ciclofaixas, ciclorrotas e demais estruturas destinadas à circulação segura de bicicletas. Sua abrangência ultrapassa os deslocamentos estritamente urbanos, alcançando ligações intermunicipais, acessos a sistemas de transporte coletivo, rodovias estaduais, estradas vicinais e rotas utilizadas para turismo, lazer e atividades religiosas.

No âmbito do PLI-SP 2050, o apoio ao Plano Cicloviário deve concentrar-se nas conexões de alcance regional e nas interfaces da bicicleta com a infraestrutura sob responsabilidade estadual. A organização da circulação cicloviária interna aos municípios permanece associada aos respectivos planos de mobilidade, enquanto o planejamento estadual pode contribuir para superar descontinuidades entre redes municipais, tratar trechos rodoviários críticos e integrar as rotas aos sistemas metropolitanos e regionais de transporte.

Diferentes funções da bicicleta no território paulista

O uso da bicicleta atende a finalidades distintas. Em áreas urbanas e metropolitanas, ela participa dos deslocamentos cotidianos para trabalho, educação, comércio e acesso ao transporte coletivo. Em áreas rurais e intermunicipais, pode constituir uma alternativa de mobilidade para comunidades com oferta limitada de transporte público. Em outras regiões, está associada ao cicloturismo, ao turismo de aventura e às rotas religiosas.

Essas funções exigem soluções diferentes. Os deslocamentos cotidianos dependem de continuidade, segurança, iluminação, travessias adequadas e integração com os destinos. As rotas turísticas e religiosas necessitam de sinalização, pontos de apoio, informações ao usuário

e articulação com serviços locais. Em estradas rurais, também devem ser consideradas as condições do pavimento, a disponibilidade de acostamentos e as distâncias entre locais de apoio.

Por isso, a simples representação de uma rota em um mapa não significa que exista infraestrutura adequada para sua utilização. É necessário distinguir ciclovias segregadas, ciclofaixas, ciclorrotas compartilhadas, estradas rurais de baixo volume e trechos nos quais os ciclistas circulam pelo acostamento ou pela própria faixa de rolamento.

Fragmentação e descontinuidade da infraestrutura

A infraestrutura cicloviária existente foi implantada por diferentes agentes e em momentos distintos. Municípios, concessionárias rodoviárias e órgãos estaduais desenvolveram trechos com padrões, finalidades e níveis de continuidade variados. Como resultado, determinadas regiões possuem segmentos isolados que não formam uma rede funcional.

As descontinuidades costumam ocorrer nos limites municipais, em pontes, viadutos, interseções, acessos rodoviários e travessias de barreiras naturais ou de grandes infraestruturas. Esses pontos podem impedir a utilização cotidiana da rota ou obrigar o ciclista a compartilhar trechos de maior velocidade com automóveis e veículos pesados.

O problema assume dimensão regional quando uma ligação depende de infraestrutura sob responsabilidade de mais de um município ou quando a continuidade exige intervenção em uma rodovia estadual. Nesses casos, o Estado pode exercer papel de coordenação, estabelecer padrões e compatibilizar os investimentos municipais com obras rodoviárias e contratos de concessão.

Interface com as rodovias e segurança viária

A convivência entre bicicletas e tráfego rodoviário constitui um dos principais desafios. Em diversas regiões, ciclistas utilizam rodovias e estradas vicinais porque não há rotas locais alternativas ou porque esses eixos oferecem as conexões mais diretas entre municípios, bairros, áreas rurais e locais de trabalho.

A diferença de velocidade e massa entre bicicletas e veículos motorizados amplia a gravidade potencial dos acidentes. O risco aumenta em segmentos sem acostamento, com visibilidade limitada, curvas, pontes estreitas, interseções, tráfego intenso de caminhões ou velocidades elevadas. A circulação em grupos, comum no lazer, no cicloturismo e nas peregrinações religiosas, também produz necessidades específicas de sinalização e gestão.

O apoio ao Plano Cicloviário deve estar articulado às estratégias de segurança viária. Os dados de acidentes podem indicar trechos prioritários e apoiar a escolha entre segregação física, adequação de acostamentos, sinalização, redução de velocidade, melhoria das travessias ou criação de rota alternativa. A solução deverá considerar o tipo de uso e as condições do corredor, evitando a aplicação de um padrão único a contextos distintos.

Os projetos de novas rodovias, duplicações, marginais, pontes e viadutos também representam oportunidade para incorporar infraestrutura cicloviária desde a concepção. A inclusão posterior tende a ser mais complexa e onerosa, especialmente quando a obra não preserva espaço ou condições estruturais para a circulação segura de bicicletas.

Cicloturismo e rotas religiosas

São Paulo possui rotas associadas ao cicloturismo, às peregrinações religiosas e ao turismo de aventura. Essas atividades podem articular atrativos naturais, patrimônio histórico, estabelecimentos rurais, hospedagem, alimentação e comércio local, criando oportunidades de geração de renda em municípios de diferentes portes.

A consolidação dessas rotas depende de condições que vão além da paisagem ou da tradição cultural. É necessário garantir continuidade, orientação, segurança, pontos de descanso, acesso a água, assistência mecânica e comunicação com os serviços de emergência. Também devem ser consideradas a dificuldade do percurso, as condições climáticas, a circulação de veículos motorizados e a capacidade de atendimento dos municípios.

As rotas turísticas podem utilizar diferentes tipos de infraestrutura, incluindo estradas rurais de baixo tráfego, vias municipais, rodovias e ciclovias segregadas. O planejamento deve informar claramente essas condições para que o usuário compreenda o nível de segurança e dificuldade de cada trecho.

A articulação com a Secretaria de Turismo e Viagens pode contribuir para identificar os itinerários com maior potencial e associar as melhorias de infraestrutura às políticas de desenvolvimento regional. Entre as referências mencionadas nos materiais estão rotas religiosas em Iguape, percursos de aventura na região de Eldorado e a Rota Márcia Prado.

Integração com o transporte coletivo

A bicicleta pode ampliar a área atendida por estações e terminais, funcionando como modo de acesso e continuidade da viagem. Essa integração depende de rotas seguras até os pontos de embarque, bicicletários, regras para transporte da bicicleta e disponibilidade de informações ao usuário.

Nos sistemas ferroviários, a possibilidade de embarque com bicicletas pode apoiar viagens de lazer e deslocamentos cotidianos, desde que as regras sejam compatíveis com a capacidade e os períodos de maior demanda. Nos terminais rodoviários e estações de transporte metropolitano, bicicletários seguros podem ampliar as alternativas de acesso sem exigir o transporte da bicicleta no veículo.

As futuras linhas ferroviárias e os projetos de transporte regional representam oportunidade para planejar essa integração desde a implantação. A conexão com os sistemas TIC, TIM e VLT deverá considerar tanto a infraestrutura nas estações quanto a continuidade das rotas cicloviárias no entorno.

Bases disponíveis e necessidade de consolidação

Os materiais analisados indicam a existência de diferentes bases e levantamentos que podem apoiar o planejamento. Entre eles estão os mapas municipais, os projetos cicloviários incluídos em concessões rodoviárias, os levantamentos associados ao Plano da Baixada Santista, as informações do CyclOSM e as contribuições de órgãos estaduais e municípios.

Essas fontes possuem objetivos, escalas e níveis de atualização distintos. Antes de utilizá-las como representação da rede, será necessário verificar a existência efetiva da infraestrutura, seu tipo, estado de conservação e continuidade. Também deverá ser distinguida a infraestrutura existente daquela apenas planejada ou contratada.

A consolidação deverá classificar os trechos como ciclovia segregada, ciclofaixa, ciclorrota compartilhada, acostamento utilizado por ciclistas ou rota rural. Essa classificação permitirá identificar vazios, conexões ausentes e segmentos nos quais o risco exige tratamento prioritário.

Papel do Estado e problema de planejamento

O papel estadual envolve coordenação, padronização, integração de informações e tratamento das interfaces com sua própria infraestrutura. Também inclui a articulação entre municípios, concessionárias, órgãos metropolitanos e áreas responsáveis por transporte, desenvolvimento urbano, turismo e segurança viária.

O problema de planejamento consiste em transformar uma coleção de trechos, rotas e iniciativas em uma rede regional coerente. Para isso, será necessário identificar quais ligações atendem deslocamentos cotidianos, que possuem função turística ou religiosa, onde existem descontinuidades e quais intervenções dependem da atuação do Estado.

A priorização deverá combinar demanda potencial, segurança, continuidade da rede, integração com o transporte coletivo, alcance territorial, potencial turístico e viabilidade de implantação. O apoio ao Plano Cicloviário poderá, assim, orientar investimentos e incorporar a mobilidade por bicicleta aos demais projetos do PLI-SP 2050, respeitando as diferentes funções que o modo desempenha no território paulista.

b) Análise

Para a identificação preliminar da infraestrutura cicloviária existente, foi utilizada como referência a base cartográfica do OpenStreetMap (OSM). A partir dessa base, foram selecionadas as *tags* associadas à infraestrutura cicloviária, permitindo isolar as feições correspondentes e sistematizar os atributos disponíveis para qualificação dos diferentes segmentos. Esse procedimento possibilitou constituir uma primeira representação espacial da infraestrutura cadastrada, a ser posteriormente submetida à verificação e complementação.

Como referência adicional, foi incorporada a base georreferenciada disponibilizada pelo Município de São Paulo pela CET, que apresenta maior nível de detalhamento para a caracterização de sua rede cicloviária. Também foi realizada uma comparação inicial com os sistemas e redes cicloviárias previstos nos instrumentos de planejamento, especificamente Plano Diretor, das maiores cidades do Estado, com o objetivo de identificar divergências, lacunas e informações complementares em relação aos registros provenientes do OSM.

A consolidação dessas diferentes fontes permite reduzir as limitações associadas ao uso isolado de bases colaborativas e estabelecer uma representação preliminar mais consistente da infraestrutura cicloviária. Entretanto, os resultados ainda deverão ser tratados como uma base inicial de planejamento, distinguindo-se a infraestrutura efetivamente implantada daquela prevista nos instrumentos municipais e daquelas feições cuja existência, tipologia ou condição operacional ainda necessitem de validação.

c) Encaminhamento

A partir dos dados consolidados no levantamento, será estruturado um painel cartográfico interativo, destinado à consulta e divulgação das informações sobre a infraestrutura e as rotas cicloviárias do Estado. A ferramenta deverá permitir a visualização territorial e facilitar a identificação de conexões, descontinuidades e áreas de interesse, constituindo uma referência para o acompanhamento da rede e para o desenvolvimento de políticas públicas relacionadas à ciclo mobilidade.

O painel também deverá incorporar as **rotas de interesse turístico validadas pela Secretaria de Turismo e Viagens do Estado de São Paulo (SETUR)**, permitindo relacionar a infraestrutura cicloviária às atividades de turismo, lazer e desenvolvimento regional. A integração dessas informações poderá apoiar a identificação de percursos prioritários, conexões com atrativos e municípios e trechos nos quais melhorias de infraestrutura, sinalização ou segurança possam ampliar as condições de utilização das rotas.

A disponibilização dos resultados em ambiente de acesso público permitirá ampliar a transparência das informações e estabelecer uma base comum para a atuação dos diferentes agentes envolvidos. Além de subsidiar o planejamento estadual, a ferramenta poderá apoiar municípios e demais órgãos responsáveis pela infraestrutura e mobilidade na identificação de oportunidades de integração entre redes, na avaliação de demandas e na formulação de projetos. A base deverá ser entendida como instrumento passível de atualização, acompanhando a implantação de novas infraestruturas e o aperfeiçoamento das informações disponíveis.

O aprofundamento da análise deverá ocorrer por meio da elaboração do **Plano Cicloviário do Estado de São Paulo**, previsto e regulado respectivamente pela Lei Estadual nº 10.095, de 26 de novembro de 1998, e no Decreto Estadual nº 63.881, de 3 de dezembro de 2018, que será capaz de articular as informações sobre oferta, demanda, segurança viária, conectividade, integração com outros modos de transporte e potencial turístico, estabelecendo critérios para a formação de uma rede cicloviária estadual coerente e para a priorização das intervenções.

A elaboração do Plano deverá apresentar metodologia, análise e propostas utilizando como insumos o levantamento preliminar, um **Estudo Técnico Preliminar** e **Termo de Referência** preparados para a estruturação da base de conhecimento de demanda e oferta cicloviária. A partir desses elementos, será possível avançar da identificação e organização das informações existentes para a avaliação sistemática das necessidades, definição de prioridades, proposição de soluções, estimativa dos investimentos e estabelecimento dos arranjos institucionais necessários à implantação e ao acompanhamento da política cicloviária estadual.

8.2 Estratégias para o desenvolvimento do setor aéreo no ESP

a) Contextualização

O Estado de São Paulo possui o principal sistema aeroportuário do país, formado por grandes aeroportos nacionais e internacionais e por uma rede de unidades regionais com diferentes funções e níveis de demanda. Guarulhos, Congonhas e Viracopos concentram grande parte dos passageiros e das cargas, enquanto os aeroportos do interior apoiam a conectividade regional, o turismo, as viagens de negócios, a aviação geral e atividades econômicas específicas.

O desenvolvimento do setor aéreo não depende apenas da expansão da infraestrutura. A manutenção de voos regulares exige demanda suficiente, frequências adequadas, aeronaves compatíveis e integração com a malha das companhias aéreas. A viabilidade de uma rota está relacionada à área de influência do aeroporto e à possibilidade de conexão com hubs que ofereçam acesso a outros destinos. No território paulista, a qualidade da rede rodoviária também reduz a vantagem do transporte aéreo em diversas viagens de curta e média distância.

Os aeroportos regionais apresentam condições distintas. Algumas unidades possuem demanda consolidada, enquanto outras enfrentam baixa utilização, descontinuidade de voos ou limitações de infraestrutura. Pistas, pátios, terminais, equipamentos de navegação, sistemas de segurança e acessos terrestres podem restringir a operação. A prioridade dos investimentos deve, portanto, resultar da identificação do fator que efetivamente impede a ampliação ou a regularidade dos serviços.

A conectividade regional é sensível às decisões comerciais das companhias aéreas e aos instrumentos públicos de incentivo. Eventuais incentivos deverão estar vinculados a resultados verificáveis, como frequência mínima, regularidade, permanência da rota e ampliação efetiva da conectividade, evitando apenas transferir passageiros entre aeroportos.

No transporte de cargas, Guarulhos e Viracopos concentram as operações em razão da conectividade, das instalações especializadas e da integração com cadeias nacionais e internacionais. Os aeroportos regionais tendem a movimentar cargas principalmente nos porões dos voos de passageiros. Sua utilização logística depende da existência de produtos de maior valor ou urgência, de frequência regular e de integração com centros de distribuição e acessos rodoviários.

O problema de planejamento consiste em identificar quais intervenções ampliam efetivamente a conectividade e a eficiência do sistema aeroviário paulista. A estratégia deve priorizar o aproveitamento da infraestrutura existente, a correção de restrições comprovadas e o

fortalecimento de rotas sustentáveis. Novos aeroportos ou grandes ampliações somente devem avançar quando produzirem benefícios e apresentarem demanda compatível.

O planejamento estadual também deverá considerar a interação entre aeroportos próximos, os efeitos sobre as concessões, a integração com rodovias e transporte coletivo e a compatibilidade com as diretrizes federais do setor. Essa abordagem permitirá orientar o desenvolvimento da aviação regional, de passageiros e de cargas sem criar capacidade ociosa ou investimentos sobrepostos.

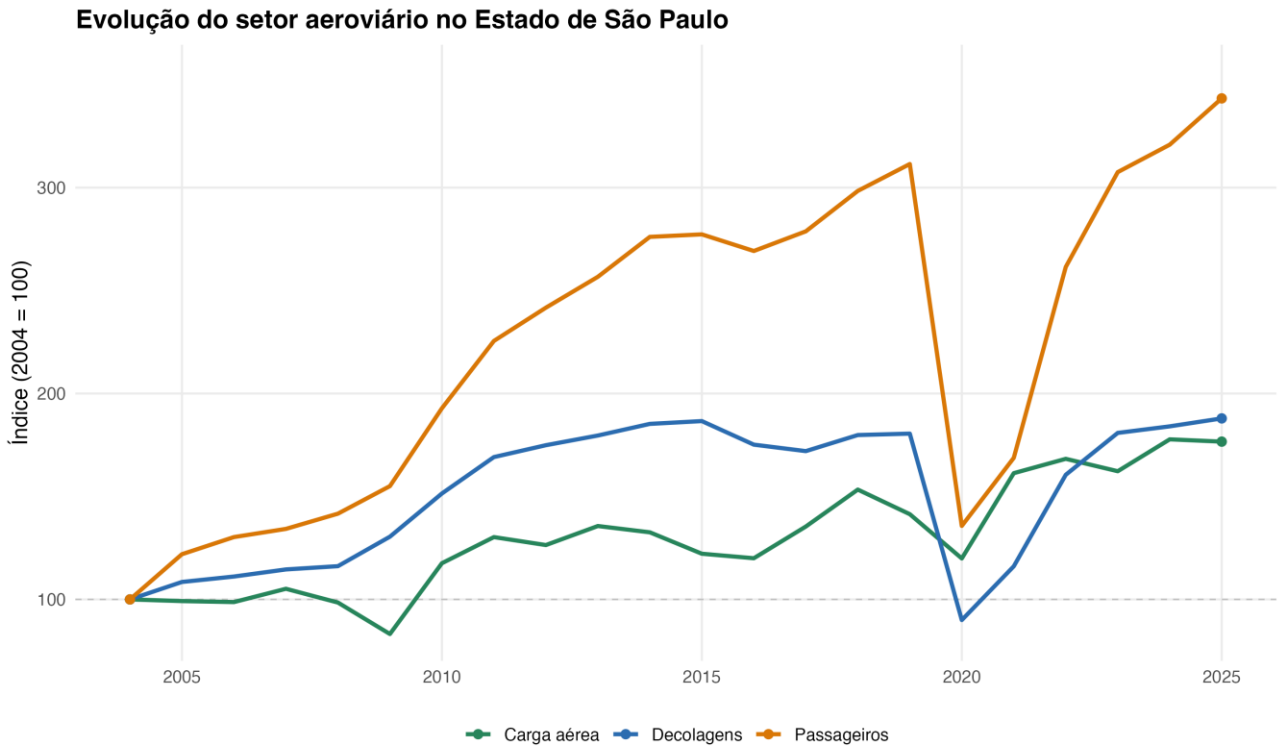
No horizonte do PLI-SP 2050, o problema consiste em definir como o Estado pode fortalecer a conectividade aérea, aproveitar melhor a infraestrutura existente e apoiar o desenvolvimento econômico regional sem estimular investimentos redundantes ou criar capacidade aeroportuária dissociada da demanda.

b) Análise

A análise do setor aéreo paulista indica que o principal problema não é uma insuficiência generalizada de capacidade, mas a distribuição desigual da demanda entre os aeroportos. Guarulhos e Congonhas operam com níveis elevados de utilização, enquanto Viracopos e a maior parte dos aeroportos regionais apresentam capacidade disponível.

Essa configuração resulta de uma trajetória prolongada de expansão da atividade aérea. Entre 2004 e 2025, a movimentação de passageiros no Estado de São Paulo cresceu, em média, 6,1% ao ano, enquanto o número de decolagens aumentou 3,0% ao ano e a movimentação de cargas, 2,7%. A diferença entre o crescimento dos passageiros e das decolagens indica aumento da capacidade média das aeronaves, dos fatores de ocupação e da eficiência operacional. Apesar da retração excepcional ocorrida durante a pandemia, a série histórica evidencia uma tendência de crescimento da demanda.

Figura 8-1: Evolução do setor aeroviário no Estado de São Paulo.



Fonte: ANAC. Elaboração: Consorcio Concremat-Transplan.

Em 2024, Guarulhos movimentou aproximadamente 43,5 milhões de passageiros, equivalentes a 77,3% de sua capacidade estimada de 56,3 milhões. Congonhas movimentou cerca de 23,3 milhões de passageiros, correspondentes a 79,2% de sua capacidade estimada. Os dois aeroportos se aproximavam, portanto, do patamar de 85% adotado pelo estudo como referência para o início de uma condição de pressão operacional.

Viracopos apresentava situação distinta. O aeroporto movimentou aproximadamente 12,5 milhões de passageiros diante de uma capacidade declarada de 25 milhões, correspondente a 50% de utilização. No transporte de cargas, processou cerca de 331,8 mil toneladas diante de uma capacidade declarada de um milhão de toneladas por ano, equivalente a 33,2%. Esses resultados mostram que o aeroporto dispõe de margem expressiva para receber passageiros e cargas sem necessidade imediata de ampliação do terminal existente.

Os aeroportos regionais também apresentam, em sua maioria, níveis reduzidos de utilização. Embora algumas unidades desempenhem funções importantes para suas áreas de influência, a concentração dos fluxos permanece elevada. Em 2025, Guarulhos, Congonhas e Viracopos responderam conjuntamente por 97,6% dos passageiros e 99,5% das cargas movimentadas no Estado.

Tabela 8-1: Movimentação aeroviária no Estado de São Paulo (2025).

ICAO	Aeroporto	Decolagens (%)	Passageiros (%)	Carga – Ton. (%)
SBGR	Guarulhos	142.293 (46,3%)	47.028.928 (54,2%)	694.675,9 (66,5%)
SBSP	Congonhas	92.941 (30,2%)	24.562.781 (28,3%)	51.283,3 (4,9%)
SBKP	Viracopos	59.616 (19,4%)	13.082.574 (15,1%)	294.028,6 (28,1%)
SBSR	São José do Rio Preto	4.623 (1,5%)	916.870 (1,1%)	714,9 (0,1%)
SBRP	Ribeirão Preto	4.198 (1,4%)	720.274 (0,8%)	1.036,8 (0,1%)
SBDN	Presidente Prudente	1.285 (0,4%)	258.424 (0,3%)	365,3 (<0,1%)
SBAU	Araçatuba	582 (0,2%)	95.424 (0,1%)	128,2 (<0,1%)
SBAE	Bauru	530 (0,2%)	71.133 (0,1%)	30,4 (<0,1%)
SBSJ	São José dos Campos	384 (0,1%)	38.069 (<0,1%)	2.954,8 (0,3%)
—	Demais aeroportos*	1.054 (0,3%)	31.888 (<0,1%)	34,4 (<0,1%)
	Total	**307.506**	**86.806.365**	**1.045.252,6**

ICAO	Aeroporto	Decolagens (%)	Passageiros (%)	Carga – Ton. (%)
		(100%)	**(100%)**	**(100%)**

*Nota: *Os dados abrangem voos regulares e não regulares realizados em 2025. Inclui Marília, Araraquara, Barretos, Franca, Sorocaba, São Roque, Bragança Paulista, Jundiaí, Campo de Marte e São Carlos. Valores inferiores a 0,05% são apresentados como "<0,1%".*

Fonte: ANAC. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

A estratégia estadual deve, portanto, combinar a prevenção da saturação de Guarulhos e Congonhas com o aproveitamento da capacidade disponível em Viracopos e a ativação seletiva dos aeroportos regionais.

Projeções de demanda e pressão futura sobre Guarulhos e Congonhas

As projeções elaboradas para o setor indicam crescimento da demanda ao longo do horizonte do PLI-SP 2050. A expansão econômica e demográfica tende a aumentar o número de passageiros, ainda que o ritmo futuro permaneça sujeito a variações de renda, preços das passagens, oferta das companhias e condições macroeconômicas.

As projeções de passageiros para Guarulhos, Congonhas e Viracopos foram elaboradas para o período de 2025 a 2050 por meio de uma abordagem que combina análise econométrica, projeções econômicas e demográficas, capacidade aeroportuária e resposta da demanda às variações das tarifas. A metodologia evita a simples extrapolação das taxas históricas, que poderia superestimar o crescimento ao reproduzir até 2050 efeitos específicos de expansão da infraestrutura, abertura de rotas e redistribuição de passageiros entre os aeroportos.

Os dados de passageiros foram obtidos na base de movimentação da aviação civil da ANAC, considerando voos regulares e não regulares. As séries de população e atividade econômica foram obtidas das projeções utilizadas no Produto D-9, incluindo os cenários Tendencial e Estatístico do PIB e a projeção populacional municipal do IBGE. Os valores municipais foram agregados para o Estado de São Paulo, permitindo construir séries anuais de população, PIB real e PIB real por habitante. Para a estimação das relações históricas, foram utilizados os anos com informações simultaneamente disponíveis a partir de 2002.

A demanda foi projetada inicialmente para o conjunto formado por Guarulhos, Congonhas e Viracopos. Essa opção reduz o risco de interpretar mudanças passadas na participação de cada aeroporto como tendências permanentes. O crescimento potencial do sistema foi estimado a partir da evolução da população e do PIB real por habitante, utilizando elasticidades calibradas com base nos resultados econométricos[167]. Também foi aplicado um limite para que o crescimento acumulado dos passageiros não ultrapassasse o crescimento acumulado do PIB real paulista, evitando trajetórias excessivamente expansivas no longo prazo.

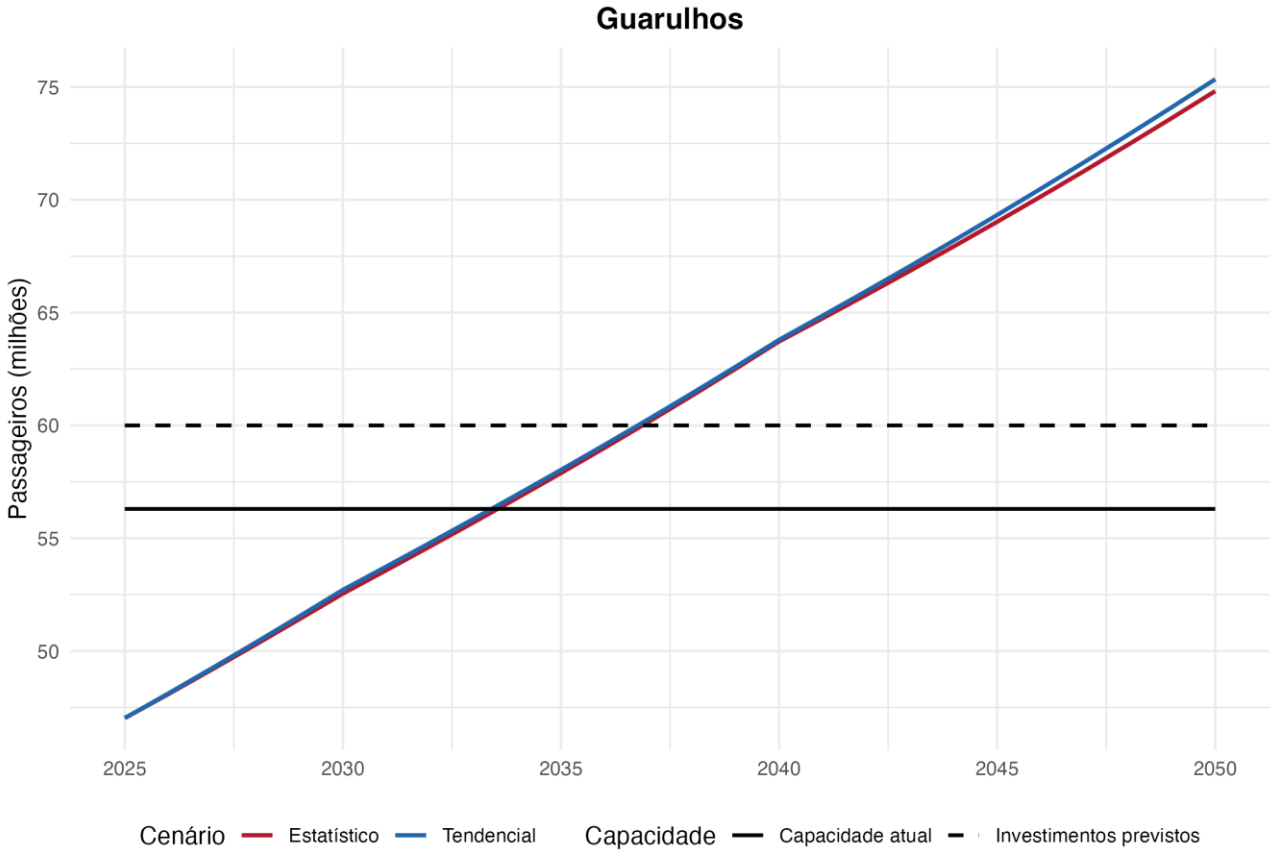
Após a projeção agregada, a demanda foi distribuída entre os três aeroportos com base em suas participações no ano de 2025. Os resultados foram comparados com a capacidade atual e com os acréscimos previstos nos investimentos aeroportuários. O patamar de 85% da capacidade foi utilizado como indicador de pressão operacional, enquanto 100% representam o esgotamento da capacidade considerada[168]. Quando a demanda potencial ultrapassa a oferta de slots e assentos, o modelo utiliza uma elasticidade-preço de –0,73 para estimar o aumento real das tarifas necessário ao equilíbrio e a parcela da demanda que deixa de ser atendida. Esse índice

[167] IATA (2026). Long-Term Air Transport Passenger Demand Projections.
[168] As estimativas de capacidade operacional dos aeroportos consideradas nesta análise foram obtidas do Produto D-6, que constitui a referência técnica adotada para a caracterização da infraestrutura aeroportuária atual e dos investimentos previstos.

não corresponde a uma previsão do preço nominal das passagens, mas a uma medida da pressão econômica provocada pela restrição de capacidade.

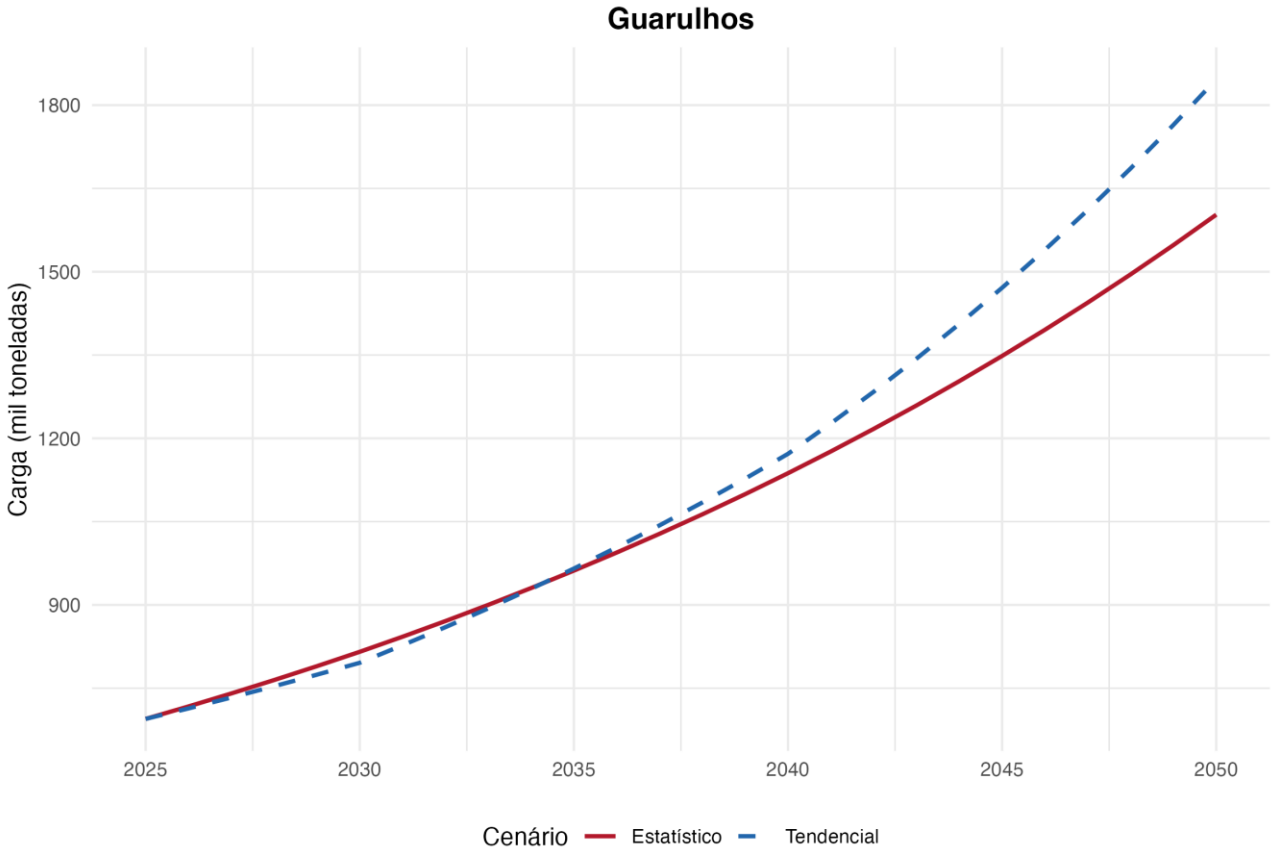
Guarulhos deverá ampliar sua capacidade para aproximadamente 60 milhões de passageiros por ano após a conclusão dos investimentos previstos. As intervenções em píeres, pátios, posições de aeronaves, pistas de taxiamento e sistemas de processamento poderão ampliar a eficiência, mas a configuração das pistas continuará constituindo uma restrição estrutural. A expansão contratada posterga a saturação, mas não elimina a necessidade de acompanhamento e de distribuição mais equilibrada da demanda.

Figura 8-2: Projeção de Demanda – Passageiros – GRU.



Fonte: Anac. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

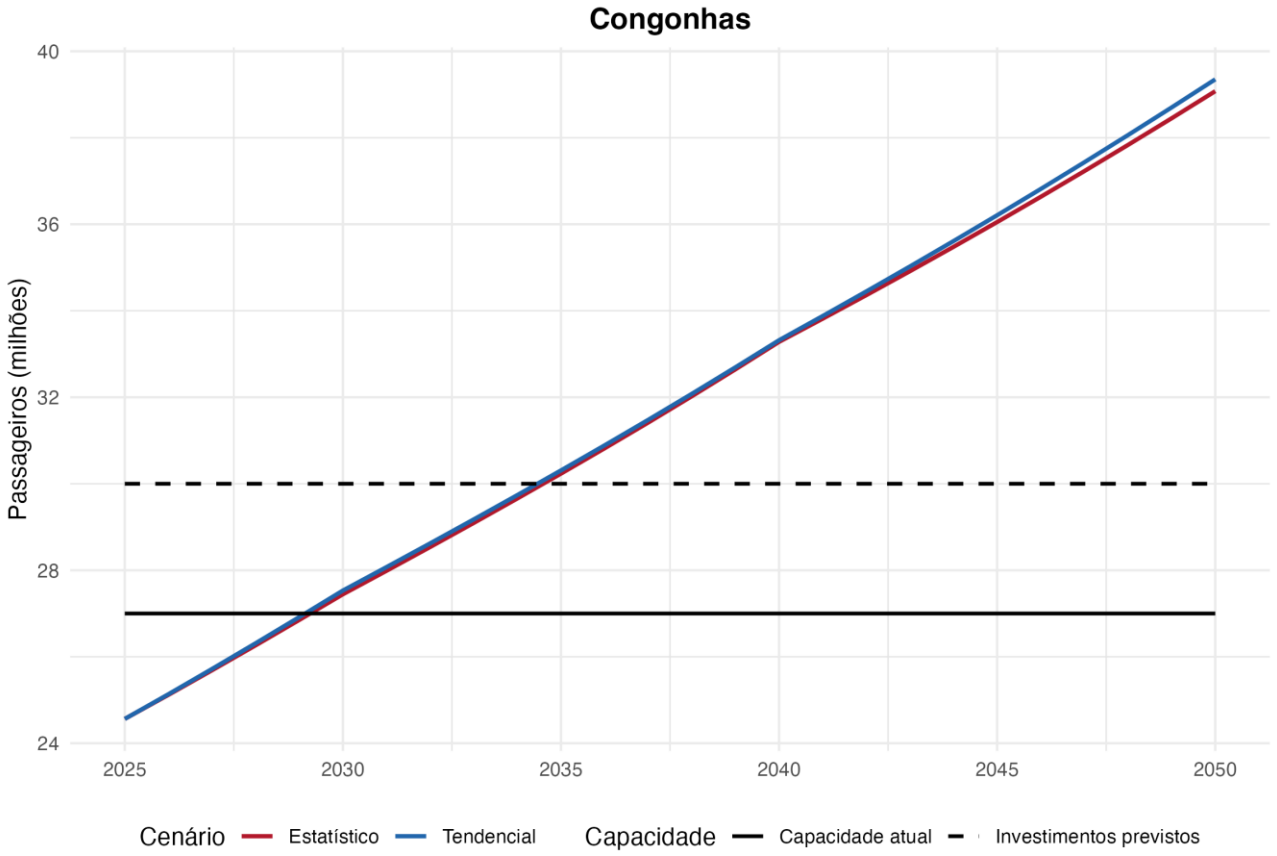
Figura 8-3: Projeção de Demanda – Carga – GRU.



Fonte: Anac. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

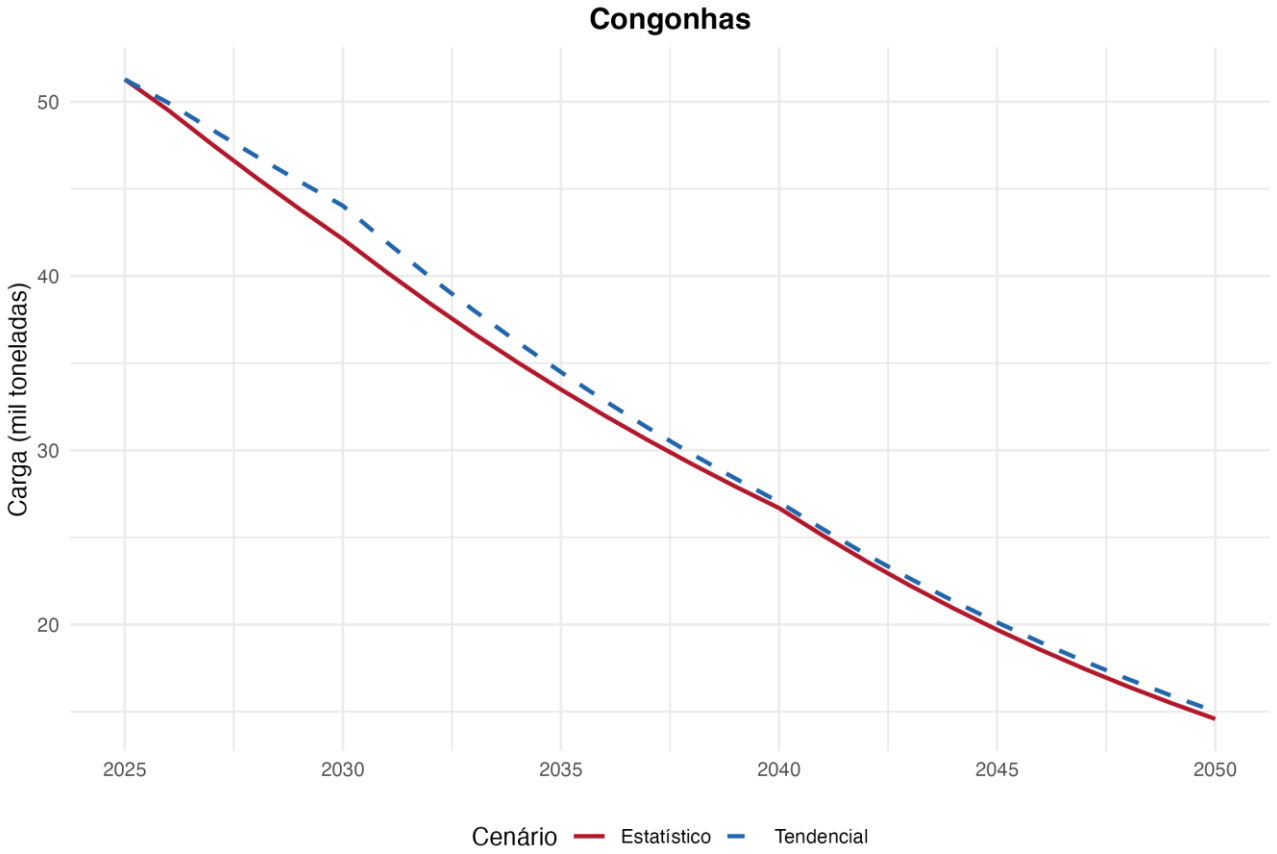
Em Congonhas, as obras previstas deverão elevar a capacidade para aproximadamente 30 milhões de passageiros por ano. As limitações territoriais e operacionais do aeroporto restringem novas expansões após esse ciclo. Assim, o crescimento da demanda tende a aumentar a pressão sobre os slots e sobre as tarifas caso a oferta não consiga acompanhar o número potencial de viagens.

Figura 8-4: Projeção de Demanda – Passageiros – Congonhas.



Fonte: Anac. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Figura 8-5: Projeção de Demanda – Cargas – Congonhas.



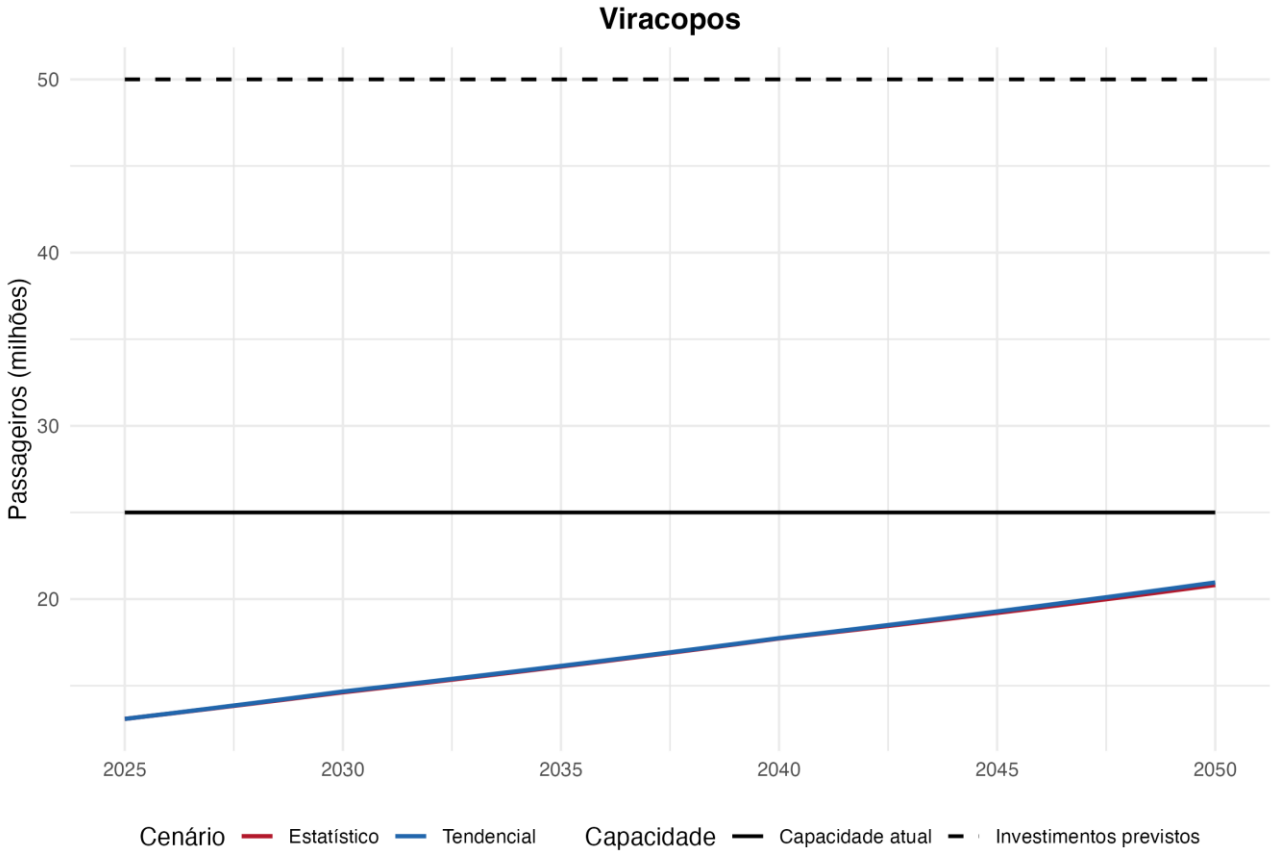
Fonte: Anac. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Quando a capacidade se torna vinculante, parte do ajuste pode ocorrer por aumento dos preços das passagens. A demanda potencial deixa de ser atendida integralmente, gerando uma parcela reprimida. Esse efeito tende a atingir de forma mais intensa os passageiros sensíveis ao preço e reforça a necessidade de aproveitar aeroportos alternativos antes da implantação de nova capacidade em áreas já congestionadas.

Viracopos como alternativa para a expansão da demanda

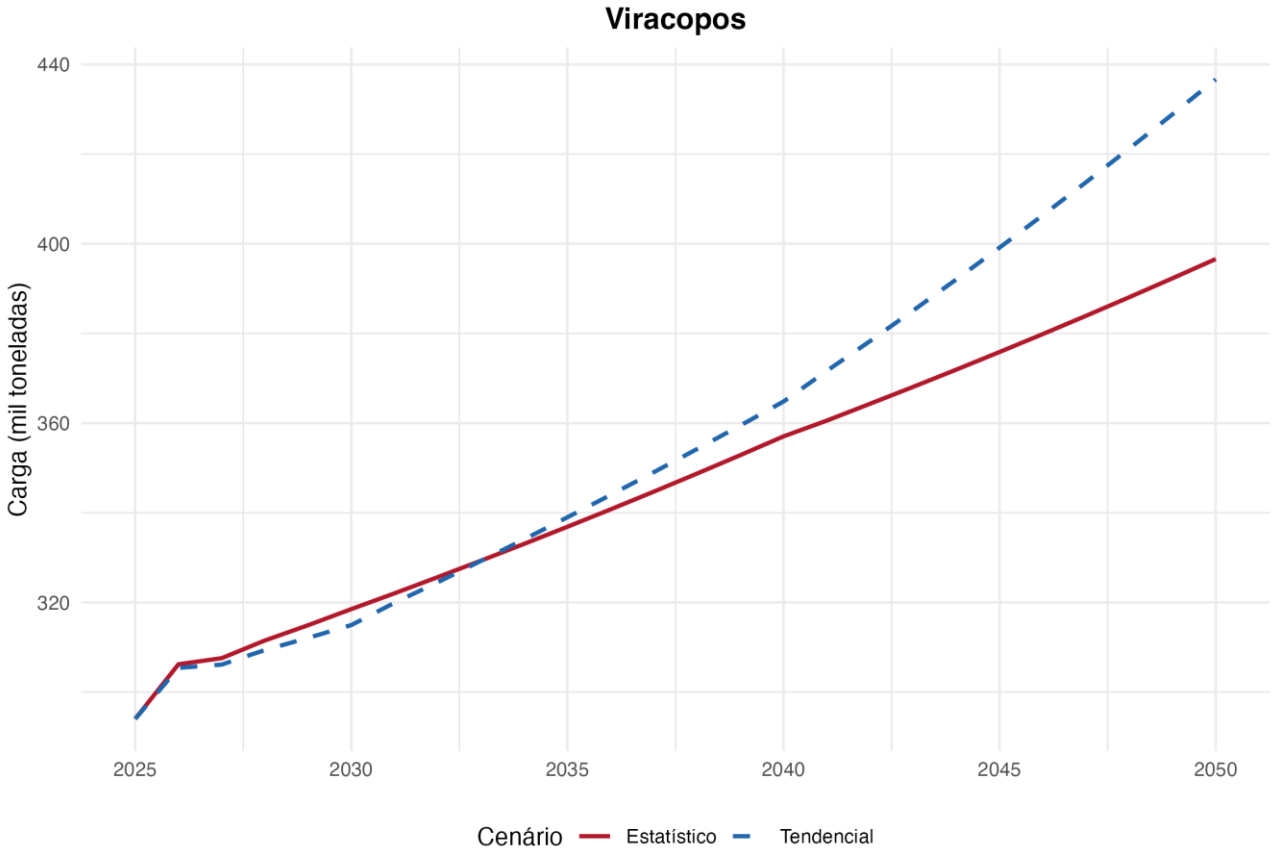
Viracopos ocupa posição central na estratégia de desconcentração. Sua capacidade disponível, a infraestrutura cargueira, a proximidade de polos industriais e tecnológicos e a localização no interior da Macrometrópole Paulista permitem que o aeroporto absorva parte do crescimento que não poderá ser atendido por Guarulhos e Congonhas.

Figura 8-6: Projeção de Demanda – Passageiros – Campinas



Fonte: Anac. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Figura 8-7: Projeção de Demanda – Cargas – Campinas.



Fonte: Anac. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

O principal desafio de curto e médio prazo não consiste na ampliação do terminal de passageiros, mas na ativação da capacidade existente. Para isso, devem ser enfrentadas as limitações de acesso terrestre, a integração insuficiente com a rede metropolitana e regional de transporte e a necessidade de ampliar sua conectividade aérea.

A utilização de Viracopos depende da comparação do tempo total da viagem. Para passageiros da Região Metropolitana de São Paulo, o aeroporto somente se tornará uma alternativa mais competitiva se o deslocamento terrestre for confiável e integrado. Para os moradores e empresas do interior, a ampliação das rotas diretas e das conexões pode reduzir a necessidade de deslocamento até os aeroportos da capital.

No transporte de cargas, Viracopos já dispõe de instalações especializadas e capacidade ociosa. O aumento de sua utilização dependerá da integração com centros produtivos, terminais logísticos e redes de distribuição. A melhoria dos acessos rodoviários e a implantação de soluções para o abastecimento de combustíveis sustentáveis podem fortalecer essa função.

Segunda pista e expansão futura de Viracopos

A segunda pista de Viracopos deve ser tratada como investimento de longo prazo, relacionado à resiliência operacional, à expansão futura e à possibilidade de segregação de fluxos. Ela não constitui resposta a um gargalo atual no processamento de passageiros.

As premissas utilizadas na nota técnica consideram início das obras a partir de 2030 e conclusão em 2034. A ampliação poderá elevar substancialmente a capacidade do complexo e permitir

novos terminais ou maior especialização das operações de carga. O cronograma deverá ser condicionado à evolução efetiva da demanda e aos gatilhos do contrato de concessão.

A nota técnica apresenta referências distintas para a capacidade futura, com valores de 40 milhões e 50 milhões de passageiros por ano após 2034. Essa premissa deverá ser consolidada junto à ANAC, ao Ministério de Portos e Aeroportos e à concessionária antes da utilização definitiva nas projeções. Independentemente do valor adotado, a expansão reforça o potencial de Viracopos para absorver parte do crescimento do sistema paulista.

Acessibilidade terrestre a Viracopos

A melhoria dos acessos constitui condição para elevar a utilização do aeroporto. A infraestrutura aeroportuária disponível perde parte de sua vantagem quando passageiros, trabalhadores e cargas enfrentam congestionamentos ou percursos pouco integrados para chegar ao terminal.

Entre os projetos relacionados ao acesso a Viracopos encontram-se a duplicação da Rodovia Miguel Melhado, no trecho entre Vinhedo e o aeroporto, e a duplicação do viaduto sobre a Rodovia Santos Dumont, na continuidade da SP-324. Também foi identificada a necessidade de avaliar um novo dispositivo na continuidade da SP-083, capaz de apoiar a construção da segunda pista e, posteriormente, separar o acesso das cargas destinadas aos novos terminais.

A conexão do VLT Campinas com Viracopos poderá ampliar a acessibilidade por transporte coletivo e integrar o aeroporto a Campinas, ao TIC e a outros centros da região metropolitana. Para isso, o traçado, as estações, o padrão de serviço e a integração tarifária deverão ser definidos de modo a atender passageiros e trabalhadores do aeroporto.

Os contornos e as rotas de acesso ao complexo também deverão considerar a separação entre o tráfego urbano, os passageiros e os veículos de carga. A função não é apenas aumentar a capacidade, mas garantir maior confiabilidade e reduzir os conflitos no entorno aeroportuário.

Subutilização dos aeroportos regionais

Os aeroportos regionais cumprem funções de conectividade, turismo, negócios, aviação executiva e atendimento a serviços públicos. Entretanto, a maior parte opera abaixo de sua capacidade. A baixa utilização decorre da combinação entre demanda dispersa, pequena frequência de voos, concorrência do transporte rodoviário e decisões comerciais das companhias aéreas.

A concessão em blocos contribui para manter aeroportos que, isoladamente, poderiam não apresentar equilíbrio financeiro. A Rede VOA administra 16 aeroportos regionais, permitindo gestão integrada e investimentos distribuídos. Esse modelo mantém a infraestrutura disponível, mas não assegura a implantação ou a permanência de rotas regulares.

A ativação de um aeroporto regional deve considerar sua área de influência, a distância até outras unidades, o potencial turístico e econômico, a disponibilidade da infraestrutura e a possibilidade de conexão com hubs. Também é necessário evitar que incentivos apenas transfiram voos entre aeroportos paulistas sem produzir aumento líquido de conectividade.

Guarujá, Registro e Guaratinguetá aparecem como unidades com potencial para políticas de ativação seletiva. Outros aeroportos, como Ourinhos, Olímpia e Bauru, devem ser avaliados conforme sua função regional e a interação com unidades próximas. Novos investimentos precisam ser confrontados com a capacidade existente e com as projeções de demanda, evitando infraestrutura redundante.

Incentivo fiscal sobre o combustível de aviação

A política paulista utiliza a redução do ICMS incidente sobre o querosene de aviação como instrumento para estimular a oferta e preservar operações regionais. A redução da alíquota de

18% para 12% diminui os custos das companhias e pode ser condicionada a contrapartidas, como novas partidas, manutenção de voos, pernoite de aeronaves e atendimento a aeroportos selecionados.

O benefício deve ser compreendido como instrumento de aquisição de conectividade regional, e não apenas como redução tributária concedida ao setor. Seu desenho deve estabelecer metas verificáveis de frequência, capacidade ofertada, permanência mínima das rotas e número de passageiros transportados. A avaliação também deverá identificar a oferta efetivamente adicional, excluindo dos resultados os voos que seriam realizados mesmo sem o incentivo.

A estimativa preliminar do custo fiscal foi elaborada com base no volume de QAV comercializado no Estado de São Paulo e nos preços do combustível observados em 2025. Os volumes mensais, originalmente informados em milhares de metros cúbicos, foram convertidos para litros. A soma das observações mensais resultou em aproximadamente 3,413 bilhões de litros comercializados no ano[169].

Os preços foram obtidos da série semanal de preços do produtor para a Região Sudeste. As observações semanais foram associadas aos respectivos meses e agregadas em médias mensais. Posteriormente, calculou-se o preço médio anual ponderado pelo volume comercializado em cada mês, atribuindo maior peso aos períodos de maior consumo. O resultado foi um preço médio estimado de R$ 3,696 por litro[170].

A multiplicação do volume anual pelo preço médio ponderado resultou em uma base econômica aproximada de R$ 12,61 bilhões. Sobre essa base foram aplicadas separadamente as alíquotas de 18% e 12%. O imposto estimado alcançaria R$ 2,27 bilhões no primeiro caso e R$ 1,51 bilhão no segundo. A diferença, correspondente a seis pontos percentuais, produz um custo fiscal bruto anual de aproximadamente R$ 756,6 milhões, arredondado para R$ 760 milhões.

Com base no volume e nos preços do QAV observados em 2025, custo fiscal bruto de aproximadamente R$ 760 milhões por ano para a diferença entre as alíquotas de 18% e 12%. Trata-se de cálculo estático, que não considera alterações de consumo, crescimento da oferta ou efeitos indiretos sobre a arrecadação e a atividade econômica.

Tabela 8-2: Custo estimado da Renúncia Fiscal com redução de ICMS sobre QAV.

Indicador	Resultado Estimado
Volume anual de QAV	3,413 bilhões de litros
Preço médio ponderado	R$ 3,696 por litro
Valor econômico estimado das operações	R$ 12,61 bilhões
ICMS estimado à alíquota de 18%	R$ 2,27 bilhões
ICMS estimado à alíquota de 12%	R$ 1,51 bilhão
Custo anual estimado da redução	**R$ 760 milhões**

Fonte: ANAC e ANP. Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

[169] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Painel Dinâmico de Vendas de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis. Dados referentes ao volume comercializado de querosene de aviação (QAV).
[170] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Série semanal de preços do produtor de querosene de aviação (QAV) para a Região Sudeste e Painel Dinâmico de Vendas de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis. Preço médio anual calculado pela ponderação dos preços mensais pelos respectivos volumes comercializados em 2025.

A estimativa é estática e simplificada. Ela pressupõe a manutenção do volume comercializado e do preço médio observados em 2025 após a redução da alíquota. O cálculo não considera eventual aumento do consumo, expansão da oferta de voos, transferência de abastecimento de outros estados para São Paulo ou alteração no preço final decorrente do repasse total ou parcial do benefício.

O valor representa o custo fiscal bruto, e não o impacto líquido sobre as contas públicas. Não foram deduzidos possíveis efeitos indiretos sobre a arrecadação associados ao aumento de passageiros, turismo, empregos, atividade aeroportuária e consumo nas regiões atendidas. Também não foram incorporados créditos tributários ou particularidades da apuração efetiva do imposto.

A efetividade da política deverá ser avaliada por indicadores de custo por resultado, como custo por voo adicional, passageiro adicional, rota criada ou rota preservada. As contrapartidas precisam ser acompanhadas por período mínimo e vinculadas a mecanismos de revisão ou reversão do benefício em caso de descumprimento.

O Produto D-14 deverá aprofundar a avaliação econômica, fiscal e jurídica, incorporar possíveis respostas das companhias aéreas e considerar a transição da reforma tributária. Essa análise deverá verificar em que medida o incentivo amplia a conectividade líquida do Estado, em vez de apenas transferir voos entre aeroportos paulistas, e subsidiar a definição de instrumentos que possam substituir o ICMS quando esse mecanismo deixar de estar disponível.

Reforma tributária e necessidade de novos instrumentos

A substituição do ICMS no processo de reforma tributária reduzirá a possibilidade de utilizar esse imposto como instrumento estadual permanente de incentivo à aviação. A política atual poderá cumprir função durante o período de transição, mas o Estado deverá preparar mecanismos capazes de substituí-la.

Uma alternativa consiste na criação de fundos ou programas de apoio temporário às rotas regionais selecionadas. Esses instrumentos poderão financiar a aquisição de conectividade, desde que possuam dotação definida, critérios públicos, prazo limitado e metas de desempenho.

O apoio não deve garantir indefinidamente rotas sem demanda suficiente. Sua função deve ser reduzir o risco inicial, permitir a formação do mercado e apoiar serviços considerados estratégicos para a conectividade regional. Após o período estabelecido, a rota deverá demonstrar condições de continuidade ou passar por nova avaliação.

c) Encaminhamento

As estratégias para o desenvolvimento do setor aéreo paulista deverão ser desdobradas entre intervenções de acesso terrestre, passíveis de representação na rede de transportes, e medidas de natureza fiscal, regulatória, econômica e institucional. Os projetos de infraestrutura que alteram a conectividade dos aeroportos serão avaliados no Produto D-12, enquanto os instrumentos de incentivo e financiamento serão aprofundados fora da rede, no Produto D-14.

No caso de Viracopos, o objetivo será ampliar sua integração com Campinas, com a rede ferroviária de passageiros e com os principais corredores rodoviários estaduais, criando condições para melhor aproveitamento da capacidade disponível do aeroporto. Também deverão ser avaliadas intervenções destinadas a separar, sempre que possível, os fluxos urbanos, os acessos de passageiros, a movimentação de cargas e o tráfego associado às futuras ampliações aeroportuárias.

Serão encaminhados ao Produto D-12 os seguintes projetos:

- **Duplicação da Rodovia Miguel Melhado Campos (SP-324),** entre Vinhedo e o Aeroporto de Viracopos, com extensão aproximada de 15,1 km, para ampliação da capacidade e melhoria das condições de acesso ao aeroporto;
- **Duplicação do viaduto sobre a Rodovia Santos Dumont (SP-075),** em continuidade à intervenção na SP-324, com o objetivo de eliminar restrições de capacidade e melhorar a articulação entre os acessos regionais;
- **Implantação de novo dispositivo no término da SP-083**, incluindo a solução denominada "orelhinha", destinada a apoiar inicialmente o acesso às obras da segunda pista de Viracopos e, posteriormente, contribuir para a organização de um acesso segregado ao transporte de cargas;
- **Avaliação de contornos e novos acessos viários ao Aeroporto de Viracopos**, com separação dos fluxos urbanos, de passageiros e de cargas e redução das interferências sobre a circulação metropolitana;
- **Extensão do VLT de Campinas até o Aeroporto de Viracopos**, articulada ao sistema ferroviário regional e ao TIC, considerando alternativas de traçado, pontos de integração e efeitos sobre a demanda aeroportuária.

A implantação de uma **dutovia entre Paulínia e Viracopos**, com extensão aproximada de 33,3 km, destinada ao transporte de combustível sustentável de aviação — SAF, também deverá ser considerada no planejamento do sistema. Por não constituir uma intervenção diretamente representável no modelo da rede de transportes, sua viabilidade econômica, operacional, ambiental e institucional deverá ser examinada no Produto D-14. O Produto D-12 poderá, de forma complementar, estimar os efeitos indiretos da dutovia sobre a circulação rodoviária, especialmente a redução do número de caminhões-tanque e dos veículos-quilômetro percorridos.

Para os aeroportos do interior, o encaminhamento deverá concentrar-se na avaliação da continuidade e do aperfeiçoamento dos instrumentos de incentivo à operação de voos regionais. A manutenção de aeroportos com baixa utilização não deverá ser analisada de forma isolada, mas em conjunto com sua função territorial, a conectividade proporcionada, a existência de demanda potencial e os custos necessários para assegurar padrões adequados de operação e segurança.

Será encaminhada ao Produto D-14 a análise dos seguintes projetos e instrumentos:

- **Estruturação de fundos ou mecanismos alternativos de financiamento**, capazes de apoiar a conectividade aérea regional após a transição do ICMS, respeitadas as competências estaduais e as novas regras tributárias;

A análise no D-14 deverá comparar o custo dos instrumentos com os resultados produzidos. Entre os indicadores recomendados estão o custo por voo adicional, o custo por passageiro adicional, o custo por nova rota mantida, a duração das operações incentivadas, a ocupação média das aeronaves, a conectividade proporcionada e os efeitos sobre turismo, emprego e atividade econômica regional.

O Produto D-11 registra a subutilização de parte da infraestrutura aeroportuária paulista, a concentração da demanda em Guarulhos e Congonhas, a capacidade disponível em Viracopos e os riscos associados à continuidade dos atuais instrumentos fiscais. O Produto D-12 avaliará os projetos de conexão terrestre representáveis na rede, enquanto o Produto D-14 aprofundará os mecanismos fiscais, econômicos, regulatórios e institucionais necessários para promover maior utilização de Viracopos e preservar a conectividade aérea do interior.

9 PLANEJAMENTO TERRITORIAL E DESENVOLVIMENTO REGIONAL

A implantação e a reorganização da infraestrutura de transportes influenciam a localização das atividades econômicas, o uso do solo e as possibilidades de desenvolvimento dos municípios. O aproveitamento dessas transformações depende da articulação entre o planejamento logístico, as políticas territoriais e ambientais e os instrumentos municipais de ordenamento urbano. Nos contatos setoriais, essa relação apareceu tanto nas demandas por áreas de apoio às atividades produtivas quanto nas oportunidades de recuperação de espaços subutilizados e de formação de novos polos de desenvolvimento.

Este capítulo reúne três temas relacionados a essa articulação: o planejamento de retroáreas e bases de apoio offshore para as atividades do pré-sal; a cooperação com os municípios, considerando planos diretores, infraestrutura abandonada e operações urbanas consorciadas; e a geração de polos de desenvolvimento regional associados às novas ofertas de infraestrutura logística. As análises consideram as condições de acesso, a disponibilidade de áreas e serviços, as restrições socioambientais e a capacidade institucional necessária para viabilizar essas oportunidades.

O objetivo é identificar as condições em que melhorias na infraestrutura de transportes podem sustentar atividades econômicas e transformações territoriais compatíveis com as características de cada região. Os encaminhamentos articulam a avaliação dos efeitos sobre a rede, no Produto D-12, aos aprofundamentos econômicos e territoriais previstos no Produto D-14, reconhecendo que a implantação de uma infraestrutura, por si só, não assegura a formação de novos polos nem a distribuição dos benefícios esperados.

9.1 Planejamento territorial, ambiental e logístico para retroáreas e bases de apoio offshore

a) Contextualização

A expansão das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural na Bacia de Santos amplia a demanda por infraestrutura logística especializada no litoral paulista. As operações offshore exigem bases terrestres capazes de receber, armazenar, preparar e movimentar equipamentos, tubos, peças, alimentos, fluidos e demais insumos destinados às plataformas marítimas. Também requerem berços apropriados para embarcações de apoio, instalações para movimentação de trabalhadores e conexões eficientes com fornecedores e polos industriais localizados no interior do Estado.

Embora o Estado de São Paulo tenha posição relevante na produção de petróleo e gás do Pré-Sal, parte das atividades de apoio pode ser realizada a partir de bases instaladas em outros estados. A consolidação de estruturas permanentes no território paulista representa, portanto, uma oportunidade de internalizar parcela maior dos investimentos, serviços especializados, empregos e encadeamentos produtivos associados à cadeia offshore. Essa oportunidade depende, entretanto, da existência de áreas adequadas, infraestrutura portuária, acessibilidade terrestre e segurança territorial e ambiental para os empreendimentos.

O eixo formado por São Sebastião, Caraguatatuba e Vale do Paraíba apresenta condições estratégicas para receber essas atividades. O Porto de São Sebastião dispõe de proximidade em relação aos campos produtores da Bacia de Santos e pode abrigar berços destinados às embarcações de apoio, enquanto Caraguatatuba apresenta áreas potencialmente utilizáveis para armazenagem, triagem, manutenção e organização dos fluxos terrestres. O Vale do Paraíba, por sua vez, reúne atividades industriais e acesso a importantes corredores rodoviários, podendo desempenhar função complementar no fornecimento de equipamentos, componentes e serviços.

Entre as iniciativas consideradas está a implantação de uma base permanente de apoio offshore no Porto de São Sebastião, com área prevista de aproximadamente 262 mil m², com novo píer e berços dedicados às embarcações de apoio. A estrutura seria destinada à movimentação de equipamentos e insumos necessários às operações de exploração e produção, incluindo o atendimento aos *supply boats* que realizam a ligação regular entre as bases terrestres e as unidades marítimas.

Em Caraguatatuba, os materiais de planejamento registram propostas para implantação de parque de tubos, retroárea offshore e área de apoio logístico. Esta última é apresentada como um centro de triagem e apoio ao Porto de São Sebastião, com capacidade indicativa para receber simultaneamente cerca de 150 caminhões e movimentar aproximadamente 4,3 milhões de toneladas por ano. Os documentos também mencionam a Fazenda Serramar e áreas vizinhas como possíveis localizações para instalações logísticas, industriais e de apoio à cadeia de petróleo e gás.

Essas propostas ainda não apresentam configuração plenamente consolidada. O parque de tubos e a retroárea offshore podem corresponder ao mesmo empreendimento ou a estruturas complementares, aspecto que deverá ser esclarecido antes da definição da carteira de projetos. Também permanecem em aberto a localização definitiva, a titularidade e o regime de uso das áreas, os operadores e usuários previstos, os tipos de carga, a capacidade necessária e a articulação funcional entre retroárea, porto, aeroporto e polos industriais.

A organização dessas instalações não deve ser tratada apenas como expansão portuária. Trata-se de um problema de planejamento territorial e logístico que envolve a distribuição de funções entre o Porto de São Sebastião, as áreas disponíveis em Caraguatatuba e eventuais instalações industriais no Vale do Paraíba. Uma configuração inadequada pode aumentar a circulação de veículos pesados em áreas urbanas, gerar filas nos acessos portuários e produzir conflitos com atividades turísticas e residenciais. Por outro lado, uma estrutura integrada pode organizar os fluxos, reduzir deslocamentos improdutivos e ampliar a participação paulista nas cadeias de fornecimento do Pré-Sal.

A implantação das retroáreas também depende da capacidade dos acessos terrestres. A movimentação de tubos, equipamentos industriais e cargas de grandes dimensões exige rotas com condições geométricas e operacionais compatíveis, além de articulação com a SP-055, a Rodovia dos Tamoios e as ligações com o Vale do Paraíba. O planejamento deverá considerar os efeitos sobre o tráfego urbano de Caraguatatuba e São Sebastião, os períodos de maior movimento turístico e as limitações impostas pela travessia da Serra do Mar.

A disponibilidade física de terrenos, entretanto, não é suficiente para determinar a viabilidade das propostas. O Litoral Norte apresenta elevada sensibilidade ambiental, presença de unidades de conservação, áreas costeiras, mananciais, comunidades tradicionais e territórios sujeitos a inundações, movimentos de massa e outros riscos climáticos e geotécnicos. A seleção das áreas deverá considerar esses condicionantes desde as etapas iniciais, evitando que a definição logística anteceda a verificação da compatibilidade ambiental e territorial.

Nesse contexto, o Zoneamento Ecológico-Econômico constitui um condicionante central. As atividades pretendidas precisam ser compatíveis com as diretrizes de uso e ocupação estabelecidas para o Litoral Norte. A eventual revisão de zoneamentos territoriais, especialmente em áreas como a Fazenda Serramar, não deve ser tratada apenas como flexibilização para viabilizar empreendimento específicos. Ela requer avaliação dos impactos acumulados da expansão portuária, das retroáreas, dos novos acessos e das atividades industriais induzidas.

A Avaliação Ambiental Estratégica pode apoiar essa análise ao examinar conjuntamente alternativas de localização, infraestrutura de acesso, expansão portuária, desenvolvimento industrial e proteção ambiental. Diferentemente do licenciamento individual de cada empreendimento, a abordagem estratégica permite avaliar efeitos cumulativos e sinérgicos,

comparar configurações territoriais e estabelecer previamente áreas incompatíveis, condicionantes e medidas de mitigação. Também pode melhorar a coordenação entre o planejamento estadual, o Porto de São Sebastião, os municípios, os órgãos ambientais e as autoridades federais.

O problema consiste, portanto, em transformar um conjunto ainda disperso de propostas em uma estratégia territorial, ambiental e logística integrada. Essa estratégia deverá definir as funções de cada instalação, eliminar sobreposições entre projetos, identificar alternativas locacionais e estabelecer a conexão entre porto, retroáreas, acessos terrestres e atividades industriais. Somente a partir dessa organização será possível avaliar se a implantação de uma base offshore permanente no litoral paulista apresenta demanda, viabilidade e benefícios suficientes para justificar os investimentos e as alterações territoriais necessárias.

b) Análise

A comparação entre o zoneamento municipal e o Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro (ZEEc) em Caraguatatuba evidenciou **diferentes níveis de restrição ao uso e à ocupação do solo**, particularmente nas áreas destinadas à expansão urbana. A análise permitiu identificar situações de maior ou menor compatibilidade entre as diretrizes estabelecidas no âmbito municipal e aquelas definidas pelo planejamento territorial estadual.

Além das áreas submetidas a regimes específicos de proteção, sejam públicas como **Unidades de Conservação (UC), Áreas de Preservação Permanente (APP),** ou privadas como **Reservas Legais (RL) e Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN)**, foi realizada a sobreposição espacial das disposições previstas nas legislações municipal e estadual de planejamento. Essa abordagem possibilitou avaliar o **grau de alinhamento territorial** das áreas de interesse a serem destinadas à implantação ou consolidação de polos logísticos associados à dinâmica portuária.

A análise integrada desses instrumentos também permitiu identificar **áreas em que as diretrizes de uso e ocupação previstas pelo município encontram maiores condicionantes que na regulamentação estadual**, assim como definições nas quais se observa maior convergência entre os diferentes níveis de planejamento. Dessa forma, a sobreposição dos instrumentos de ordenamento territorial constitui elemento relevante para avaliar a viabilidade e os condicionantes associados às propostas de implantação de novos polos logísticos e retroáreas em regiões de expansão urbana.

Para subsidiar a formulação de propostas, foram ainda levantadas e sistematizadas as **definições legais, competências e procedimentos de aprovação relacionados a cada instrumento de ordenamento territorial analisado**. Essa sistematização teve como objetivo permitir a comparação entre seus processos de instituição e alteração, bem como avaliar a **prevalência dos dispositivos de maior restritividade** nas situações de sobreposição ou potencial conflito entre as normas incidentes sobre o território.

c) Encaminhamento

A partir do **cruzamento das condicionantes territoriais, ambientais e legais**, deverão ser identificadas as áreas de maior aptidão para a implantação das infraestruturas propostas. Essa análise permitirá reconhecer territórios com melhores condições de inserção logística e menor incidência de conflitos, subsidiando a definição de localizações prioritárias e das estratégias necessárias para sua viabilização.

A metodologia deverá ser **replicada para a Baixada Santista e o Vale do Paraíba**, considerando as especificidades territoriais e logísticas de cada região, de modo a fortalecer o sistema de apoio às atividades offshore e ampliar a integração entre os terminais marítimos e o interior do Estado. Nesse contexto, poderão ser avaliadas infraestruturas estratégicas, como a implantação de um **novo porto seco em São José dos Campos** e de um **parque de tubos**

em Caraguatatuba, entre outras estruturas complementares identificadas ao longo dos estudos.

Nos casos em que forem identificados **conflitos ou limitações de natureza regulatória, ambiental e urbanística**, deverão ser consolidadas alternativas capazes de viabilizar a implantação das infraestruturas previstas. Para cada situação, serão avaliados os instrumentos mais adequados, considerando, entre outras possibilidades, a **Declaração de Utilidade Pública (DUP)**, a **Operação Urbana Consorciada (OUC)** e eventuais **alterações nos marcos legais e instrumentos de ordenamento territorial**, selecionando-se as abordagens mais aderentes às características e condicionantes de cada área.

De forma complementar, deverão ser analisadas **possibilidades de incentivos econômicos e mecanismos de estímulo à implantação e ao desenvolvimento dos polos**, considerando os investimentos necessários, o potencial de atração de novas atividades e os impactos socioeconômicos esperados para as regiões envolvidas. Essa abordagem permitirá articular a viabilidade territorial e regulatória às estratégias de desenvolvimento regional, buscando potencializar a geração de empregos, a dinamização das cadeias produtivas e o fortalecimento da infraestrutura logística associada às atividades portuárias e offshore.

9.2 Geração de polos de desenvolvimento regional associados ás novas ofertas de infraestrutura logística

a) Contextualização

A implantação de novas infraestruturas logísticas pode alterar a distribuição das atividades econômicas no território paulista. Rodovias, ferrovias, portos, aeroportos e terminais intermodais reduzem custos de transporte, ampliam o acesso a mercados e podem tornar determinadas áreas mais atrativas para indústrias, centros de distribuição e serviços especializados. Esses efeitos, entretanto, não ocorrem automaticamente: dependem da existência de demanda, disponibilidade de terrenos, mão de obra, energia, serviços urbanos e condições ambientais e institucionais adequadas.

No PLI-SP 2050, algumas áreas apresentam maior potencial de transformação. Na Baixada Santista, a ampliação portuária e dos acessos pode reforçar atividades logísticas e industriais em Santos, Guarujá e Cubatão. No Litoral Sul e no Vale do Ribeira, um novo complexo portuário e suas conexões terrestres poderiam estimular atividades produtivas atualmente limitadas pela baixa acessibilidade. No eixo São Sebastião–Caraguatatuba–Vale do Paraíba, as estruturas de apoio offshore podem favorecer fornecedores e atividades industriais relacionadas ao petróleo, ao gás e à energia.

No interior do Estado, novas conexões ferroviárias e terminais intermodais podem fortalecer cadeias agroindustriais, especialmente aquelas relacionadas a alimentos, proteína animal e biocombustíveis. Nas áreas atendidas pelos projetos de TIC e VLT, a melhoria da acessibilidade de passageiros também pode favorecer novas centralidades urbanas, serviços e atividades econômicas próximas às estações.

A presença da infraestrutura, contudo, não deve ser confundida com garantia de desenvolvimento. Alguns projetos podem apenas redistribuir atividades já existentes entre municípios, sem gerar investimento adicional para o Estado. Também existe o risco de concentração dos benefícios em áreas já desenvolvidas ou de indução de ocupações incompatíveis com a capacidade urbana e ambiental local.

O problema consiste, portanto, em identificar onde as novas ofertas logísticas podem produzir desenvolvimento adicional e quais condições complementares são necessárias para que esse potencial se concretize. A análise deverá distinguir polos já consolidados, investimentos

previamente anunciados e atividades efetivamente induzidas pelos projetos do PLI-SP 2050, evitando atribuir à infraestrutura resultados que ocorreriam independentemente de sua implantação.

b) Análise

A capacidade de uma nova infraestrutura logística gerar desenvolvimento regional depende de sua conexão com uma base produtiva existente. Os efeitos tendem a ser mais consistentes quando o investimento reduz um gargalo já enfrentado por empresas instaladas, permite ampliar uma cadeia produtiva ou cria acesso efetivo a novos mercados. Quando não existe demanda produtiva identificada, a infraestrutura pode melhorar a acessibilidade sem resultar na formação de um novo polo.

A Baixada Santista apresenta o potencial mais imediato. Santos, Guarujá e Cubatão já concentram atividades portuárias, industriais e logísticas, e a expansão do porto aumenta a demanda por terminais, retroáreas, armazenagem, manutenção e serviços especializados. Nesse caso, a nova infraestrutura tende menos a criar um polo inteiramente novo e mais a ampliar e reorganizar um complexo econômico existente. O principal desafio é evitar que a expansão agrave congestionamentos, conflitos urbanos e escassez de áreas próximas ao porto.

No eixo São Sebastião–Caraguatatuba–Vale do Paraíba, o potencial está associado à cadeia offshore. A implantação de berços para embarcações de apoio, retroáreas e parque de tubos pode atrair fornecedores de equipamentos, manutenção e serviços relacionados ao Pré-Sal. O Vale do Paraíba possui base industrial e mão de obra que favorecem essa integração. O desenvolvimento dependerá, contudo, de demanda contratada pelos operadores de petróleo e gás e da compatibilização das instalações com as restrições ambientais e urbanas do Litoral Norte.

No interior paulista, as oportunidades são mais distribuídas. Novos terminais e conexões ferroviárias podem fortalecer cadeias já consolidadas de grãos, açúcar, biocombustíveis, proteína animal, celulose e insumos agrícolas. Os maiores efeitos são esperados onde a infraestrutura reduzir custos de transbordo, ampliar a escala de transporte ou conectar diretamente plantas industriais aos corredores ferroviários e hidroviários. Nesse caso, os polos deverão assumir caráter agroindustrial e intermodal, aproveitando atividades existentes em vez de depender da atração de setores inteiramente novos.

O Litoral Sul e o Vale do Ribeira constituem a alternativa mais transformadora, mas também a mais incerta. Um novo porto e suas conexões poderiam gerar empregos e atrair atividades logísticas e industriais para uma região com menor dinamismo econômico. Entretanto, esse resultado depende da definição das cargas, da viabilidade do empreendimento portuário, da qualidade dos acessos e da compatibilidade com áreas ambientalmente sensíveis e comunidades tradicionais. Sem demanda portuária comprovada, a hipótese de formação de um polo industrial permanece prospectiva.

As áreas próximas ao TIC e aos sistemas de VLT apresentam dinâmica diferente. A melhoria da acessibilidade de passageiros pode favorecer serviços, comércio, habitação e atividades de maior densidade nas proximidades das estações. Esses efeitos são predominantemente urbanos e imobiliários, e não necessariamente logísticos. Sua concretização depende da integração com os Planos Diretores, da disponibilidade de terrenos e da capacidade municipal de orientar o adensamento e financiar a infraestrutura urbana necessária.

Tabela 9-1: Síntese do potencial de desenvolvimento associado às novas infraestruturas.

Área	Infraestrutura associada	Potencial predominante	Grau de consolidação
Santos, Guarujá e Cubatão	Expansão portuária, retroáreas e novos acessos	Ampliação do complexo portuário, industrial e logístico existente	Elevado
São Sebastião, Caraguatatuba e Vale do Paraíba	Base offshore, berços, retroáreas e conexões terrestres	Cadeia de petróleo, gás, energia e serviços offshore	Intermediário, condicionado à demanda
Interior agroindustrial	Ferrovias, hidrovia e terminais intermodais	Expansão de cadeias agroindustriais e redução de custos logísticos	Elevado onde já existe produção
Litoral Sul e Vale do Ribeira	Novo porto e ligações rodoviárias e ferroviárias	Novo polo portuário, logístico e industrial	Incerto e dependente do empreendimento portuário
Áreas próximas ao TIC e VLT	Novos serviços e estações de passageiros	Novas centralidades urbanas, comércio e serviços	Dependente do planejamento municipal

Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

A comparação indica que os maiores efeitos de curto e médio prazo tendem a ocorrer nas regiões que já possuem atividades produtivas e enfrentam restrições logísticas identificáveis. A Baixada Santista, o interior agroindustrial e o eixo Vale do Paraíba–Litoral Norte apresentam bases econômicas capazes de responder mais rapidamente às melhorias de infraestrutura. No Litoral Sul e nas áreas de novos projetos ferroviários de passageiros, os impactos são potencialmente relevantes, mas dependem de decisões adicionais sobre localização, demanda e ordenamento territorial.

A política estadual não deve se limitar à oferta de terrenos ou à denominação formal de novos polos. Sua contribuição deve concentrar-se na infraestrutura de acesso, na coordenação entre projetos, na compatibilização territorial e na remoção de gargalos que impeçam investimentos produtivos já identificados. Dessa forma, a geração de polos poderá ser tratada como resultado de uma combinação entre acessibilidade, base econômica e capacidade institucional, e não como efeito automático da construção de uma obra.

c) Encaminhamento

A geração de polos de desenvolvimento regional será encaminhada para análise fora da rede no Produto D-14. Os polos não serão tratados como intervenções autônomas na infraestrutura de transportes, mas como possíveis efeitos territoriais e econômicos das novas ofertas logísticas avaliadas pelo PLI-SP 2050.

Os resultados das simulações do Produto D-12 deverão ser utilizados como insumos, especialmente as alterações de acessibilidade, tempos de viagem, custos logísticos, capacidade e carregamento da rede. Esses resultados permitirão verificar quais regiões obtêm ganhos efetivos com os projetos e se esses ganhos são suficientes para apoiar atividades produtivas adicionais.

O Produto D-14 deverá analisar as seguintes possibilidades:

- **Ampliação do complexo logístico-industrial da Baixada Santista**, considerando Santos, Guarujá e Cubatão e sua relação com a expansão portuária, os novos terminais, as retroáreas e os acessos terrestres;

- **Desenvolvimento do eixo offshore São Sebastião–Caraguatatuba–Vale do Paraíba**, considerando as bases de apoio, os berços para embarcações offshore, as retroáreas e as atividades industriais relacionadas ao petróleo, ao gás e à energia;
- **Fortalecimento de polos agroindustriais e intermodais no interior paulista**, associados a novas conexões ferroviárias, terminais, hidrovia e cadeias de grãos, açúcar, biocombustíveis, proteína animal e celulose;
- **Possível formação de um polo portuário e industrial no Litoral Sul e no Vale do Ribeira**, condicionada à viabilidade do novo porto, à definição das cargas e à implantação de seus acessos;
- **Desenvolvimento de centralidades nas áreas de influência do TIC e dos VLT**, considerando atividades econômicas, serviços e ocupação urbana próximos às estações.

O Produto D-11 registra as áreas com potencial de desenvolvimento e estabelece sua relaçãocom as novas ofertas de infraestrutura. O Produto D-12 avaliará os efeitos dos projetos sobre a rede de transportes, e o Produto D-14 deverá estimar os impactos econômicos e territoriais, indicando onde existem condições concretas para o fortalecimento ou a formação de polos regionais.

10 SEGURANÇA, TECNOLOGIA, GOVERNANÇA, RESILIÊNCIA E FINANCIAMENTO

O desempenho do sistema logístico depende de condições que vão além da capacidade física da infraestrutura e da oferta de serviços. A proteção de cargas e instalações, a disponibilidade de comunicação, a incorporação de novas tecnologias, a coordenação institucional, a adaptação às mudanças climáticas e a disponibilidade de recursos influenciam a continuidade das operações e a execução dos investimentos. Nos contatos setoriais, esses temas foram apontados como questões que afetam diferentes modos de transporte e exigem atuação articulada entre órgãos públicos, operadores e demais agentes.

Este capítulo reúne as contribuições relacionadas à segurança e à conectividade no transporte de cargas, à adoção de novas tecnologias nas contratações estaduais, ao fortalecimento da área de logística e transportes, à adaptação da infraestrutura aos riscos climáticos e à avaliação de incentivos fiscais e fundos setoriais. As análises abordam tanto medidas voltadas ao funcionamento cotidiano do sistema quanto condições necessárias para implementar e sustentar as transformações previstas no horizonte do PLI-SP 2050.

O objetivo é identificar instrumentos, responsabilidades e condições de viabilidade que apoiem a execução das propostas do Plano e a continuidade dos serviços de transporte. Conforme a natureza de cada tema, seus efeitos poderão ser considerados nas análises de cenários ou tratados em avaliações complementares. Os encaminhamentos deverão orientar os aprofundamentos nos produtos subsequentes, especialmente no Produto D-14, em articulação com o exame dos aspectos jurídicos, institucionais e regulatórios previsto no Produto D-18.

10.1 Segurança e conectividade nos sistemas de transporte de cargas

a) Contextualização

A segurança e a conectividade dos sistemas de transporte de cargas influenciam diretamente a confiabilidade das cadeias logísticas. Furtos, roubos e atos de vandalismo podem provocar perda de mercadorias, danos à infraestrutura, interrupções operacionais e aumento dos custos com seguros, vigilância e manutenção. Ao mesmo tempo, a ausência de comunicação contínua dificulta o monitoramento dos ativos e reduz a capacidade de resposta dos operadores e das forças de segurança.

No transporte rodoviário, o roubo de cargas apresenta maior incidência em corredores de grande movimentação, acessos metropolitanos, áreas portuárias e pontos de parada. A resposta ao problema depende da identificação dos trechos críticos, do rastreamento dos veículos e da coordenação entre transportadores, concessionárias rodoviárias e forças policiais.

Nas ferrovias, as ocorrências envolvem tanto as mercadorias transportadas quanto cabos, componentes de sinalização, equipamentos e demais elementos da infraestrutura. O vandalismo e a invasão da faixa ferroviária podem interromper a circulação, reduzir a velocidade dos trens e comprometer a segurança operacional. Informações apresentadas nos contatos setoriais indicam que esses eventos podem representar perdas econômicas relevantes para as concessionárias, embora os valores e locais de maior incidência ainda precisem ser consolidados.

A conectividade constitui parte essencial da resposta. Sensores, câmeras, rastreamento por GPS, sistemas de detecção de intrusão e plataformas de análise somente produzem resultados quando existe transmissão confiável de dados. Em trechos sem cobertura adequada, tecnologias móveis, rádio e comunicação por satélite podem ampliar o acompanhamento em tempo real e reduzir o intervalo entre a ocorrência, sua identificação e o acionamento das equipes.

Os centros de controle operacional (CCO) das concessionárias ferroviárias já acompanham a circulação dos trens e diferentes aspectos da operação. Entretanto, as ocorrências de segurança frequentemente exigem atuação conjunta de mais de um operador ou órgão público. A integração de informações entre os CCO, as forças de segurança, os gestores rodoviários e os sistemas portuários podem permitir uma visão mais ampla dos corredores de carga e melhorar a coordenação das respostas.

Nesse contexto, pode ser considerada a implantação de um CCO concentrador ou observatório estadual, destinado a receber e integrar informações selecionadas dos centros de controle existentes. Essa estrutura não substituiria o comando operacional das concessionárias. Sua função seria apoiar o monitoramento sistêmico, a identificação de padrões de ocorrência, a emissão de alertas e a articulação entre operadores e órgãos públicos.

A estruturação desse sistema depende da definição dos dados que poderão ser compartilhados, dos protocolos de comunicação e das responsabilidades de cada instituição. Também exige medidas de interoperabilidade, proteção de informações operacionais e cibersegurança, uma vez que a ampliação da conectividade pode criar novas vulnerabilidades digitais.

O problema consiste, portanto, em combinar infraestrutura de comunicação, tecnologias de monitoramento e coordenação institucional. A ampliação isolada da cobertura digital não garante maior segurança, assim como o aumento do policiamento produz resultados limitados sem informações precisas sobre locais, horários e tipos de ocorrência. A abordagem deve integrar dados, prevenção e capacidade de resposta nos principais corredores de transporte de cargas do Estado.

b) Análise

Experiências internacionais indicam que a segurança do transporte terrestre deve ser tratada de forma cooperativa e adaptada aos riscos de cada corredor. A União Europeia mantém um grupo especializado para intercâmbio de informações entre autoridades e operadores e reconhece que, devido à diversidade dos riscos rodoviários e ferroviários, não existe uma solução única aplicável a todos os sistemas. A orientação é combinar avaliação de riscos, coordenação institucional e respostas específicas para cada segmento do transporte[171].

No campo tecnológico, existem possibilidades como rastreamento por satélite ou redes móveis, cercas eletrônicas, alertas de desvio de rota, lacres eletrônicos, câmeras e sensores de intrusão. Em experiência conduzida pelo Departamento de Transportes dos Estados Unidos com cargas perigosas, essas tecnologias foram testadas isoladamente e em conjunto para avaliar sua contribuição à proteção de veículos e mercadorias[172]. O sistema eTIR, desenvolvido no âmbito da Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa, também demonstra como o intercâmbio eletrônico de informações em tempo real pode ampliar a rastreabilidade, apoiar a gestão de riscos e reduzir fraudes no transporte internacional[173].

Para São Paulo, essas experiências sugerem a possibilidade de integrar informações selecionadas dos CCO das concessionárias a um observatório ou CCO concentrador, preservando o comando operacional de cada empresa. Essa estrutura poderia receber alertas sobre roubos, furtos, vandalismo, invasões, bloqueios e interrupções, apoiando a articulação com as forças de

[171] COMISSÃO EUROPEIA. Land Transport Security. Disponível em: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/security-safety/land-transport-security_en. Acesso em: 20 set. 2026.
[172] UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION; FEDERAL MOTOR CARRIER SAFETY ADMINISTRATION. Hazardous Materials Safety and Security Operational Test: Field Operational Test Overview.
[173] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. eTIR International System.

segurança. Sua implantação dependeria, entretanto, da definição dos dados compartilhados, dos protocolos de acionamento e dos responsáveis pelas respostas.

A maior conectividade também cria riscos de acesso indevido, manipulação de informações e interrupção dos sistemas. Por isso, eventual implantação deverá incorporar cibersegurança desde a concepção, com controle de acesso, autenticação, criptografia e planos de contingência. A experiência norte-americana com sistemas inteligentes de transportes recomenda uma abordagem de segurança desde o desenho da arquitetura, protegendo veículos, infraestrutura, meios de comunicação e integridade dos dados[174].

c) Encaminhamento

As medidas relacionadas à segurança e à conectividade não alteram diretamente a capacidade ou a configuração física da rede de transportes. Por essa razão, o tema será encaminhado para análise fora da rede no Produto D-14 e não constituirá, nesta etapa, projeto autônomo de simulação no Produto D-12. Seus efeitos estarão relacionados principalmente à redução de perdas, interrupções e tempos de resposta e à melhoria da disponibilidade dos ativos e da confiabilidade dos corredores.

O principal projeto associado ao tema é:

- **ITS e CCO concentrador**: Estruturação de um observatório ou centro concentrador capaz de receber informações selecionadas dos CCO existentes, integrar alertas de interesse sistêmico e apoiar a coordenação entre concessionárias, gestores públicos, autoridades portuárias e forças de segurança.

O Produto D-14 deverá detalhar a arquitetura institucional e tecnológica, estimar os custos de implantação e operação, definir as competências dos participantes, examinar as restrições jurídicas e regulatórias ao compartilhamento de dados e selecionar o corredor mais adequado para o projeto-piloto. A avaliação deverá comparar os custos do sistema com os benefícios decorrentes da redução de perdas, interrupções, danos à infraestrutura e tempos de resposta.

10.2 Estratégias para adoção de novas tecnologias em licitações do ESP

a) Contextualização

A incorporação de tecnologias inovadoras à infraestrutura de transportes enfrenta dificuldades quando as soluções disponíveis ainda não estão contempladas nas especificações técnicas e nos modelos de contratação utilizados pelo poder público. Produtos disruptivos podem apresentar desempenho superior aos padrões existentes, mas não possuem histórico suficiente de aplicação, normas técnicas consolidadas ou número amplo de fornecedores que permita sua contratação pelos procedimentos convencionais.

Essa dificuldade é particularmente relevante quando uma tecnologia possui apenas um fabricante ou um número reduzido de empresas capacitadas. A elaboração de um edital com requisitos correspondentes às características de uma solução específica pode restringir a competição ou produzir questionamentos quanto ao direcionamento da contratação. Por outro lado, a utilização exclusiva de especificações tradicionais pode impedir que o Estado teste soluções capazes de aumentar a durabilidade das obras, melhorar a segurança, reduzir custos de manutenção ou diminuir impactos ambientais.

[174] UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. ITS Cybersecurity.

O problema não se limita à aquisição do produto. Tecnologias inovadoras podem exigir alterações regulatórias, adaptações nos contratos de concessão, novos procedimentos de certificação e definição de responsabilidades em caso de falha. Também precisam ser avaliadas em condições reais de operação, pois resultados obtidos em laboratório ou em experiências de pequena escala nem sempre demonstram seu desempenho na infraestrutura estadual.

Nesse contexto, ambientes de experimentação podem criar uma etapa intermediária entre o desenvolvimento tecnológico e a contratação em escala. Projetos piloto, provas de conceito e *sandboxes* permitem testar soluções por prazo e escopo delimitados, com acompanhamento técnico, indicadores de desempenho e mecanismos de interrupção. As evidências produzidas podem subsidiar a elaboração de especificações funcionais, normas técnicas e requisitos para futuras contratações.

A experimentação não deve ser utilizada para afastar indevidamente a competição ou favorecer um fornecedor previamente escolhido. O objetivo é permitir que o Estado conheça e compare tecnologias emergentes, avalie seus riscos e forme uma base técnica para decidir se a solução deve ser incorporada aos contratos públicos. Quando houver apenas um fornecedor, a exclusividade e o instrumento de contratação deverão ser demonstrados e examinados juridicamente.

O desafio consiste, portanto, em criar um procedimento seguro para selecionar, testar, validar e eventualmente ampliar o uso de novas tecnologias. Esse procedimento deverá conciliar inovação, desempenho técnico, transparência, isonomia e segurança jurídica, permitindo a modernização da infraestrutura sem comprometer os princípios aplicáveis às contratações públicas.

b) Análise

A experiência disponível indica que a adoção de tecnologias disruptivas pode ser organizada em duas etapas distintas: experimentação e contratação em escala. O ambiente experimental permite avaliar o desempenho da solução sem exigir que o Estado defina antecipadamente especificações técnicas ainda não consolidadas. Concluído o teste, os resultados podem subsidiar normas, requisitos funcionais e modelos de contratação mais adequados.

No setor de transportes, o principal exemplo brasileiro é o *sandbox* regulatório da ANTT para o sistema de pesagem de veículos na velocidade da via — HS-WIM. A tecnologia foi testada em rodovias concedidas, com sensores instalados no pavimento e câmeras em pórticos, permitindo pesar caminhões sem redução de velocidade ou parada. O experimento produziu evidências para ajustes regulatórios e para a homologação da solução pelo Inmetro, viabilizando sua posterior incorporação aos contratos de concessão[175] [176].

Outro instrumento aplicável é o Contrato Público para Solução Inovadora — CPSI, previsto no Marco Legal das Startups. Nesse modelo, a Administração apresenta um problema e pode contratar o teste de diferentes soluções, sem definir previamente qual tecnologia deverá ser utilizada. O Tribunal de Contas da União já empregou o instrumento para testar soluções

[175] BRASIL. Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 1º abr. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm. Acesso em: 16 set. 2026.
[176] BRASIL. Lei Complementar nº 182, de 1º de junho de 2021. Institui o Marco Legal das Startups e do Empreendedorismo Inovador. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2 jun. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp182.htm. Acesso em: 16 set. 2026.

inovadoras destinadas à fiscalização de obras públicas[177]. A Advocacia-Geral da União também disponibiliza manual e modelos padronizados para apoiar sua utilização[178].

Experiências internacionais utilizam lógica semelhante. A parceria para inovação adotada na União Europeia permite selecionar empresas, desenvolver e testar soluções e, quando os resultados atendem às metas estabelecidas, avançar para sua aquisição e aplicação. O processo é organizado em fases, com metas de desempenho e possibilidade de redução do número de participantes conforme a evolução dos testes[179].

Essas experiências mostram que o *sandbox* não deve ser entendido como autorização genérica para contratar diretamente um fabricante exclusivo. Sua função é criar condições controladas para testar soluções inovadoras, medir benefícios e riscos e formar evidências para decisões posteriores. Nos casos em que exista apenas um fornecedor, a exclusividade e o instrumento de contratação deverão ser tecnicamente demonstrados e juridicamente examinados.

c) Encaminhamento

A proposta será encaminhada para análise fora da rede no Produto D-14. Por não alterar diretamente a capacidade ou a configuração da rede de transportes, não será constituído cenário específico para simulação no Produto D-12.

O D-14 deverá avaliar o desenho jurídico e institucional de um Programa Estadual de Experimentação e Validação de Tecnologias para Infraestrutura de Transportes, considerando:

- *sandbox* regulatório ou tecnológico;
- Contrato Público para Solução Inovadora;
- provas de conceito e projetos piloto;
- encomenda tecnológica;
- diálogo competitivo;
- contratação posterior das soluções validadas;
- situações de fornecedor exclusivo ou competição limitada.

A análise deverá definir os critérios para seleção dos desafios, a forma de consulta ao mercado, os requisitos de participação, a remuneração dos testes, os direitos de propriedade intelectual, a responsabilidade por falhas, a proteção dos dados e os critérios de aprovação ou interrupção do experimento. Também deverá estabelecer como os resultados dos pilotos poderão ser transformados em normas técnicas, especificações funcionais e requisitos para contratos e concessões.

Como aplicação inicial, o D-14 poderá selecionar casos concretos relacionados a pavimentação, pesagem em movimento, sinalização, monitoramento, conectividade, segurança e materiais de menor impacto ambiental. A seleção deverá priorizar problemas públicos claramente definidos e tecnologias cujo desempenho possa ser mensurado em ambiente real.

[177] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Pesagem em movimento: ANTT encerra Sandbox Regulatório e inaugura novo futuro para as rodovias brasileiras. Brasília, DF, 25 ago. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/pesagem-em-movimento-antt-encerra-sandbox-regulatorio-e-inaugura-novo-futuro-para-as-rodovias-brasileiras. Acesso em: 16 set. 2026.

[178] ADVOCACIA-GERAL DA UNIÃO – AGU. Manual do Contrato Público para Solução Inovadora. Brasília, DF: Laboratório de Inovação da Advocacia-Geral da União, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agu/pt-br/assuntos-1/labori/minutas/manual-do-contrato-publico-para-solucao-inovadora.pdf. Acesso em: 16 set. 2026.

[179] EUROPEAN COMMISSION. Public procurement of innovation through innovation partnerships. Brussels: European Commission, 2024.

O Produto D-11 registra o problema e as alternativas institucionais disponíveis. O Produto D-14 deverá comparar os instrumentos, examinar sua compatibilidade com a legislação aplicável e propor um procedimento juridicamente seguro para testar, validar e, quando conveniente, incorporar novas tecnologias às contratações do Estado.

10.3 Rearranjo institucional - Expansão da área de logística e transportes

a) Contextualização

O diagnóstico institucional desenvolvido no Produto D-18 identifica que a atual organização das competências relacionadas à logística e aos transportes no Estado de São Paulo apresenta fragmentação entre diferentes órgãos e entidades da Administração Pública. De forma transversal aos modais, as atribuições de planejamento, formulação de políticas, exercício do poder concedente, regulação, fiscalização e execução encontram-se distribuídas entre diferentes estruturas, especialmente SEMIL, Secretaria de Parcerias em Investimentos – SPI, Secretaria dos Transportes Metropolitanos – STM, ARTESP e DER/SP. Essa configuração produz interfaces institucionais que nem sempre possuem delimitação suficientemente clara e pode gerar sobreposições, lacunas de competência e dificuldades de coordenação entre planejamento, estruturação de projetos, regulação e execução.

No âmbito específico da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística – SEMIL, o Produto D-18 aponta uma questão central para a organização da atual Subsecretaria de Logística e Transportes – SLT: embora a Secretaria possua papel essencialmente voltado ao planejamento, sua estrutura concentra também funções de natureza executiva. Essa coexistência faz com que a SLT tenha de conciliar atividades de planejamento estratégico e formulação de políticas públicas com atribuições relacionadas à execução e à gestão operacional da infraestrutura de transportes, reduzindo sua capacidade de concentração nas funções estratégicas e de coordenação do sistema logístico estadual.

O problema assume maior relevância diante da necessidade de planejamento integrado e multimodal. O Produto D-18 identifica, por exemplo, a segregação entre a função de planejamento, exercida principalmente pela SEMIL e também pela STM em seus respectivos campos de atuação, e a função de Poder Concedente, atribuída à SPI. Também são identificadas situações específicas de indefinição ou sobreposição de competências executivas e regulatórias, inclusive quanto às atribuições conferidas à ARTESP e à atuação de diferentes órgãos nos sistemas rodoviário, ferroviário, hidroviário e aeroportuário.

Nesse contexto, o atual arranjo institucional impõe à (SLT) o desafio de exercer uma função estratégica de planejamento e integração da política estadual de logística e transportes dentro de uma estrutura em que competências de planejamento, regulação, concessão e execução permanecem distribuídas entre diferentes órgãos. O diagnóstico evidencia, portanto, a necessidade de maior clareza na separação entre funções estratégicas de planejamento e governança e funções executivas e operacionais, de modo a fortalecer a capacidade institucional da SLT para formular políticas, coordenar o planejamento multimodal, estabelecer prioridades e acompanhar a implementação dos investimentos necessários ao desenvolvimento do sistema logístico paulista.

b) Análise

A análise desenvolvida no Produto D-18 evidencia que o problema institucional relacionado à Subsecretaria de Logística e Transportes – SLT não decorre exclusivamente da quantidade de atribuições existentes, mas da forma como diferentes funções do ciclo de planejamento e gestão dos transportes estão distribuídas entre órgãos e entidades da Administração Estadual. O relatório identifica, como aspectos transversais à governança dos diferentes modais, a

segregação das funções de planejamento, exercidas principalmente pela SEMIL e pela STM em seus respectivos campos de atuação, em relação à função de Poder Concedente atribuída à SPI, bem como a concentração, na própria estrutura da SEMIL, de funções executivas que coexistem com sua atribuição primordial de planejamento.

No caso específico da SLT, essa configuração faz com que uma estrutura responsável pela formulação de políticas, elaboração de planos, planejamento estratégico e integração dos diferentes modos de transporte também concentre determinadas atribuições de natureza executiva. O Produto D-18 entende que essa sobreposição funcional reduz a possibilidade de dedicação integral da SEMIL às atividades de planejamento e indica a conveniência de maior separação entre as funções estratégicas e executivas.

A questão deve ser considerada, ainda, em conjunto com a distribuição das demais competências do setor. Conforme identificado no Produto D-18, o planejamento, o exercício do Poder Concedente, a regulação, a fiscalização e a execução das políticas de transportes envolvem, conforme o modal, SEMIL, SPI, STM, ARTESP, DER/SP e outras entidades estaduais. O relatório registra situações de indefinição ou potencial sobreposição de competências, como as relacionadas às funções de órgão executivo atribuídas à ARTESP, à atuação nos serviços não delegados e, em determinados casos, à própria delimitação das atribuições entre as Secretarias envolvidas.

Diante desse diagnóstico, um primeiro caminho apontado pelo Produto D-18 consiste em promover maior especialização institucional, preservando na SEMIL e na SLT as funções de planejamento, formulação de políticas e coordenação estratégica e transferindo determinadas funções de caráter executivo para entidade da Administração Pública com estrutura e atribuições compatíveis. O relatório menciona, nesse contexto, o DER/SP como possível destinatário de funções executivas atualmente concentradas na SLT. Essa alternativa permitiria reforçar a vocação da Subsecretaria como núcleo de planejamento da logística e dos transportes estaduais, sem necessariamente ampliar sua estrutura com atividades operacionais.

Entretanto, a transferência de atribuições executivas, isoladamente, não resolve todas as questões identificadas. A segregação entre planejamento, Poder Concedente, regulação e execução exige mecanismos permanentes de articulação institucional para que as decisões tomadas em cada etapa permaneçam vinculadas às políticas e prioridades estabelecidas para o setor. Nesse sentido, o Produto D-18 também aponta a possibilidade de manutenção da atual estrutura administrativa das Secretarias, acompanhada do fortalecimento de mecanismos de governança capazes de integrar SEMIL, SPI e STM e, em nível técnico, as entidades responsáveis pela execução e regulação.

Essa alternativa apresenta a vantagem de evitar uma nova reorganização ampla da Administração Estadual, especialmente diante das recentes alterações institucionais já realizadas, ao mesmo tempo em que busca estabelecer instâncias permanentes de coordenação entre os responsáveis pelo planejamento, estruturação de projetos, concessões, regulação e execução. A efetividade desse modelo, contudo, depende da definição clara das responsabilidades de cada participante e da existência de procedimentos que garantam que as decisões de caráter executivo e regulatório permaneçam alinhadas ao planejamento estratégico do setor.

Outra dimensão relevante consiste no fortalecimento da própria capacidade institucional da SLT para exercer sua função de planejamento. A eventual redução das atribuições executivas deve ser acompanhada da preservação do conhecimento técnico acumulado e do fortalecimento das capacidades necessárias à elaboração e atualização dos planos estaduais de logística e transportes, realização de estudos estratégicos, avaliação de projetos, definição de prioridades de investimento, integração multimodal, acompanhamento de indicadores e monitoramento da implementação das políticas públicas.

Assim, os caminhos identificados não devem ser compreendidos como alternativas necessariamente excludentes. A reorganização das funções executivas pode ser combinada com o fortalecimento da capacidade de planejamento da SLT e com mecanismos permanentes de governança e articulação entre SEMIL, SPI, STM, ARTESP, DER/SP e demais entidades envolvidas. O ponto central indicado pelo diagnóstico do Produto D-18 é a necessidade de estabelecer uma separação funcional mais clara entre planejamento, poder concedente, regulação e execução, preservando, simultaneamente, instrumentos de coordenação capazes de assegurar coerência entre essas diferentes etapas da política estadual de logística e transportes. Ressalta-se, contudo, que a definição e a avaliação de novos possíveis arranjos institucionais para o setor constituem objeto de estudo específico do Produto D-18.1, no qual serão aprofundadas as alternativas de reorganização das competências, estruturas e mecanismos de governança. Dessa forma, no âmbito do presente Produto D-11, cabe identificar a questão como fator institucional relevante para os cenários futuros, sem antecipar a definição do modelo institucional a ser eventualmente adotado.

c) Encaminhamento

Diante das questões identificadas no atual arranjo institucional, entende-se necessário avançar na avaliação da distribuição de competências relacionadas ao planejamento, poder concedente, regulação e execução das políticas de logística e transportes, buscando maior clareza na definição das responsabilidades dos órgãos e entidades envolvidos e maior integração entre essas diferentes funções.

Nesse processo, deverá ser considerada a possibilidade de fortalecimento da SLT como estrutura responsável pelo planejamento estratégico e multimodal da logística e dos transportes estaduais, inclusive mediante a avaliação das funções executivas atualmente inseridas em sua estrutura e de sua eventual alocação em outros órgãos ou entidades com atribuições compatíveis. Da mesma forma, deverão ser avaliados mecanismos de articulação entre SEMIL, SPI, STM, ARTESP, DER/SP e demais entidades envolvidas, de forma a assegurar a continuidade entre planejamento, estruturação de projetos, execução, regulação e acompanhamento das políticas públicas. Tais possibilidades decorrem dos aspectos institucionais identificados no D-18, que aponta, entre as alternativas analisadas, a separação entre funções de planejamento e execução e o estabelecimento de mecanismos de governança entre os diferentes órgãos envolvidos.

A definição de eventual novo arranjo institucional, contudo, não constitui objeto de deliberação do presente Produto D-11. Os possíveis modelos de reorganização institucional, incluindo a redistribuição de competências, a estrutura de governança e as alternativas para o exercício das funções atualmente desempenhadas pela SLT, são objeto de estudo e aprofundamento específico no Produto D-18.1.

Dessa forma, para fins do Produto D-11, o encaminhamento consiste em reconhecer o rearranjo institucional como condicionante relevante para a implementação das ações e para a construção dos cenários futuros do PLI-SP 2050, devendo as definições decorrentes dos estudos desenvolvidos no Produto D-18.1 ser posteriormente incorporadas ao planejamento, quando aplicável.

10.4 Estratégias para adaptação e resiliência às mudanças climáticas

a) Contextualização

As mudanças climáticas tendem a aumentar a frequência e a intensidade de eventos capazes de interromper a infraestrutura de transportes. Chuvas intensas, inundações, escorregamentos, incêndios e estiagens afetam rodovias, ferrovias, portos, aeroportos e hidrovias de formas distintas. Além dos danos físicos, esses eventos podem bloquear corredores, aumentar tempos

e custos de viagem e comprometer o abastecimento e o acesso da população a serviços essenciais.

No Estado de São Paulo, a vulnerabilidade é especialmente relevante nos corredores que atravessam áreas serranas e conectam o planalto ao litoral. Escorregamentos e quedas de barreiras podem interromper simultaneamente o transporte regional, o turismo e o acesso aos portos. Os trechos litorâneos também estão sujeitos a chuvas intensas, inundações, erosão e outros processos costeiros, com impactos sobre rodovias, áreas urbanas e instalações logísticas.

O problema é mais grave quando municípios ou comunidades dependem de uma única ligação. Nesses casos, uma interrupção pode impedir temporariamente o acesso a hospitais, escolas, mercados e serviços de emergência. A resiliência não depende apenas da resistência física da via, mas também da existência de rotas alternativas, sistemas de alerta, equipes de resposta e planos para restabelecer a circulação.

Nas regiões agrícolas, incêndios podem afetar a operação de rodovias e ferrovias, reduzir a visibilidade e danificar equipamentos. A manutenção de aceiros e a coordenação com produtores, concessionárias e órgãos de emergência constituem medidas relevantes para reduzir esse risco. Na Hidrovia Tietê–Paraná, por sua vez, períodos de estiagem e níveis insuficientes de água podem limitar a navegação e comprometer a confiabilidade do transporte de cargas.

Os riscos também alcançam portos, aeroportos, dutos, terminais e sistemas de energia e telecomunicações associados aos transportes. Como essas infraestruturas operam de forma interdependente, a falha de um único componente pode produzir efeitos sobre diferentes cadeias logísticas. A análise precisa considerar não apenas a exposição de cada ativo, mas também sua importância para o funcionamento do sistema e as consequências de sua indisponibilidade.

Nesse contexto, adaptação e resiliência devem ser incorporadas ao planejamento, aos projetos, às concessões e à gestão dos ativos. Isso envolve atualizar padrões de drenagem e estabilidade, identificar pontos críticos, monitorar ameaças, preparar planos de contingência e definir responsabilidades para prevenção, resposta e recuperação.

O problema consiste, portanto, em identificar quais ativos são mais vulneráveis, quais interrupções produziriam os maiores impactos e quais medidas podem manter um nível mínimo de operação. Essa abordagem complementa as políticas de redução de emissões: enquanto a mitigação atua sobre as causas das mudanças climáticas, a adaptação procura reduzir os danos e preservar o funcionamento do sistema de transportes diante dos eventos que não podem ser evitados.

b) Análise

O Estado de São Paulo já dispõe de instrumentos técnicos para tratar o risco climático sobre a infraestrutura rodoviária, ainda que com cobertura territorial restrita. O Plano de Contingência para as rodovias do Litoral Norte, elaborado para o DER/SP, estabeleceu uma metodologia de risco dinâmico que combina a suscetibilidade do terreno, classificada previamente para cada unidade de análise, com a chuva observada e prevista, resultando em níveis operacionais que vão do monitoramento ao alerta máximo. Essa metodologia foi implementada em um sistema automatizado, o PLI-HazardTrack, desenvolvido no âmbito do PLI-SP 2050, que atualiza continuamente o nível de risco de movimentos de massa e de inundação em 809 unidades de análise distribuídas em quatro regiões dos eixos SP-055 e SP-098, a partir de dados de precipitação por satélite do INPE ancorados em medições de pluviômetros da rede estadual.

O mesmo sistema incorpora um segundo módulo, voltado ao risco de fogo, que utiliza o produto diário do INPE para classificar a malha rodoviária estadual em trechos, com horizonte observado e previsão de três dias. Diferentemente do módulo geodinâmico, esse componente cobre a totalidade das rodovias sob jurisdição do DER/SP, o que permite acompanhar o risco de incêndio nas regiões agrícolas e de interface com áreas de vegetação mencionadas na contextualização.

Os mapas resultantes constituem camadas geradoras de risco no sentido adotado pelo PLI-SP 2050: informação georreferenciada que qualifica cada trecho da rede segundo a probabilidade de interrupção ou de degradação de suas condições operacionais. Cabe distinguir essas camadas das restrições operacionais e administrativas utilizadas para orientar o roteamento de veículos, que respondem a regras de circulação e não a condicionantes climáticas. Para os fins deste item, interessam apenas as camadas cuja origem é um evento climático ou dele decorrente.

A principal limitação do monitoramento preditivo é sua abrangência. O módulo geodinâmico restringe-se aos corredores serra-litoral do Litoral Norte, onde existe classificação prévia de suscetibilidade. Fora dessas áreas, o Estado não dispõe de leitura contínua sobre a exposição das rodovias a escorregamentos e inundações, ainda que outros trechos atravessem áreas serranas e planícies sujeitas a eventos semelhantes. A ampliação da cobertura depende de estudos de suscetibilidade por unidade de análise, que são onerosos e demandam priorização.

Nesse ponto, um segundo sistema desenvolvido no âmbito do PLI-SP 2050, o PLI Reporta, oferece um complemento relevante. Trata-se de plataforma de registro cidadão de ocorrências na malha rodoviária, com categorias que incluem alagamento, queda de árvore, incêndio, bloqueio total e outros eventos com origem climática, cada registro georreferenciado e datado e submetido a moderação por gestor antes da publicação. Por depender da observação direta dos usuários da via, sua cobertura é extensiva a toda a rede estadual, ainda que sem a profundidade analítica do monitoramento por unidade de análise. A arquitetura do sistema prevê, adicionalmente, que a ocorrência confirmada na moderação seja encaminhada à instituição responsável pela resposta, como Defesa Civil, Corpo de Bombeiros, DER/SP ou concessionária, funcionalidade ainda não implementada na versão atual.

A combinação dos dois sistemas fecha o ciclo descrito na contextualização. O monitoramento preditivo antecipa a elevação do risco nas áreas cobertas; o registro de ocorrências documenta o que efetivamente aconteceu, tanto dentro quanto fora dessas áreas; e o encaminhamento aciona a resposta institucional. Dentro das áreas monitoradas, os registros permitem verificar a aderência entre o nível de alerta emitido e a ocorrência real, o que é condição para calibrar a metodologia. Fora delas, a recorrência de ocorrências por trecho passa a ser um critério objetivo para decidir onde a classificação de suscetibilidade e o monitoramento contínuo devem ser estendidos.

O terceiro componente do arranjo é a resposta operacional durante a interrupção. O PLI Smart Router, também desenvolvido no âmbito do PLI-SP 2050, calcula rotas alternativas na malha estadual considerando as camadas de eventos ativos e permite comparar o trajeto convencional com o trajeto que contorna os trechos afetados, com estimativa de distância e tempo adicionais. Essa capacidade responde diretamente ao problema das ligações únicas identificado na contextualização: quando não há rota alternativa viável, o custo do desvio torna explícita a criticidade do trecho e fundamenta a prioridade de intervenção.

Para a construção de cenários, o conjunto oferece dois tipos de parâmetro. O primeiro é a identificação dos trechos com maior probabilidade de indisponibilidade climática, que podem ser tratados como pontos de menor confiabilidade na rede. O segundo é o custo de desvio associado a cada um deles, obtido a partir do roteamento alternativo. Ambos são hoje mensuráveis apenas para as áreas com monitoramento consolidado; a série histórica de ocorrências, à medida que se acumule, poderá estender essa estimativa ao restante da rede.

c) Encaminhamento

A proposta será encaminhada para análise fora da rede no Produto D-14. Não será constituído cenário específico de simulação no Produto D-12, uma vez que a adaptação climática não altera a configuração da oferta de transportes; contudo, os trechos identificados como de maior probabilidade de interrupção poderão ser considerados no D-12 como parâmetro de

sensibilidade, com redução de capacidade ou de confiabilidade nos períodos críticos, conforme as diretrizes do Capítulo 9.

O D-14 deverá avaliar a estruturação de um programa estadual de monitoramento e resposta a riscos climáticos na infraestrutura de transportes, considerando:

- ampliação progressiva da classificação de suscetibilidade e do monitoramento por unidade de análise para além do Litoral Norte, priorizada pela recorrência de ocorrências registradas e pela ausência de rotas alternativas;
- integração formal entre o monitoramento preditivo, o registro de ocorrências e o roteamento alternativo, com definição dos fluxos de informação entre os sistemas;
- implementação do encaminhamento das ocorrências confirmadas às instituições responsáveis pela resposta, com definição de competências, prazos e registro das ações adotadas;
- uso da série histórica de ocorrências para verificação e calibração da metodologia de risco dinâmico;
- extensão do arranjo aos demais modos, em especial à Hidrovia Tietê-Paraná, quanto à estiagem, e aos acessos portuários e aeroportuários;
- incorporação dos requisitos de adaptação aos projetos, contratos de concessão e programas de manutenção, incluindo padrões de drenagem e de estabilidade de taludes.

A análise deverá definir as responsabilidades institucionais pela operação dos sistemas, pela validação das ocorrências e pelo acionamento da resposta, bem como as fontes de recursos para a ampliação da cobertura. Deverá também articular-se com o exame dos aspectos jurídicos e institucionais do Produto D-18, no que se refere às competências de Defesa Civil, DER/SP, ARTESP e concessionárias.

O Produto D-11 registra os instrumentos disponíveis e suas limitações. O Produto D-14 deverá propor o desenho do programa, os critérios de priorização territorial e o cronograma de ampliação da cobertura, de modo que os parâmetros de confiabilidade da rede possam ser incorporados às avaliações de cenários nas revisões subsequentes do PLI-SP 2050.

10.5 Avaliação de incentivos fiscais e criação de fundos ligados ao setor de transportes

a) Contextualização

Os incentivos fiscais têm sido utilizados pelo Estado de São Paulo para reduzir custos, estimular investimentos e preservar serviços considerados estratégicos para o sistema de transportes. Entre os instrumentos empregados ou discutidos estão reduções de ICMS sobre combustíveis e insumos, isenções de IPVA e benefícios associados à implantação de infraestrutura, renovação de frota e adoção de tecnologias de menor impacto ambiental.

No setor aéreo, a redução do ICMS incidente sobre o querosene de aviação busca estimular a oferta de voos e preservar a conectividade regional. No transporte rodoviário de cargas, a isenção de IPVA para caminhões movidos a biometano procura reduzir o custo de adoção dessa tecnologia. Também existem discussões sobre incentivos para ferrovias, terminais intermodais, biocombustíveis e materiais inovadores aplicados à infraestrutura.

Esses instrumentos podem contribuir para objetivos públicos, mas também produzem redução de receitas e nem sempre estão associados a resultados mensuráveis. A concessão de um benefício não garante, isoladamente, a realização de novos investimentos, a abertura de rotas ou a adoção de tecnologias. Parte das atividades beneficiadas poderia ocorrer mesmo na ausência do incentivo, reduzindo sua adicionalidade.

A reforma tributária altera as condições de continuidade dessas políticas. A substituição do ICMS e do ISS pelo Imposto sobre Bens e Serviços ocorrerá gradualmente entre 2029 e 2032, com vigência integral do novo modelo e extinção dos dois tributos em 2033. Com isso, o Estado perderá progressivamente a possibilidade de utilizar alíquotas diferenciadas de ICMS como instrumento próprio de política setorial.

A transição não implica o encerramento das políticas de apoio ao setor de transportes, mas exige a avaliação de instrumentos substitutos. Fundos setoriais, subsídios orçamentários, financiamentos, garantias e pagamentos vinculados ao cumprimento de metas podem assumir funções atualmente exercidas pelos benefícios tributários. Esses mecanismos tornam mais explícito o custo da política e podem facilitar o acompanhamento de seus resultados.

A eventual criação de fundos deverá considerar finalidade, fonte de recursos, beneficiários, governança e critérios de acesso. Também deverá evitar a dispersão de recursos entre programas sem objetivos definidos ou a manutenção automática de benefícios que perderam sua justificativa. Políticas distintas, como apoio à aviação regional, transição energética e promoção da intermodalidade, podem exigir instrumentos e indicadores próprios.

O problema consiste, portanto, em preparar a transição dos incentivos fiscais atuais para mecanismos compatíveis com o novo sistema tributário. Essa preparação requer identificar os benefícios existentes, estimar seus custos e avaliar se os resultados justificam sua manutenção, revisão ou substituição por instrumentos financeiros e orçamentários mais transparentes.

b) Análise

Os incentivos existentes atendem a objetivos distintos e não devem ser avaliados apenas pelo valor da renúncia fiscal. A redução do ICMS sobre o QAV busca preservar rotas e ampliar a oferta de voos; a isenção de IPVA para caminhões a biometano procura reduzir o custo de renovação da frota; e os benefícios associados a ferrovias, terminais e insumos pretendem estimular investimentos de longa maturação. Em todos os casos, a avaliação deve verificar se o incentivo altera efetivamente a decisão do beneficiário.

A análise desenvolvida para o setor aéreo demonstra a dimensão fiscal dessas políticas. A diferença entre as alíquotas de 18% e 12% sobre o QAV representaria custo fiscal bruto estimado em aproximadamente R$ 760 milhões por ano, considerando os volumes e preços observados em 2025. A magnitude do valor reforça a necessidade de associar o benefício a contrapartidas, como criação e manutenção de rotas, frequências mínimas e atendimento a aeroportos regionais.

No transporte de cargas, a isenção de IPVA para caminhões movidos a biometano possui custo inicial mais limitado, devido ao número ainda reduzido de veículos, mas tende a crescer com a expansão da frota. Sua efetividade depende da diferença de preço dos veículos, da disponibilidade do combustível e da infraestrutura de abastecimento. Sem essas condições, a renúncia pode ser insuficiente para alterar a decisão de aquisição.

A reforma tributária modifica estruturalmente esse conjunto de instrumentos. A redução gradual do ICMS entre 2029 e 2032 diminuirá a capacidade do Estado de utilizar alíquotas diferenciadas para apoiar atividades específicas. A partir de 2033, sua extinção elimina esse mecanismo estadual, tornando necessária a transição para subsídios orçamentários, fundos, garantias ou pagamentos vinculados à prestação de serviços e à obtenção de resultados.

Tabela 10-1: Alternativas de instrumento para políticas fiscais no setor de transporte.

Política apoiada	Instrumento atual ou discutido	Alternativa após a transição
Conectividade aérea regional	Redução do ICMS sobre o QAV	Fundo ou programa de apoio a rotas, com pagamentos condicionados a metas
Renovação de caminhões	Isenção de IPVA e possíveis benefícios tarifários	Programa temporário de apoio à renovação de frota
Infraestrutura ferroviária e intermodal	Incentivos sobre insumos e investimentos	Fundo de investimento, financiamento ou garantias
Biocombustíveis e descarbonização	Benefícios tributários e atributos ambientais	Fundo de transição energética e pagamentos por resultados ambientais
Tecnologias inovadoras	Incentivos tributários pontuais	Financiamento de pilotos, testes e adoção inicial

Elaboração: Consórcio Concremat-Transplan.

Os fundos apresentam a vantagem de explicitar o custo da política no orçamento e permitir a definição de metas, critérios de seleção e limites de gasto. Por outro lado, sua criação não assegura disponibilidade permanente de recursos. Um fundo sem fonte de receita estável, regras de priorização e avaliação de resultados pode tornar-se apenas uma estrutura administrativa sem capacidade efetiva de atuação.

Também não é recomendável substituir automaticamente cada benefício fiscal por transferência de valor equivalente. A transição deve ser precedida de avaliação da adicionalidade, do custo por resultado e da permanência do problema que justificou o incentivo. Benefícios sem efeitos comprovados podem ser encerrados, enquanto políticas consideradas estratégicas devem ser redesenhadas com prazo, orçamento e contrapartidas

c) Encaminhamento

O assunto será concluído no Produto D-11, sem encaminhamento para simulação no D-12 ou análise adicional no D-14. O D-11 deverá registrar a necessidade de iniciar, durante a transição tributária, a criação e a estruturação de fundos ou programas financeiros capazes de substituir os incentivos baseados no ICMS.

A estruturação desses mecanismos deverá considerar:

- finalidade e público beneficiário claramente definidos;
- fonte de recursos e compatibilidade com o planejamento orçamentário;
- critérios transparentes de seleção;
- metas e contrapartidas verificáveis;
- limites anuais de despesa;
- prazo de vigência e mecanismos de revisão;
- indicadores de custo e resultado;
- prestação de contas e avaliação periódica de efetividade.

Deverão ser consideradas, ao menos, três frentes: apoio à conectividade aérea regional; transição energética e renovação de frotas; e promoção da infraestrutura ferroviária e

intermodal. Essas frentes poderão ser atendidas por fundos distintos ou por programas específicos dentro de uma estrutura financeira comum, conforme avaliação do Governo do Estado.

A preparação deverá ocorrer antes da redução mais intensa do ICMS, permitindo que os novos mecanismos sejam testados e estruturados durante o período de transição. A coexistência temporária entre incentivos tributários e fundos deverá evitar sobreposição de benefícios e assegurar que a migração não produza interrupção abrupta de políticas consideradas estratégicas.

O Produto D-11 conclui, portanto, que a reforma tributária exige mudança no modelo estadual de incentivo ao setor de transportes. A continuidade das políticas não deverá depender de benefícios fiscais cuja base desaparecerá em 2033, mas de instrumentos financeiros e orçamentários transparentes, vinculados a objetivos públicos e resultados mensuráveis.

11 SÍNTESE DOS CONTATOS SETORIAIS

Os contatos setoriais indicam um conjunto amplo de temas que afetam a logística, a mobilidade regional, a infraestrutura de transportes, a transição energética e a governança setorial em São Paulo. O conteúdo está organizado em seis eixos: transição energética e combustíveis; integração modal e novos serviços; infraestrutura e gestão rodoviária; mobilidade e desenvolvimento do setor aéreo; planejamento territorial e desenvolvimento regional; e segurança, tecnologia, governança, resiliência e financiamento.

No eixo de **transição energética e combustíveis**, foram examinados os incentivos ao uso de combustíveis de baixo impacto ambiental no transporte de cargas e o fomento às dutovias para biocombustíveis. As discussões destacaram o potencial do biometano no transporte pesado, a necessidade de infraestrutura de abastecimento e certificação e os possíveis efeitos de incentivos sobre tarifas e receitas públicas. Para as dutovias, foram consideradas alternativas de conexão entre áreas produtoras, redes de gás, terminais e polos consumidores, condicionadas à disponibilidade de oferta, escala, custos de implantação e coordenação regulatória.

O eixo de **integração modal e novos serviços** concentrou as conexões com o transporte marítimo, o uso de vias segregadas para cargas nos corredores do TIC, o desenvolvimento das áreas próximas às ferrovias, a manutenção do transporte inter-regional de passageiros, os sistemas intermodais no interior, a expansão da Hidrovia Tietê–Paraná, o transporte aquaviário de passageiros e as plataformas digitais de cargas. As análises reforçaram a centralidade do sistema portuário de Santos, a necessidade de articulação com São Sebastião e outras alternativas portuárias, o potencial da hidrovia e dos terminais interiores e a importância de integrar infraestrutura, operação e ordenamento territorial.

Nesse conjunto, algumas propostas apresentaram limitações específicas. A implantação de vias segregadas adicionais para cargas junto aos corredores do TIC não demonstrou viabilidade técnica nas condições analisadas e foi encerrada no D-11. No caso das plataformas digitais, verificou-se que os serviços de aproximação entre oferta e demanda de transporte já são prestados pelo mercado privado, cabendo ao Estado apoiar o ambiente geral de inovação, sem necessidade de estruturar uma plataforma pública. As demais propostas exigem aprofundamentos distintos, conforme produzam efeitos sobre a rede ou dependam de avaliação econômica, territorial, regulatória e institucional.

No eixo de **infraestrutura e gestão rodoviária**, os contatos foram consolidados nos programas de novas rodovias, ampliação e modernização da capacidade, segurança viária, regulação e priorização de demandas e pavimentação, recuperação ou estadualização de rodovias rurais. A carteira reúne novas ligações, prolongamentos, contornos, duplicações, dispositivos, acessos e outras adequações. A segurança foi tratada como critério transversal: intervenções que ampliam capacidade ou corrigem conflitos também podem reduzir riscos, mas seus resultados dependem da sobreposição com os trechos críticos e da adequação do projeto ao tipo de sinistro. Para as solicitações de empresas e municípios, foi indicada a necessidade de critérios transparentes de registro, classificação e hierarquização.

Alguns projetos identificados nos contatos setoriais contribuem simultaneamente para a resolução de diferentes problemas. Intervenções de ampliação e modernização da capacidade rodoviária, como duplicações, contornos, novos dispositivos e adequações de interseções, podem também reduzir conflitos de tráfego e melhorar a segurança viária. Da mesma forma, novos acessos portuários, ferroviários e aeroportuários podem ampliar a capacidade da rede, fortalecer a integração modal e apoiar o desenvolvimento regional. A avaliação nos produtos subsequentes deverá considerar esses efeitos combinados, evitando a duplicação dos projetos ou a contabilização repetida de seus benefícios.

O eixo de **mobilidade e desenvolvimento** do setor aéreo reúne o apoio ao Plano Cicloviário do Estado, às rotas cicloturísticas e religiosas e as estratégias para o setor aéreo paulista. No transporte aéreo, destacaram-se a concentração da demanda em Guarulhos e Congonhas, a capacidade disponível em Viracopos, a subutilização de aeroportos do interior e a necessidade de articular acessibilidade terrestre, oferta de voos e instrumentos de incentivo. A transição do ICMS para o novo sistema tributário acrescenta a necessidade de reavaliar os mecanismos utilizados para apoiar a conectividade aérea regional.

No eixo de **planejamento territorial e desenvolvimento regional**, foram reunidos o planejamento de retroáreas e bases offshore do pré-sal, a articulação com os municípios e a formação de polos associados às novas infraestruturas logísticas. As contribuições indicam que os benefícios das intervenções não decorrem automaticamente de sua implantação. Planos diretores, zoneamento, disponibilidade de áreas, acessos, licenciamento, infraestrutura urbana e mecanismos de coordenação devem ser compatibilizados para que novos terminais, estações, portos e corredores apoiem atividades econômicas sem ampliar conflitos urbanos, ambientais ou fundiários.

O último eixo abrange **segurança e conectividade** dos sistemas de cargas, adoção de novas tecnologias em licitações, rearranjo institucional, adaptação climática e instrumentos de financiamento. Foram identificadas possibilidades de integrar informações de centros de controle, aprimorar o monitoramento de ocorrências e ampliar a conectividade dos corredores, observados os requisitos de interoperabilidade, proteção de dados e cibersegurança. Também foram examinados instrumentos de experimentação e contratação de tecnologias inovadoras, a capacidade institucional necessária à execução da carteira, a incorporação do risco climático ao planejamento e a substituição progressiva de incentivos vinculados ao ICMS por mecanismos financeiros compatíveis com a reforma tributária.

Os encaminhamentos foram definidos conforme a natureza de cada proposta. Intervenções capazes de alterar a configuração, a capacidade ou os fluxos da rede serão estruturadas e simuladas no Produto D-12, incluindo projetos adicionais de conexão portuária, novas rodovias, ampliações de capacidade e acessos terrestres representáveis no modelo. Políticas tarifárias e fiscais, serviços, programas territoriais, soluções institucionais, modelos regulatórios e projetos cuja avaliação dependa de análise econômica ou operacional fora da macrossimulação serão aprofundados no Produto D-14. Alguns temas combinam as duas formas de tratamento, utilizando os resultados da rede como insumo para análises complementares.

PARTE III – IMPLICAÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

A Parte III consolida as implicações das análises desenvolvidas nas Partes I e II para a definição dos cenários futuros do PLI-SP 2050. Seu objetivo é estabelecer a transição entre o levantamento de tecnologias, novos serviços e contribuições setoriais e sua eventual incorporação às etapas posteriores de modelagem, simulação e avaliação de alternativas.

A análise parte do reconhecimento de que a evolução futura do sistema logístico paulista não será determinada apenas pela expansão da infraestrutura física ou pelo crescimento da demanda. Mudanças na matriz energética, no custo relativo das tecnologias, nos padrões operacionais dos modais, na disponibilidade de infraestrutura complementar, nos marcos regulatórios e nas estratégias dos agentes públicos e privados também poderão alterar a forma como a rede será utilizada ao longo do horizonte do Plano.

Nesse sentido, a Parte III não busca ampliar o inventário de tecnologias ou de propostas já apresentado nas seções anteriores, mas qualificar sua utilidade para a construção dos cenários. Para isso, considera, de um lado, a maturidade tecnológica, a disponibilidade comercial, os custos relativos e o potencial de difusão das soluções analisadas; de outro, as evidências obtidas nos contatos setoriais, que indicam condições de adoção, barreiras institucionais, restrições operacionais e graus distintos de aderência ao contexto paulista.

Essa distinção é relevante porque a existência de uma tecnologia disponível não implica, necessariamente, sua adoção em escala no horizonte do Plano. A difusão de novas soluções depende de fatores como custo total de propriedade, ciclos de renovação de frota, disponibilidade de infraestrutura energética, capacidade de investimento, regulação, incentivos econômicos, exigências ambientais e coordenação entre agentes. Esses elementos definem não apenas se determinada tecnologia poderá ser incorporada, mas em que ritmo, em quais segmentos e sob quais condições.

A avaliação também reconhece que a adoção tecnológica tende a ocorrer de forma heterogênea entre modais, regiões e cadeias produtivas. Tecnologias com maior aderência a frotas cativas, operações urbanas ou serviços de alta previsibilidade podem apresentar difusão mais rápida, enquanto soluções voltadas a longas distâncias, cargas pesadas ou setores de difícil eletrificação tendem a depender de infraestrutura específica, maior escala de demanda e avanços regulatórios ou econômicos.

Dessa forma, a Parte III organiza os principais elementos que deverão orientar a construção dos cenários futuros, distinguindo tecnologias e serviços com maior probabilidade de incorporação no curto e médio prazo daqueles que devem ser tratados como hipóteses de sensibilidade, condicionantes de longo prazo ou temas de monitoramento. Essa diferenciação contribui para que os cenários do PLI-SP 2050 sejam construídos a partir de trajetórias plausíveis de transformação, e não apenas de possibilidades tecnológicas abstratas.

12 IMPLICAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO, SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

As análises desenvolvidas no Produto D-11 indicam que a construção e a avaliação dos cenários futuros do PLI-SP 2050 deverão incorporar, de forma articulada, fatores tecnológicos, econômicos, energéticos, operacionais, institucionais e regulatórios. As transformações analisadas não se restringem à substituição de tecnologias existentes, mas envolvem mudanças na estrutura de custos, nos padrões de oferta, na eficiência dos modos, nos requisitos de infraestrutura e na competitividade relativa entre alternativas logísticas.

Nesse contexto, o papel deste capítulo não é definir previamente quais temas ou propostas deverão compor as alternativas futuras do PLI-SP 2050, mas estabelecer como os fatores analisados ao longo do Produto D-11 poderão ser traduzidos em premissas, parâmetros, alterações nas configurações de oferta, hipóteses de sensibilidade ou elementos de análise complementar nos produtos subsequentes.

A consolidação das alternativas de atuação, sua representação no modelo de transportes e a definição das combinações a serem simuladas serão desenvolvidas no Produto D-12. O Produto D-13, por sua vez, utilizará os resultados obtidos nas simulações e análises complementares para identificar e consolidar pontos de atenção no sistema logístico, inclusive aqueles não capturados pela macrossimulação.

12.1 Princípios para incorporação dos fatores aos cenários futuros

A incorporação dos fatores analisados no Produto D-11 deverá considerar a natureza de cada transformação e sua capacidade de produzir efeitos sobre a demanda, a oferta ou as condições operacionais do sistema de transportes.

Nem todos os fatores deverão ser tratados da mesma forma no processo de simulação. Determinadas transformações poderão resultar diretamente em modificações da configuração de oferta, como a implantação de novas infraestruturas ou serviços. Outras poderão ser representadas por alterações nos atributos e parâmetros utilizados pelo modelo, enquanto fatores caracterizados por maior incerteza poderão ser avaliados por meio de análises de sensibilidade.

Há, ainda, aspectos cuja natureza institucional, regulatória, tecnológica ou operacional limita sua representação direta na macrossimulação. Nesses casos, sua relevância para os cenários futuros deverá ser abordada por meio de análises complementares e de sua consideração na identificação dos pontos de atenção do sistema.

Dessa forma, a incorporação dos fatores analisados no Produto D-11 deverá observar, sempre que pertinente, quatro formas principais de tratamento:

- Representação direta na configuração de oferta, quando o fator resultar em alteração física ou operacional passível de incorporação à rede de simulação;
- Parametrização, quando seus efeitos puderem ser traduzidos em alterações de custos, capacidades, velocidades, tempos, impedâncias ou outros atributos do modelo;
- Análise de sensibilidade, quando houver incerteza relevante quanto a magnitude, velocidade ou abrangência de seus efeitos;
- Análise complementar, quando sua natureza não permitir representação satisfatória no modelo de transportes.

Essas formas de tratamento não são mutuamente excludentes e poderão ser combinadas conforme a natureza das alternativas analisadas.

12.2 Temporalidade, maturidade e incerteza das transformações analisadas

A primeira implicação para a simulação refere-se à necessidade de diferenciar os ritmos de difusão tecnológica por modo, segmento e horizonte temporal. Tecnologias mais maduras, como a eletrificação de veículos leves, ônibus e determinadas frotas cativas, tendem a apresentar maior previsibilidade de incorporação no curto (2028-2033) e médio prazo (2033-2043). Já soluções como hidrogênio de baixo carbono, *e-fuels* e veículos autônomos permanecem sujeitas a maior incerteza quanto a custo, escala, infraestrutura, regulação e aderência operacional.

Por essa razão, essas tecnologias deverão ser tratadas de forma compatível com o seu grau de maturidade. Tecnologias com maior previsibilidade poderão integrar premissas associadas às configurações futuras analisadas, enquanto tecnologias cuja difusão permaneça mais incerta poderão ser incorporadas por meio de hipóteses de adoção tecnológica e análises de sensibilidade.

O biometano apresenta papel específico nessa leitura. Trata-se de uma alternativa com maior aderência ao contexto brasileiro e paulista, tanto pela relação com a base agroindustrial e sucroenergética quanto pela possibilidade de integração com infraestruturas existentes de gás. No transporte pesado e em operações de média e longa distância, o biometano pode representar rota complementar de descarbonização, especialmente em corredores com disponibilidade de produção, abastecimento e escala de demanda.

Sua eventual incorporação às análises futuras deverá considerar a localização da oferta potencial, a capacidade de distribuição, a disponibilidade de postos ou *hubs* de abastecimento, os custos relativos frente ao diesel e a preservação dos atributos ambientais associados ao combustível. Assim, mais do que estabelecer uma trajetória tecnológica única, as análises futuras deverão permitir distinguir, quando pertinente, hipóteses de adoção tendencial, direcionada ou acelerada, associadas aos horizontes do PLI-SP 2050 e utilizadas como premissas ou sensibilidades das análises.

12.3 Infraestrutura habilitadora e implicações sobre a configuração de oferta

A segunda implicação diz respeito à infraestrutura habilitadora necessária à adoção das tecnologias, serviços e soluções analisadas. A adoção de novas tecnologias depende da existência de redes de recarga, abastecimento, terminais adaptados, sistemas de suprimento energético, oficinas, padrões técnicos e mecanismos de operação compatíveis. Dessa forma, trajetórias de transformação tecnológica não deverão ser consideradas exclusivamente como percentuais de participação na frota ou no consumo energético, mas associadas às condições necessárias à sua implantação efetiva.

Hipóteses de adoção mais acelerada somente serão consistentes quando acompanhadas de pressupostos compatíveis de expansão da infraestrutura elétrica, da rede de gás, de corredores de abastecimento, de *hubs* energéticos e de instalações de apoio. Quando esses elementos implicarem modificações passíveis de representação na rede de transportes, deverão ser considerados na formulação das alternativas de atuação e das respectivas configurações de oferta a serem estruturadas no Produto D-12. Nos demais casos, sua disponibilidade ou insuficiência poderá ser tratada como condicionante da alternativa analisada e, quando pertinente, como potencial ponto de atenção a ser aprofundado no Produto D-13.

12.4 Tradução em parâmetros econômicos e operacionais

A terceira implicação refere-se aos parâmetros econômicos e operacionais utilizados nas análises futuras. As tecnologias e soluções analisadas podem alterar custos de aquisição, custos operacionais, consumo energético, produtividade, tempos de operação, emissões e requisitos de manutenção. Para fins de modelagem, os efeitos relevantes deverão ser traduzidos, quando possível, em parâmetros compatíveis com cada modal e tipo de operação, evitando a aplicação uniforme de premissas tecnológicas a segmentos com características distintas. Entre os parâmetros potencialmente afetados encontram-se:

- custos operacionais;
- custos ou impedâncias associados à utilização dos diferentes modos;
- consumo energético;
- tempos de operação;
- produtividade;
- capacidade;
- velocidades;
- tempos associados às operações de transferência;
- confiabilidade e regularidade dos serviços;
- fatores de emissão.

Sempre que pertinente, deverão ser considerados custos relativos, eficiência energética, fatores de emissão, vida útil dos ativos, taxas de renovação de frota e sensibilidade às variações de preço dos combustíveis. A definição de quais parâmetros efetivamente deverão ser alterados dependerá da alternativa de atuação analisada e da possibilidade de representação de seus efeitos no modelo de transportes.

12.5 Digitalização e representação de efeitos indiretos

A quarta implicação envolve a digitalização e os sistemas inteligentes de transporte. Tecnologias como ITS, C-ITS, V2X, plataformas de gestão operacional, sistemas de controle e ferramentas de apoio à decisão podem produzir ganhos de eficiência, segurança, confiabilidade e uso da capacidade existente. Sua incorporação às análises deverá distinguir as soluções passíveis de representação direta daqueles cujos efeitos se manifestam predominantemente de forma indireta.

Quando tecnicamente justificável, efeitos associados a essas tecnologias poderão ser representadas por meio de alterações em parâmetros de produtividade, capacidade, tempos operacionais, regularidade, confiabilidade ou outros atributos compatíveis com a estrutura do modelo. Quando não houver base técnica suficiente para uma parametrização direta, deverão ser utilizadas análises de sensibilidade ou avaliações complementares, evitando atribuir ao modelo precisão superior àquela permitida pelas informações disponíveis.

12.6 Condicionantes institucionais e regulatórios

A quinta implicação refere-se à dimensão institucional e regulatória. A velocidade e a extensão da adoção de novas tecnologias e serviços depende da coordenação entre órgãos públicos, concessionárias, operadores privados, agentes reguladores e fornecedores de infraestrutura. Instrumentos como metas contratuais, padrões mínimos de desempenho, certificação de combustíveis, mecanismos de precificação ambiental, incentivos à inovação e regras de acesso à infraestrutura podem alterar o ritmo de difusão tecnológica. Essas condições devem ser

consideradas na construção dos cenários, especialmente na diferenciação entre trajetórias tendenciais, direcionadas e aceleradas.

Por sua natureza, parte desses elementos não será representável diretamente no modelo de transportes. Nesses casos, deverão ser registrados como premissas ou condicionantes para a realização da alternativa e recuperados nas análises complementares e na identificação dos pontos de atenção do Produto D-13. Essa distinção permite evitar que a impossibilidade de representação direta de determinado fator na macrossimulação seja interpretada como ausência de relevância para o PLI-SP 2050.

12.7 Parâmetros ambientais e emissões

No campo das emissões, as análises futuras deverão utilizar fatores compatíveis com o tipo de veículo, modo e tecnologia considerada, incluindo, quando pertinente, análises de sensibilidade relacionadas à evolução tecnológica. As avaliações deverão combinar hipóteses de renovação de frota, participação tecnológica, intensidade de uso e fatores de emissão, de modo a representar defasagem entre a introdução de novas tecnologias nas vendas e sua presença efetiva na frota circulante. Essa distinção é necessária para evitar a superestimação de efeitos ambientais de curto prazo e representar de forma mais realista sua evolução ao longo dos horizontes do PLI-SP 2050.

Os resultados das simulações produzidas no Produto D-12 poderão subsidiar a estimativa de indicadores ambientais e a identificação, no Produto D-13, de situações que mereçam atenção específica. A posterior monetização dos efeitos ambientais, quando aplicável, deverá observar as metodologias previstas para a avaliação de benefícios econômicos nas etapas subsequentes do PLI-SP 2050.

12.8 Diretrizes para incorporação nos Produtos D-12 e D-13

A análise realizada neste produto permite estabelecer uma estrutura geral para a incorporação dos fatores considerados nas etapas seguintes do Plano. Essa estrutura não corresponde ainda à definição das alternativas a serem simuladas nem à consolidação dos temas que deverão originar projetos e intervenções, atividades que serão desenvolvidas nos produtos subsequentes. Para fins de encaminhamento metodológico, os fatores analisados poderão ser classificados de acordo com a forma pela qual interferem nas análises futuras.

Tabela 12-1: Formas de tratamento dos fatores analisados nas etapas subsequentes.

Natureza do efeito	Forma de incorporação	Tratamento predominante no D-12	Tratamento predominante no D-13
Alteração física da infraestrutura ou da oferta de serviços	Modificação da configuração de oferta	Formulação e representação das alternativas no modelo	Avaliação dos pontos de atenção resultantes ou remanescentes
Alteração de capacidade, velocidade, custo, tempo ou demais atributos	Parametrização do modelo	Aplicação dos parâmetros e simulação	Avaliação dos resultados e limitações observadas
Fator com incerteza relevante de adoção ou magnitude	Análise de sensibilidade	Simulação de hipóteses alternativas, quando pertinente	Análise da robustez dos resultados e das incertezas associadas
Fator não representável diretamente pela macrossimulação	Premissa ou análise complementar	Registro como condicionante da alternativa	Identificação de restrições, dependências ou pontos de atenção

Natureza do efeito	Forma de incorporação	Tratamento predominante no D-12	Tratamento predominante no D-13
Condicionante institucional ou regulatório	Premissa de implementação	Consideração na formulação da alternativa	Avaliação como condicionante ou ponto de atenção
Efeito ambiental ou tecnológico dependente dos resultados da rede	Pós-processamento ou indicador complementar	Produção dos resultados necessários à avaliação	Interpretação dos efeitos e identificação de questões relevantes

Fonte: Elaboração Consórcio-Transplan

Essa classificação deverá orientar a passagem entre o Produto D-11 e os Produtos D-12 e D-13, preservando a rastreabilidade entre os fatores analisados e a forma como serão posteriormente considerados. No Produto D-12, os fatores e temas pertinentes serão recuperados para subsidiar a formulação das alternativas de atuação, a definição de suas formas de representação e a construção das configurações de oferta e cenários de simulação. No Produto D-13, os resultados dessas análises serão utilizados, juntamente com avaliações complementares, para identificar saturações, gargalos, restrições, condicionantes e demais pontos de atenção relevantes para o sistema logístico.

12.9 Processo iterativo e encaminhamentos

A construção dos cenários futuros deverá ser compreendida como um processo iterativo. Os resultados das simulações poderão indicar inconsistências, restrições ou impactos não antecipados nas hipóteses inicialmente adotadas, demandando ajustes nas configurações de oferta, nos parâmetros considerados ou nas próprias alternativas de atuação.

A consistência das análises dependerá, portanto, da compatibilização entre projeções tecnológicas, capacidade de implantação da infraestrutura, comportamento da demanda, custos relativos, fatores ambientais e condições institucionais de implementação. Nesse processo, o Produto D-11 estabelece as possibilidades e formas de incorporação dos fatores que podem influenciar o sistema de transportes no horizonte do PLI-SP 2050, sem antecipar a definição das soluções específicas.

A etapa seguinte, desenvolvida no Produto D-12, deverá confrontar essas possibilidades com os prognósticos do sistema e estruturar alternativas de atuação passíveis de avaliação. Os resultados das simulações e as questões não representadas pelo modelo serão posteriormente integrados no Produto D-13 para consolidação dos pontos de atenção, criando a base técnica para a identificação e seleção de projetos e intervenções a serem realizadas no Produto D-14.

13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Produto D-11 – Análise de Fatores que Influenciam Cenários Futuros consolidou um conjunto de elementos tecnológicos, energéticos, operacionais, institucionais e setoriais capazes de influenciar a evolução do sistema logístico paulista no horizonte do PLI-SP 2050. Ao longo do relatório, esses fatores foram examinados considerando seus potenciais efeitos sobre a estrutura de custos, o desempenho operacional dos modos de transporte, as emissões, o consumo energético, os requisitos de infraestrutura, os padrões de operação e a competitividade relativa entre alternativas logísticas.

Na Parte I, foram analisadas novas fontes de energia e tecnologias aplicáveis aos transportes, incluindo eletrificação, biocombustíveis, biogás, biometano, GNL, SAF, hidrogênio de baixo carbono, amônia verde, combustíveis sintéticos, sistemas híbridos, inteligência artificial e sistemas inteligentes de transportes. As análises indicaram que a transição tecnológica e energética deverá ocorrer de forma heterogênea, de acordo com o tipo de operação, a maturidade das soluções, os ciclos de renovação dos ativos, a disponibilidade de infraestrutura de suporte e a viabilidade econômica de sua adoção.

A avaliação das aplicações nos sistemas hidroviário, marítimo-portuário, dutoviário, aeroviário, ferroviário e rodoviário mostrou que não existe uma trajetória única de transformação tecnológica. Em determinados segmentos, a eletrificação apresenta maior aderência; em outros, os biocombustíveis, o biometano, os combustíveis sustentáveis ou as soluções híbridas podem assumir maior relevância. A análise dos custos e das emissões reforçou, portanto, a necessidade de considerar hipóteses diferenciadas, compatíveis com as características e restrições de cada modo e segmento de transporte.

Na Parte II, as contribuições dos contatos setoriais foram organizadas em seis eixos: transição energética e combustíveis; integração modal e novos serviços; infraestrutura e gestão rodoviária; mobilidade e desenvolvimento do setor aéreo; planejamento territorial e desenvolvimento regional; e segurança, tecnologia, governança, resiliência e financiamento. Essa estrutura substituiu os agrupamentos preliminares e reuniu assuntos complementares, reduzindo sobreposições entre propostas de infraestrutura, serviços, instrumentos regulatórios e políticas públicas.

As análises abrangeram incentivos aos combustíveis de baixo impacto, dutovias para biocombustíveis, conexões portuárias, integração ferroviária, transporte inter-regional de passageiros, sistemas intermodais no interior, Hidrovia Tietê–Paraná, transporte aquaviário de passageiros, plataformas digitais de cargas, programas rodoviários, segurança viária, mobilidade cicloviária, desenvolvimento do setor aéreo, retroáreas e bases offshore, articulação municipal, formação de polos regionais, segurança e conectividade das cargas, contratação de tecnologias inovadoras, capacidade institucional, adaptação climática e novos mecanismos de financiamento.

Os temas apresentam diferentes níveis de maturidade, abrangência, viabilidade e disponibilidade de informações. Por essa razão, sua inclusão no D-11 não representa incorporação automática à carteira de investimentos do PLI-SP 2050. O relatório registra os problemas e as oportunidades, organiza as alternativas e estabelece o encaminhamento compatível com a natureza de cada proposta. A seleção definitiva dependerá dos resultados das simulações, das análises complementares e das avaliações econômica, social, ambiental, jurídica, institucional e regulatória previstas nos produtos subsequentes.

Alguns projetos contribuem simultaneamente para a resolução de diferentes problemas e não devem ser associados exclusivamente ao tema em que foram inicialmente classificados. Duplicações, contornos, novos dispositivos e outras ampliações de capacidade podem também

melhorar a segurança viária, reduzir interferências urbanas e ampliar a confiabilidade dos corredores. Da mesma forma, acessos portuários, ferroviários e aeroportuários podem aumentar a capacidade da rede, fortalecer a integração modal e favorecer o desenvolvimento regional. As avaliações posteriores deverão considerar esses efeitos combinados, evitando a duplicação de projetos e a contabilização repetida de seus benefícios.

As análises também permitiram encerrar no próprio D-11 propostas que não justificaram encaminhamento adicional. Para as plataformas digitais para transporte de cargas, verificou-se que os modelos de aproximação entre oferta e demanda já são oferecidos pelo mercado privado, não sendo necessária a criação de uma plataforma pública. A necessidade de estruturar fundos ou programas financeiros em substituição progressiva aos incentivos baseados no ICMS também foi registrada como diretriz do D-11 diante da transição decorrente da reforma tributária.

Na Parte III, foram estabelecidos critérios para a incorporação dos fatores e projetos às etapas posteriores. Intervenções capazes de alterar a configuração, a capacidade, os tempos, os custos ou a distribuição dos fluxos na rede deverão ser estruturadas e simuladas no Produto D-12. Nesse grupo estão, entre outras, novas conexões portuárias, novas rodovias, prolongamentos, contornos, duplicações, ampliações de capacidade e acessos terrestres representáveis no modelo de transportes.

As políticas tarifárias e fiscais, os novos modelos de serviço, os programas territoriais, as soluções institucionais e regulatórias e os projetos cuja avaliação não possa ser adequadamente realizada pela macrossimulação serão aprofundados fora da rede no Produto D-14. Alguns temas exigirão tratamento combinado: os resultados do D-12, como alterações de acessibilidade, carregamento, custos e tempos de viagem, serão utilizados como insumos para avaliações econômicas, territoriais, operacionais ou institucionais desenvolvidas no D-14.

No caso das transformações tecnológicas e energéticas, sua consideração deverá observar ritmos de adoção, taxas de renovação das frotas e dos ativos, vida útil, consumo energético, custos operacionais, fatores de emissão e infraestrutura habilitadora. Quando pertinente, poderão ser adotadas hipóteses tendenciais, direcionadas ou aceleradas, permitindo representar as incertezas associadas à evolução tecnológica ao longo dos horizontes do PLI-SP 2050.

Essas trajetórias deverão manter coerência entre a difusão das tecnologias e a capacidade de implantação da infraestrutura necessária à sua utilização. Hipóteses de expansão da eletrificação, do biometano, dos combustíveis sustentáveis ou de outras soluções de menor emissão, deverão ser acompanhadas da verificação da disponibilidade de redes elétricas, corredores e postos de abastecimento, hubs energéticos, terminais, oficinas, sistemas de controle e demais instalações de apoio.

Os elementos analisados deverão também dialogar com os instrumentos de planejamento energético, territorial e climático elaborados ou em desenvolvimento pelo Estado, especialmente quanto à eletrificação, ao uso de biocombustíveis, à expansão do biometano, ao desenvolvimento de combustíveis de baixo carbono, à adaptação da infraestrutura e às metas de redução de emissões. Essa compatibilização é necessária para assegurar coerência entre o planejamento logístico e as políticas energética, ambiental, urbana e regional do Estado de São Paulo.

Nem todos os fatores serão passíveis de representação direta no PTV Visum. Questões institucionais, regulatórias, territoriais, tecnológicas ou operacionais específicas poderão atuar como premissas, condicionantes ou objetos de análise complementar. A ausência de representação direta na macrossimulação não significa ausência de relevância, mas indica a necessidade de utilizar instrumentos de avaliação compatíveis com a natureza da questão examinada.

No Produto D-12 – Simulação de Cenários Futuros, os projetos representáveis na rede serão confrontados com os problemas e as necessidades evidenciados pelos prognósticos do sistema. Essa etapa permitirá estruturar alternativas, definir sua representação e avaliar os efeitos sobre fluxos, capacidades, tempos, custos, acessibilidade e desempenho operacional. Os resultados obtidos deverão subsidiar a comparação e a posterior hierarquização das intervenções.

Os resultados do D-12 serão posteriormente integrados ao Produto D-13 – Identificação de Pontos de Atenção no Sistema Logístico, no qual serão consolidados os gargalos, saturações, restrições e necessidades que permaneçam ou surjam nos diferentes cenários. O D-13 também deverá registrar condicionantes e problemas relevantes que não sejam capturados pela macrossimulação, estabelecendo a relação entre os resultados das simulações e as necessidades remanescentes do sistema.

O Produto D-14 deverá aprofundar as alternativas avaliadas fora da rede, comparando sua viabilidade, seus custos, benefícios, riscos, requisitos de implementação e possíveis fontes de financiamento. Os aspectos jurídicos, institucionais e regulatórios poderão ainda subsidiar o Produto D-18 – Exame de Aspectos Jurídicos, Institucionais e Regulatórios, especialmente quando constituírem condicionantes para a implantação das infraestruturas, serviços e políticas analisados.

Dessa forma, o Produto D-11 estabelece a transição entre a análise prospectiva das transformações que podem afetar o sistema logístico paulista e sua consideração nas etapas de formulação, simulação e avaliação de alternativas do PLI-SP 2050. O relatório preserva a rastreabilidade entre os fatores analisados, os problemas identificados, os projetos propostos e as formas de tratamento definidas para os produtos subsequentes.

APÊNDICE

A. METODOLOGIA DE CÁLCULO DE EMISSÕES

A operacionalização do modelo de cálculo de emissões apresentado na seção metodológica requer a definição de veículos-tipo representativos para cada modal de transporte, bem como a estimativa de seus respectivos fatores de emissão. Esses veículos-tipo sintetizam as características médias da frota ou das tecnologias utilizadas em cada segmento, permitindo aplicar de forma consistente a equação geral de cálculo das emissões ao longo dos diferentes cenários.

A.1. RODOVIÁRIO

Para o modal rodoviário foram definidos cinco veículos-tipo, representando diferentes categorias de transporte de passageiros e de carga.

O **veículo-tipo R1**, que representa o automóvel médio a combustão no ano base de 2025, foi construído a partir da estrutura da frota do Estado de São Paulo. Segundo dados da CETESB (2025), a frota paulista apresenta idade média de 11,7 anos, o que corresponde aproximadamente aos veículos fabricados em 2013. A composição da frota por combustível também foi considerada no cálculo do fator de emissão. De acordo com o inventário veicular da CETESB, cerca de 82% da frota é composta por veículos flex-fuel, enquanto veículos exclusivamente a gasolina representam aproximadamente 17%, sendo os demais combustíveis residuais.

A utilização efetiva de combustíveis também foi incorporada ao cálculo. Em 2024, cerca de 73% dos veículos flex-fuel utilizaram etanol hidratado como combustível predominante no Estado. Além disso, desde agosto de 2025, o teor de etanol anidro na gasolina passou a ser de 30%, conforme a Resolução nº 9/2025 do Conselho Nacional de Política Energética. A partir dessas informações, foi estimada uma composição média da frota em termos de uso de combustíveis: 17% de veículos a gasolina, 22,4% de veículos flex operando com gasolina e 60,6% de veículos flex utilizando etanol hidratado.

Os fatores de emissão correspondentes foram obtidos na ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol (2026), considerando os valores médios para veículos do ano-modelo 2013. Esses fatores são de 0,190 kg CO_2e/km para veículos a gasolina, 0,171 kg CO_2e/km para veículos flex abastecidos com gasolina e 0,181 kg CO_2e/km para veículos flex abastecidos com etanol. A média ponderada desses valores resulta em um fator de emissão de 0,180 kg CO_2e/km, adotado como representativo do veículo-tipo R1.

O **veículo-tipo R2**, que representa automóveis elétricos a bateria, teve seu fator de emissão estimado com base no consumo médio de energia elétrica desses veículos e no fator de emissão da geração elétrica nacional. Foi considerado um consumo médio de 0,207 kWh por quilômetro, conforme dados da DEFRA-UK (2025). Esse consumo foi combinado com o fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional para 2025, estimado em 0,0461 kg CO_2 por kWh, segundo o Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE, 2026). O resultado corresponde a um fator de emissão de 0,00952 kg CO_2e/km. Ressalta-se que, nesse caso, as emissões estão associadas à geração de eletricidade no sistema elétrico, e não diretamente à operação do veículo. Por ausência de estimativas confiáveis sobre ganhos futuros de eficiência energética, esse fator foi mantido constante ao longo dos cenários analisados.

O **veículo-tipo R3** representa automóveis a combustão no horizonte de 2050. Diante da ausência de projeções consolidadas sobre ganhos de eficiência da frota brasileira e sobre a participação futura de veículos híbridos, adotou-se como referência as metas de emissão para veículos leves estabelecidas pela União Europeia para 2030, conforme o Regulamento (UE) 2019/631 e a análise de Suarez et al. (2023). Considerando a diferença temporal entre essas metas e o horizonte de 2050 do estudo, assumiu-se que o padrão de emissões da frota paulista nesse ano seria, ao menos, compatível com o limite europeu de 2030. Com base nessa premissa, foi adotado um fator de emissão de 0,0495 kg CO_2e/km para o veículo-tipo R3.

O **veículo-tipo R4** representa o transporte rodoviário intermunicipal de passageiros por ônibus de viagem. Para essa categoria, o fator de emissão foi obtido diretamente na ferramenta do GHG Protocol (2026), expresso em emissões por passageiro-quilômetro (PKM). O valor adotado foi de 0,0283 kg CO_2e/PKM.

O **veículo-tipo R5** representa o transporte rodoviário realizado por ônibus elétrico. Para essa categoria, o fator de emissão foi obtido do SIN 2025 (0,0461 kg CO_2/kWh), ocupação média de 40 passageiros, sendo estimado em 0,001383 kg CO_2e/PKM.

O **veículo-tipo R6** representa o transporte rodoviário de cargas realizado por caminhões rígidos com capacidade entre 3,5 e 7,5 toneladas. O fator de emissão correspondente também foi obtido na ferramenta do GHG Protocol (2026), sendo estimado em 0,539 kg CO_2e por tonelada-quilômetro transportada (TKM).

Os veículos-tipo R7 a R12 foram incorporados ao escopo de análise para contemplar biocombustíveis e outros combustíveis de baixo carbono. Os fatores de emissão dos combustíveis utilizados nesses veículos-tipo são provenientes do Balanço Energético Nacional (BEN 2023) para GNV, Diesel B15, Etanol Hidratado e Gasolina Comercial (70%), e da DEFRA 2024 para Biometano. Os consumos médios de veículos são provenientes de CETESB 2023 e MMA 2014.

O **veículo-tipo R7** representa o automóvel movido a Gás Natural Veicular (GNV). O fator de emissão foi calculado com base no valor de 2,0005 kg CO_2e/m³ (BEN 2023) e no consumo médio de 12 km/m³ (CETESB 2023 e MMA 2014), resultando em um fator de emissão de 0,167 kg CO_2e/km.

O **veículo-tipo R8** representa o automóvel movido a biometano. O fator de emissão foi calculado com base no valor de 1,9944 kg CO_2e/m³ (DEFRA 2024) e no consumo médio de 12 km/m³ (CETESB 2023 e MMA 2014), resultando em um fator de emissão de 0,166 kg CO_2e/km. O biometano e o GNV apresentam fatores de emissão de combustão semelhantes, sendo o biometano ligeiramente inferior ao do GNV fóssil. Apesar disso, as vantagens ambientais do biometano estão associadas principalmente à sua origem renovável e às menores emissões ao longo do ciclo de vida do combustível, aspectos não contemplados neste fator de emissão de diretamente relacionada ao transporte (emissão de escapamento), que é o que está sendo calculado nesse documento. É importante destacar que o biometano apresenta emissões líquidas no ciclo de vida (*well-to-wheel*) muito inferiores às do gás natural fóssil. Em São Paulo, onde o potencial de produção está concentrado principalmente nos resíduos da indústria sucroenergética (vinhaça e torta de filtro), o combustível pode proporcionar reduções expressivas de emissões de gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis fósseis.

O **veículo-tipo R9** representa o automóvel flex abastecido com gasolina comercial. O fator de emissão foi calculado com base no valor de 2,1124 kg CO_2e/L (BEN 2023), referente à gasolina comercial com 30% de etanol anidro conforme a Resolução CNPE nº 9, de 25 de junho de 2025, e no consumo médio de 14,93 km/L (CETESB 2023), resultando em um fator de emissão de 0,141 kg CO_2e/km.

O **veículo-tipo R10** representa o automóvel flex abastecido com etanol hidratado. O fator de emissão foi calculado com base no valor de 1,5565 kg CO_2e/L (BEN 2023) e no consumo médio de 10,46 km/L (CETESB 2023), resultando em um fator de emissão de 0,149 kg CO_2e/km.

O **veículo-tipo R11** representa o veículo comercial leve a diesel no ano base de 2025. O fator de emissão foi calculado com base no valor de 2,6203 kg CO_2e/L referente ao Diesel B15 (BEN 2023), percentual vigente conforme Resoluções CNPE nº 6 e 8/2025, e no consumo médio de 11,15 km/L (CETESB 2023 e MMA 2014), resultando em um fator de emissão de 0,235 kg CO_2e/km.

Por fim, o **veículo-tipo R12** representa o ônibus urbano a diesel no ano base de 2025, complementando o veículo-tipo R4 ao cobrir o segmento de transporte coletivo urbano. O fator de emissão foi calculado com base no valor de 2,6203 kg CO_2e/L referente ao Diesel B15 (BEN

2023), percentual vigente conforme Resoluções CNPE nº 6 e 8/2025, e no consumo médio de 2,1 km/L (CETESB 2023 e MMA 2014), resultando em um fator de emissão de 1,248 kg CO_2e/km.

A.2. FERROVIÁRIO

No modal ferroviário foram definidos três veículos-tipo, representando o transporte de cargas e duas categorias de transporte de passageiros.

O **veículo-tipo F1** representa o transporte ferroviário de carga nas ferrovias do Estado de São Paulo. Como parâmetro representativo das emissões desse modal, foi utilizado o fator associado à operação da América Latina Logística Malha Paulista (ALLMP), disponível na ferramenta GHG Protocol (2026). O fator de emissão adotado foi de 29,16 kg CO_2 por mil toneladas-quilômetro útil (TKU).

O **veículo-tipo F2** corresponde ao transporte ferroviário de passageiros. Nesse caso, as emissões foram estimadas a partir da intensidade energética média do sistema ferroviário, estimada em 0,1616 kWh por passageiro-quilômetro (DEFRA-UK, 2025), combinada com o fator de emissão da geração elétrica do Sistema Interligado Nacional em 2025 (0,0461 kg CO_2/kWh). A aplicação desses parâmetros resulta em um fator de emissão de 0,0075 kg CO_2e/PKM.

O **veículo-tipo F3** representa o transporte metroviário de passageiros. O fator de emissão adotado corresponde ao valor informado pelo Metrô de São Paulo na ferramenta GHG Protocol (2026), expresso em emissões por passageiro-quilômetro. Esse valor é de 0,003 kg CO_2e/PKM, refletindo a elevada eficiência energética desse modal.

O **veículo-tipo F4** representa o material rodante ferroviário operando com tração a biodiesel em configuração híbrida. De acordo com o Projeto CPTM Santos-Cajati, essa tecnologia apresenta consumo energético médio na faixa de 29 a 36 kWh/km e emissões diretas de CO_2 entre 2,5 e 3,0 kg/km, resultando em um fator de emissão médio adotado de 2,75 kg CO_2/km. O custo operacional estimado situa-se entre R$ 12 e R$ 16/km, sendo o mais acessível entre as tecnologias de baixa emissão avaliadas. Esse veículo-tipo apresenta flexibilidade operacional e possibilidade de aproveitamento da infraestrutura ferroviária existente, configurando-se como alternativa de transição energética preferível para trechos não eletrificados no curto e médio prazo.

O **veículo-tipo F5** representa o material rodante ferroviário operando com tração a etanol. De acordo com o Projeto CPTM Santos-Cajati, essa tecnologia apresenta consumo energético médio na faixa de 32 a 38 kWh/km e emissões diretas de CO_2 entre 1,4 e 1,6 kg/km, resultando em um fator de emissão médio adotado de 1,50 kg CO_2/km. O custo operacional estimado situa-se entre R$ 14 e R$ 18/km. O etanol se destaca como alternativa sustentável com ampla disponibilidade de insumo no Estado de São Paulo, dado o protagonismo do setor sucroenergético paulista, e apresenta emissões significativamente inferiores às do biodiesel híbrido, embora com maior consumo energético específico. A infraestrutura de distribuição e abastecimento constitui o principal condicionante para sua viabilização operacional em escala.

O **veículo-tipo F6** representa o material rodante ferroviário operando com tração elétrica a bateria. De acordo com o Projeto CPTM Santos-Cajati, essa tecnologia apresenta consumo energético médio na faixa de 25 a 30 kWh/km e emissões diretas de CO_2 nulas (tank-to-wheel), resultando em um fator de emissão adotado de 0 kg CO_2/km. O custo operacional estimado situa-se entre R$ 20 e R$ 25/km, e o custo de manutenção entre R$ 3,5 e R$ 5,0/km, o mais baixo entre as tecnologias avaliadas. Sua autonomia, de 300 a 400 km por carga completa, é a mais restrita do conjunto, exigindo infraestrutura de recarga ao longo da linha e tornando o tempo de recarga um fator crítico para a operação logística; sua capacidade de carga também é classificada como baixa frente às demais alternativas. Ainda assim, configura-se como solução relevante para trechos não eletrificados, sobretudo onde a limitação de autonomia não compromete o padrão de serviço.

O **veículo-tipo F7** representa o material rodante ferroviário operando com tração a hidrogênio verde. De acordo com o Projeto CPTM Santos-Cajati, essa tecnologia apresenta consumo energético médio na faixa de 24 a 28 kWh/km e emissões diretas de CO_2 nulas, resultando em um fator de emissão adotado de 0 kg CO_2/km, assumindo produção do hidrogênio a partir de fontes renováveis. O custo operacional estimado situa-se entre R$ 25 e R$ 30/km, o mais elevado entre as tecnologias avaliadas, e o custo de manutenção entre R$ 4,5 e R$ 6,0/km. Em contrapartida, apresenta a maior autonomia entre as alternativas de baixa emissão, de 800 a 1.000 km por abastecimento completo, e capacidade de carga classificada como média. Sua principal restrição operacional está associada à complexidade logística de abastecimento, dada a necessidade de infraestrutura dedicada de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio, ainda incipiente no Brasil.

A.3. HIDROVIÁRIO

Para o transporte hidroviário foram considerados três veículos-tipo, representando embarcações movidas a diesel, embarcações utilizando diesel verde (HVO) e embarcações eletrificadas.

O **veículo-tipo H1** representa o transporte de cargas e operações de cabotagem realizadas por embarcações movidas a óleo diesel. Como parâmetro de consumo foi utilizado o valor estimado para a operação da Hidrovia Tietê-Paraná, correspondente a aproximadamente 1,8 litro de diesel por mil toneladas-quilômetro útil, apresentado no Produto 2 deste contrato180. A conversão desse consumo em emissões foi realizada com base na metodologia da ferramenta GHG Protocol (2026), resultando em um fator de emissão de 5,81 kg CO_2e por mil TKU.

O **veículo-tipo H2** representa embarcações convertidas para o uso de diesel verde (HVO). Nesse caso, considerou-se inicialmente o mesmo nível de consumo energético da operação convencional na Hidrovia Tietê-Paraná. Entretanto, devido à diferença no poder calorífico entre o HVO (8.197 kcal/l) e o diesel convencional (8.484 kcal/l), estimou-se um aumento no consumo específico para aproximadamente 1,86 litro por mil TKU. A partir desses parâmetros e da metodologia do GHG Protocol (2026), foi estimado um fator de emissão de 4,52 kg CO_2e por mil TKU, refletindo a menor intensidade de carbono desse combustível.

O **veículo-tipo H3** representa embarcações eletrificadas, incluindo embarcações de pequeno porte e sistemas de travessia. Para essa categoria foi considerada uma demanda energética projetada de aproximadamente 12 GWh para o conjunto das operações analisadas181. Adotou-se o fator de emissão da geração elétrica do SIN para 2025 (0,0461 kg CO_2/kWh) e um consumo médio estimado de 6 kWh por mil TKU para embarcações elétricas. Com base nesses parâmetros, foram estimadas emissões totais de 553,2 toneladas de CO_2e para o cenário analisado, correspondendo a um fator de emissão médio de 0,277 kg CO_2e por mil TKU.

[180] SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Logística e Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem (DER). Elaboração do inventário de emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa por veículos automotores no Estado de São Paulo. São Paulo, 2023.
[181] SÃO PAULO (Estado). Plano Estadual de Energia 2050 - PEE 2050. São Paulo, 2024.

A.4. AEROVIÁRIO

No transporte aéreo foram definidos dois veículos-tipo, representando o transporte de passageiros e o transporte de cargas.

O **veículo-tipo A1** representa voos de passageiros de curta distância, considerados aqueles inferiores a 500 quilômetros, compatíveis com operações regionais dentro do território estadual. O fator de emissão foi obtido na ferramenta GHG Protocol (2026), expresso em emissões por passageiro-quilômetro. O valor adotado foi de 0,136 kg CO_2e/PKM.

O **veículo-tipo A2** representa operações domésticas de transporte aéreo de carga dedicada. O fator de emissão foi obtido a partir do documento metodológico para inventários de carbono corporativos publicado pela DEFRA-UK (2025), que fornece fatores de conversão para voos de carga. O valor utilizado foi de 2,52 kg CO_2e por tonelada-quilômetro transportada (TKM).

A.5. DUTOVIAS

No caso das dutovias, a metodologia adotada não estima diretamente as emissões associadas à operação do sistema, mas sim a redução potencial de emissões decorrente da substituição de outros modais de transporte. Para cada tipo de dutovia analisada, identificam-se os modais alternativos que seriam utilizados para transportar a mesma carga, tipicamente rodoviário ou ferroviário, e calcula-se o número equivalente de veículos-tipo necessários para realizar esse transporte.