



ARTIGO TÉCNICO Nº 17

SÉRIE

VOLUME II
DA INVIABILIDADE FINANCEIRA À
LEGITIMIDADE SOCIAL DO TRANSPORTE DE
PASSEIROS: CONTRIBUIÇÃO RELATIVA
DE TEMPO, SEGURANÇA E AMBIENTE NO
***RANKING* DE ALTERNATIVAS**

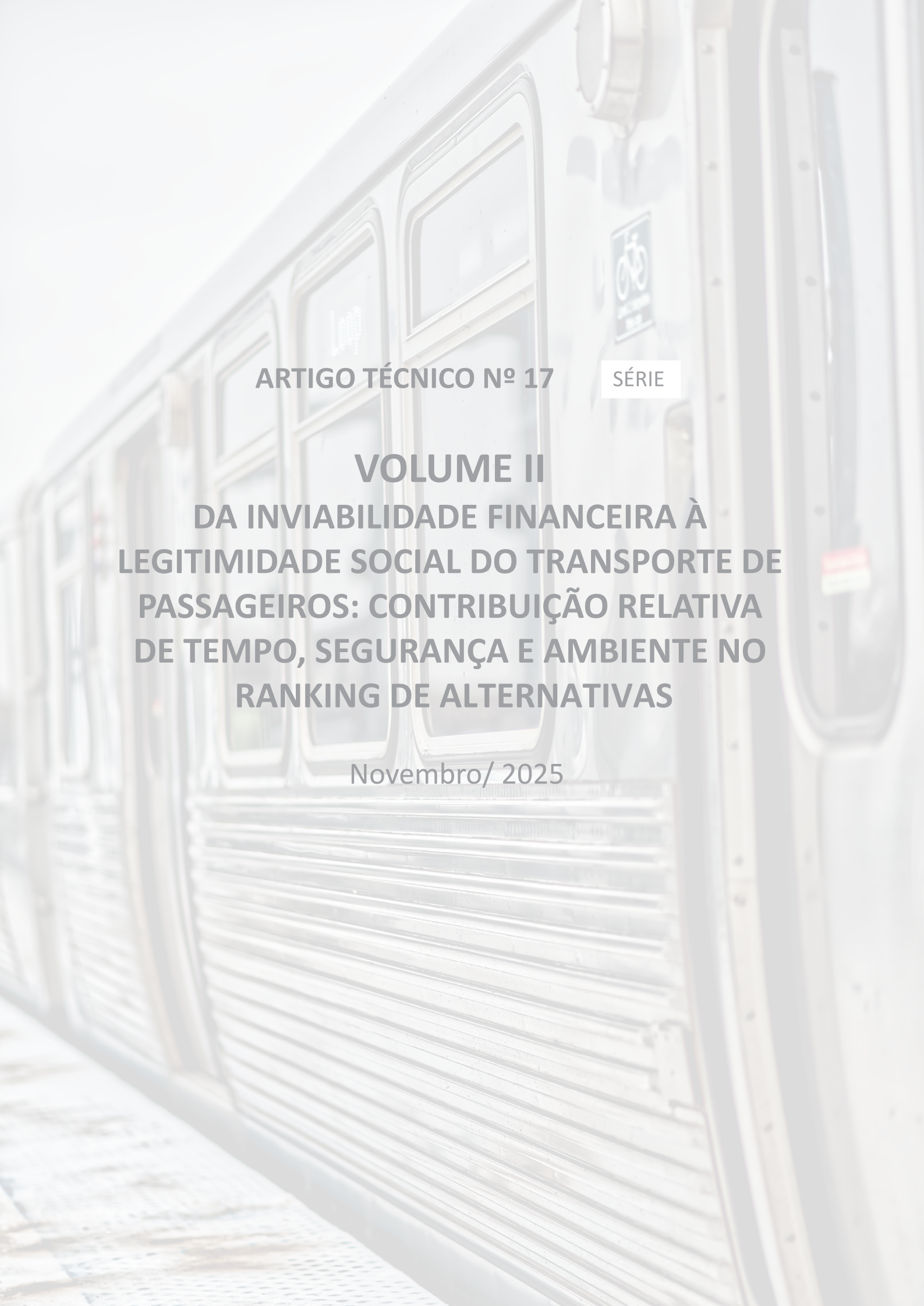
Novembro/ 2025

 [infraoficial](#)
 [infra.oficial](#)
 [infra-oficial](#)
 [infraoficial](#)

 observatorio@infra.gov.br
 institucional@infra.gov.br
 www.ontl.infra.gov.br
 www.infra.gov.br

ONTL
Observatório Nacional de Transporte e Logística

INFRA S.A.

The background of the entire page is a faded, grayscale image of a train car. The train is angled, showing its side profile. A bicycle symbol is visible on the side of the train, indicating a designated area for bicycles. The text is overlaid on this background.

ARTIGO TÉCNICO Nº 17

SÉRIE

VOLUME II

**DA INVIABILIDADE FINANCEIRA À
LEGITIMIDADE SOCIAL DO TRANSPORTE DE
PASSAGEIROS: CONTRIBUIÇÃO RELATIVA
DE TEMPO, SEGURANÇA E AMBIENTE NO
RANKING DE ALTERNATIVAS**

Novembro/ 2025

**PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES

José Renan Vasconcelos Calheiros Filho

INFRA S.A.**DIRETOR-PRESIDENTE**

Jorge Luiz Macedo Bastos

DIRETORA DE ADMINISTRAÇÃO E FINANÇAS

Elisabeth Alves da Silva Braga

DIRETOR DE EMPREENDIMENTOS

André Luis Ludolfo da Silva

DIRETOR DE PLANEJAMENTO

Cristiano Della Giustina

DIRETOR DE MERCADO E INOVAÇÃO

Marcelo Vinaud Prado

SUPERINTENDENTE DE INTELIGÊNCIA DE MERCADO

Lilian de Alencar Pinto Campos

GERENTE DE INOVAÇÃO

Sirléa de Fátima Ferreira Leal Moura

EQUIPE GERÊNCIA DE INOVAÇÃO

Nícolas Guimarães Ohofugi

Venina de Souza Oliveira

Gabriela Camilotti Saint Martin

COLABORADORES

Adriana Vanessa Mendes Moreira- Diagramação

Luana Praxedes Moura – Estagiária

AUTORES

Raphael Vieira dos Santos – Discente do Programa de Pós-Graduação em Transportes da Universidade de Brasília – UnB, e Assistente Técnico na Superintendência de Projetos Ferroviários – SUFER, Infra S.A.

Breno Simonini Teixeira – MSc Ciências Econômicas pela Universidade de Brasília – UnB, e Economista na Superintendência de Projetos Ferroviários – SUFER, Infra S.A.

**Observatório Nacional de Transporte e Logística – ONTL
Infra S.A.**

Endereço: SAUS, Quadra 01, Bloco G, Lotes 3 e 5, Asa Sul,
Brasília - DF - 70.070-010

E-mail: ontl@infrasa.gov.br / institucional@infrasa.gov.br

Site: www.infrasa.gov.br / www.ontl.infrasa.gov.br



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Da inviabilidade financeira à legitimidade social do transporte ferroviário de passageiros [livro eletrônico]: contribuição relativa de tempo, segurança e ambiente no ranking de alternativas: artigo técnico nº 17 : volume II / [Breno Simonini Teixeira, Raphael Vieira dos Santos; organização Lilian de Alencar Pinto Campos ; coordenação Gabriela Camilotti Saint Martin]. -- Brasília, DF: Infra, 2026. -- (Da inviabilidade financeira à legitimidade social do transporte ferroviário de passageiros)
PDF

Bibliografia.
ISBN 978-65-84366-21-3

1. Análise custo-benefício 2. Dióxido de carbono - Aspectos ambientais - Brasil 3. Engenharia de transportes 4. Políticas públicas - Brasil 5. Transporte - Trânsito de passageiros 6. Transportes ferroviários - Brasil I. Teixeira, Breno Simonini. II. Santos, Raphael Vieira dos. III. Campos, Lilian de Alencar Pinto. IV. Martin, Gabriela Camilotti Saint. V. Série.

26-357839.1

CDD-629.04

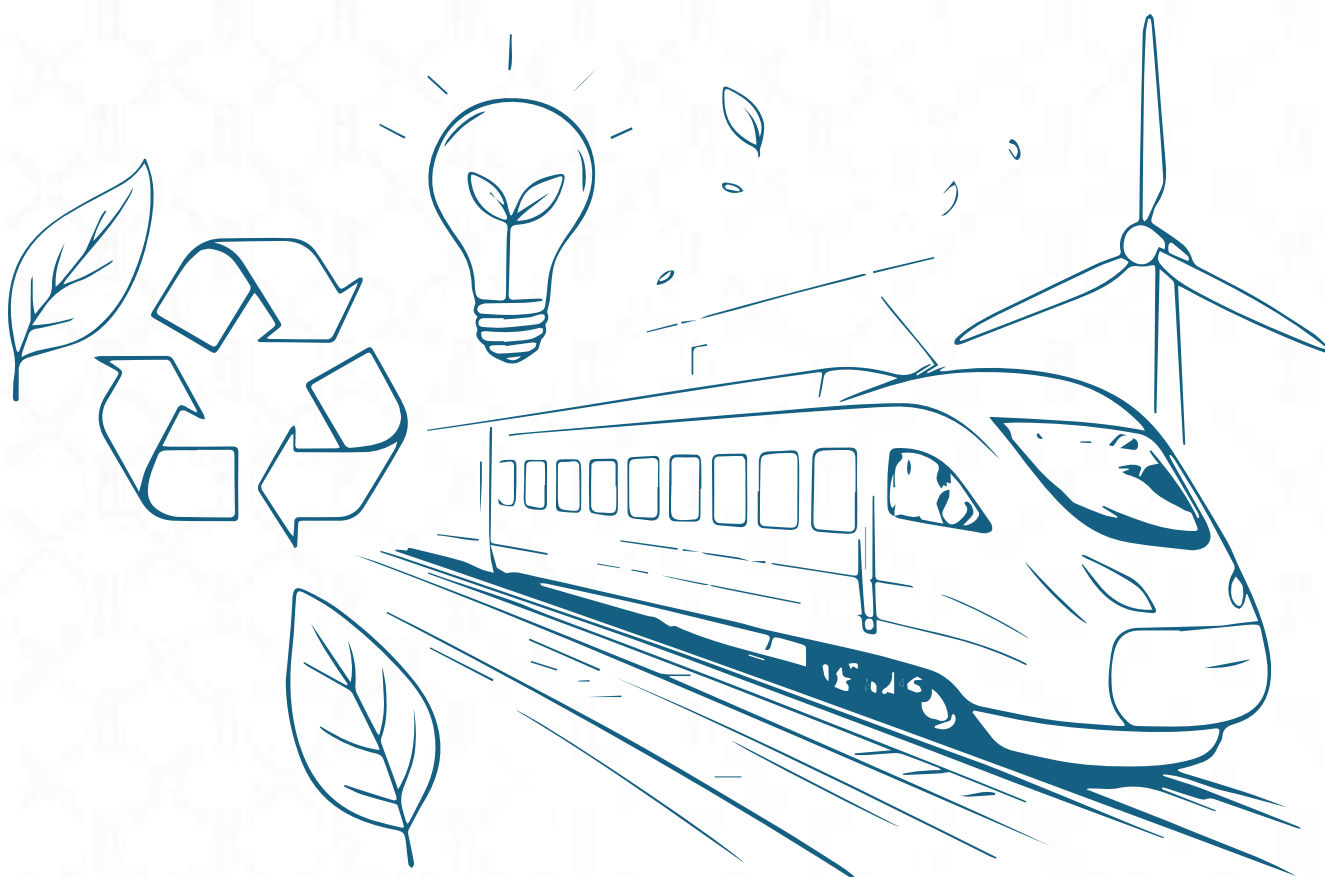
Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia de transportes 629.04
Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380



RESUMO

O artigo (Volume II) aprofunda a discussão sobre a Análise Custo-Benefício (ACB) como ferramenta de legitimação de projetos de transporte ferroviário de passageiros no Brasil, focando no arcabouço metodológico de quantificação de seus três pilares centrais de benefícios: tempo de viagem, segurança viária e redução de emissões. Partindo da premissa estabelecida no Volume I (de que a ferrovia, embora de baixa atratividade privada, possui elevada legitimidade social), este trabalho detalha a lógica de valoração de cada pilar. O objetivo é demonstrar como a metodologia de cálculo impacta diretamente a análise de eficiência alocativa e o ranking de alternativas operacionais. A abordagem baseia-se na aplicação de métricas socioeconômicas, como o Valor do Tempo de Viagem (VTTS), o Valor Estatístico da Vida (VSL) e o Preço-Sombra do Carbono (PC), em conformidade com as diretrizes de guias nacionais (Guia ACB, Manual Infra S.A.) e internacionais (EC, 2014; FHWA, 2025). O argumento central é que a forma como esses benefícios são mensurados e ponderados no fluxo de caixa social descontado é determinante para a seleção de cenários de investimento (ex.: via singela vs. duplicada; níveis de integração modal). Conclui-se que a ACB não serve apenas para justificar o aporte público, mas atua como um instrumento técnico de priorização que qualifica a tomada de decisão, ao revelar como diferentes configurações de projeto entregam valor social em tempo, segurança e sustentabilidade.



Palavras-chave: Análise Custo-Benefício; Transporte Ferroviário de Passageiros; Valor do Tempo; Segurança Viária; Emissões de Carbono.



DA LEGITIMAÇÃO SOCIAL À ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ALOCATIVA

O debate sobre o futuro do transporte ferroviário de passageiros no Brasil é sintomático de uma busca estratégica por alinhamento entre mobilidade, sustentabilidade e desenvolvimento econômico. Contudo, a viabilidade desses projetos esbarra em um dilema estrutural: o Custo de Capital (CAPEX) e o Custo Operacional (OPEX) elevados contrastam com a elasticidade tarifária limitada, tornando o setor, via de regra, pouco atrativo ao capital privado. Esse descompasso entre os fluxos financeiros de mercado e a geração de receitas acirra o debate entre a eficiência econômica e o interesse público, reforçando a necessidade de instrumentos que revelem o valor social agregado do investimento.

É nesse ponto que a Análise Custo-Benefício (ACB) assume protagonismo, sendo o instrumento fundamental para a legitimação social dos projetos. A ACB se diferencia da análise financeira ao confrontar custos e benefícios sob a ótica da sociedade, respondendo de forma sistemática se os ganhos coletivos justificam os aportes públicos em sistemas de baixa atratividade privada. Guias nacionais, como o Guia ACB e o Manual da Infra S.A., e diretrizes internacionais recomendam que a avaliação seja feita a preços-sociais ou preços-sombra, refletindo o valor econômico real e o custo de oportunidade dos recursos para a sociedade.

A abordagem metodológica da ACB estrutura-se na comparação incremental de cenários (base, alternativo e comparativo), visando mensurar e precificar o saldo líquido de bem-estar proporcionado pela intervenção. O cerne dessa valoração social reside na mensuração de três externalidades típicas do modo rodoviário, utilizadas como parâmetro comparativo, as quais se consolidam como os três blocos centrais de benefícios monetizáveis. O Volume I estabeleceu essa tríade; o Volume II concentra-se em detalhar o arcabouço técnico para a quantificação desses pilares, conforme justificado pela literatura técnica e normativa.

O primeiro pilar é a Redução do Tempo de Viagem, reconhecido como um custo social crítico do modo rodoviário, frequentemente associado à lentidão e baixa confiabilidade em corredores saturados. O ganho de bem-estar proporcionado pela ferrovia é mensurado pelo Valor do Tempo de Viagem (VTT). A literatura internacional (Ju et al., 2024; Zhu et al., 2025) e as diretrizes normativas (EC, 2014; FHWA, 2025) confirmam o VTT como métrica central, exigindo que a valoração incorpore a confiabilidade e a percepção de congestionamento. O conceito de Tempo Generalizado (TG) é crucial, pois permite à ACB reconhecer que a introdução do modo ferroviário suprime barreiras modais e custos psicológicos (penalidades comportamentais) de deslocamento, consolidando ganhos efetivos de bem-estar social.

O segundo pilar, a Redução de Sinistros ou Segurança Viária, emerge como um benefício potencial da ferrovia, dada a elevada taxa de sinistros e fatalidades nas rodovias nacionais (Chhotu & Suman, 2024; Puteri & Khamim Asy'ari, 2025), cujos custos sociais alcançam dezenas de bilhões de reais anuais. A precificação desses benefícios é feita, predominantemente, pela aplicação do Valor Estatístico da Vida (VSL) (*Value of Statistical Life*), métrica internacionalmente aceita para precificação de ganhos de segurança. No contexto brasileiro, a valoração baseia-se em estudos específicos, como as pesquisas do IPEA (2020) que atualizam os custos médios dos sinistros por severidade (óbitos, feridos graves etc.).



DA LEGITIMAÇÃO SOCIAL À ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ALOCATIVA

O terceiro pilar, a Redução de Emissões (Externalidades Ambientais), traduz a vantagem comparativa da ferrovia como um modo de menor intensidade energética. O benefício da mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) é valorado pelo preço-sombra do carbono (PC), parâmetro que reflete o custo social marginal das emissões e o valor monetário das perdas de bem-estar causadas pelas externalidades climáticas. Essa valoração se alinha às recomendações de organismos internacionais (EC, 2014; EIB, 2020; FHWA, 2025), e confere ao projeto uma justificativa estratégica de longo prazo, associada à agenda de sustentabilidade.

Dessa forma, o presente trabalho se propõe a detalhar como a magnitude da quantificação desses pilares impacta a contribuição relativa de cada um, fator que, por sua vez, influencia o ranking das alternativas operacionais (velocidade, *headway* e integração) avaliadas no Fluxo de Caixa Social Descontado, fornecendo assim o subsídio técnico para a tomada de decisão pública.



METODOLOGIA DE VALORAÇÃO DOS BENEFÍCIOS: OS TRÊS PILARES DA LEGITIMAÇÃO

A valoração dos benefícios sociais, cerne da Análise Custo-Benefício (ACB), exige a definição de quais externalidades serão mensuradas. A escolha de focar nos ganhos de tempo de viagem, segurança viária (redução de sinistros) e redução de emissões de GEE (ambiente) como pilares centrais da análise não é arbitrária. Esta tríade é metodologicamente justificada por representar as externalidades negativas mais críticas e tangíveis do modo rodoviário, que constitui o Cenário Base e o concorrente direto em projetos de transporte de passageiros. A ACB, por sua natureza incremental, opera capturando as vantagens comparativas mais tangíveis da ferrovia ao mitigar os custos sociais impostos pelo transporte rodoviário.

A literatura aponta o tempo de viagem como um custo social crítico decorrente da lentidão e baixa confiabilidade em corredores rodoviários saturados (Garcia et al., 2016). A segurança viária emerge como um benefício social de alto impacto, dadas as elevadas taxas de sinistros e fatalidades nas rodovias (Henrique & De Carvalho, 2020), cujos custos sociais são significativos. Por fim, o pilar ambiental traduz-se na mitigação de emissão de GEE, uma vantagem comparativa do modo ferroviário frente ao transporte individual motorizado, que é altamente intensivo em emissões (Anagnostopoulos, 2024; Ćetković et al., 2020). Por esta razão, diretrizes nacionais, como o Guia ACB (BRASIL, 2022) e o Manual de Priorização da Infra S.A. (2022), e internacionais (EC, 2014; EIB, 2020; FHWA, 2025) consolidam tempo, segurança e ambiente como a espinha dorsal dos benefícios sociais em projetos ferroviários.

1 VALORAÇÃO DA REDUÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM (VTTS)

A valoração do tempo de viagem constitui um dos benefícios centrais na ACB de projetos de transporte, refletindo o ganho direto de bem-estar (utilidade) e produtividade para os usuários. A metodologia para sua quantificação é replicável e se baseia em comparar os tempos médios de deslocamento no cenário base (rodoviário) com o cenário alternativo (ferroviário), aplicando o diferencial resultante sobre a demanda captada e ponderando-o por um valor monetário (R\$/hora) atribuído ao tempo (VTTS).

O processo metodológico pode ser decomposto nos seguintes passos:

1.1 DEFINIÇÃO DO DIFERENCIAL DE TEMPO E O CONCEITO DE TEMPO GENERALIZADO (TG)

A mensuração do benefício não se limita ao tempo "a bordo" do veículo. A abordagem metodológica, alinhada à teoria de modelagem de transportes (Ortúzar & Willumsen, 2011), deve utilizar o Tempo Generalizado (TG). Este conceito incorpora toda a jornada do usuário, incluindo: (i) tempo de acesso e caminhada; (ii) tempo de espera; (iii) tempo de transferência; e (iv) tempo em veículo. Frequentemente, a literatura aplica "penalidades comportamentais" aos tempos fora do veículo (como espera e transferência), que são percebidos como mais onerosos pelos usuários. O benefício do projeto ferroviário, muitas vezes, não advém apenas da redução do tempo em veículo, mas da supressão do "atrito modal" e das penalidades associadas a múltiplas transferências no cenário base.



METODOLOGIA DE VALORAÇÃO DOS BENEFÍCIOS: OS TRÊS PILARES DA LEGITIMAÇÃO

1.2 SEGMENTAÇÃO SOCIOECONÔMICA DA DEMANDA

Este é um passo crítico da metodologia, pois o Valor do Tempo de Viagem (VTTS) não é homogêneo. A literatura internacional (Binsuwadan et al., 2023; Ju et al., 2024) e os guias normativos reconhecem que o valor atribuído ao tempo é sensível, principalmente, à renda e ao propósito da viagem. Portanto, a demanda captada pelo projeto (calculada em D_{it}) não pode ser tratada como um bloco único, devendo ser desagregada em estratos socioeconômicos (ex.: alta, média e baixa renda). Esta segmentação é tipicamente obtida através de Pesquisas de Preferência Declarada (PD), que identificam o perfil dos usuários que migram de cada veículo ou modo de origem (ex.: automóvel e ônibus).

e e

Onde D_{it} representa a demanda captada referente ao grupo de usuários i no ano t ; $\%$ traduz a participação de cada grupo i na demanda total (obtida pela Pesquisa de Preferência Declarada); e V_{it} corresponde ao volume total de passageiros projetado para o ano t .

1.3 ATRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS DE VTTS

A cada estrato socioeconômico i da demanda é atribuído um valor monetário específico (VTTS) em R\$/hora. Esses valores são parâmetros exógenos obtidos a partir de estudos econômicos e alinhados às diretrizes dos guias de ACB. A literatura frequentemente aponta que o VTTS de usuários de transporte público (ônibus) corresponde a uma fração (ex.: 30% a 50%) do VTTS de usuários de transporte individual (automóvel), refletindo as diferenças de renda e elasticidade (Jara-Díaz, 2007).

1.4 CÁLCULO DO BENEFÍCIO SOCIAL

O ganho social monetizado com a redução do tempo de viagem em um determinado período (t) é o somatório, para todos os estratos de demanda (i), da economia de tempo de cada grupo (ΔT_{it}) multiplicada pelo seu respectivo valor do tempo (V_{it}). A fórmula do benefício é:

Onde ΔT_{it} representa o diferencial de tempo de viagem (em horas) do grupo i no período t quando os dois modos de transporte são comparados (rodoviário x ferroviário), e V_{it} é o valor da hora de viagem (em R\$) atribuído a esse mesmo grupo. Essa estrutura metodológica assegura que a avaliação reflita a heterogeneidade da demanda e o valor real do tempo percebido pelos diferentes usuários.



METODOLOGIA DE VALORAÇÃO DOS BENEFÍCIOS: OS TRÊS PILARES DA LEGITIMAÇÃO

2 VALORAÇÃO DA REDUÇÃO DE SINISTROS (VSL)

A melhoria da segurança viária é um dos benefícios sociais mais diretos da migração modal, gerando ganhos socioeconômicos pela preservação de vidas, redução de custos hospitalares e minimização de danos materiais. A metodologia de valoração foca em quantificar a redução líquida do risco de sinistros ao transferir usuários de um modo de alta sinistralidade (rodoviário) para um de baixa sinistralidade (ferroviário).

O processo metodológico, replicável para diferentes projetos, é estruturado nos seguintes passos:

2.1 DEFINIÇÃO DA "EXPOSIÇÃO EVITADA" (UNIDADE DE RISCO)

O primeiro passo é definir a unidade de medida da exposição ao risco. A métrica padrão é o passageiro-quilômetro (*pax-km*), que representa o volume de deslocamento de passageiros que deixa de circular no modo rodoviário por ter sido capturado pelo projeto ferroviário. Esta "exposição evitada" () é a base sobre a qual as taxas de probabilidade de acidente serão aplicadas. Ela é calculada multiplicando-se a demanda captada () pela distância média da viagem (*d*), de acordo com a fórmula:

2.2 CÁLCULO DAS TAXAS DE SINISTRALIDADE POR SEVERIDADE

O benefício é a diferença entre as taxas de acidente dos dois modos. Para isso, é preciso calcular a taxa de sinistros por *pax-km* para cada grau de severidade “s” {fatal, grave, leve, danos materiais}.

- **Cenário Base (Rodoviário,):** Calcula-se a taxa de sinistros observada no corredor rodoviário concorrente. A fórmula é:

$$\hat{e} = \frac{\dots}{\dots}$$

Os dados de ocorrências ($\hat{e}$) são obtidos de fontes oficiais (ex.: ANTT, PRF) para o trecho específico, e a exposição observada (), dada pelo fluxo de veículos multiplicado pela ocupação média, é obtida dos relatórios de tráfego.

- **Cenário Alternativo (Ferroviário,):** Calcula-se o "risco residual" do modo ferroviário. Como o projeto é, em geral, inexistente, esta taxa deve ser estimada a partir de um *proxy*, ou seja, uma operação ferroviária de passageiros existente com características técnicas e operacionais semelhantes. A fórmula é análoga:

$$\hat{e} = \frac{\dots}{\dots}$$



METODOLOGIA DE VALORAÇÃO DOS BENEFÍCIOS: OS TRÊS PILARES DA LEGITIMAÇÃO

2.3 QUANTIFICAÇÃO DOS SINISTROS EVITADOS (LÍQUIDOS)

O número de sinistros evitados () para cada severidade s no período t é o diferencial líquido das taxas multiplicado pela exposição que migrou para o projeto:

$$\left(\frac{E_{s,t} - E_{s,t}^0}{E_{s,t}^0} \right) \times E_{s,t}^0$$

Este cálculo é fundamental por reconhecer que o modo ferroviário não possui risco zero, apurando apenas o ganho líquido da transferência.

2.4 MONETIZAÇÃO PELO VSL E CUSTOS ASSOCIADOS

O último passo é converter o benefício físico (sinistros evitados) em valor monetário. A cada grau de severidade s é atribuído um custo socioeconômico unitário () baseado em parâmetros nacionais:

- **óbitos:** Utiliza-se o Valor Estatístico da Vida (VSL), podendo ser obtido pelo Guia ACB e Manual de Priorização da Infra S.A.
- **Feridos (Graves/Leves) e Danos Materiais:** Utilizam-se os custos médios associados (hospitalares, perda de produtividade etc.).

Esses valores de referência devem ser obtidos de estudos oficiais, como os publicados pelo IPEA. O benefício social total da segurança () é o somatório dos ganhos em todas as categorias de severidade:

Onde $E_{s,t}^0$ corresponde ao cenário comparativo no caso de redução de sinistros, e $E_{s,t}$ ao respectivo valor estatístico aplicado em cada grau de severidade.

3 VALORAÇÃO DAS EXTERNALIDADES AMBIENTAIS (EMISSÕES DE GEE)

A mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO₂), constitui um dos benefícios sociais mais relevantes e tangíveis da migração modal do transporte rodoviário para o ferroviário, dada a menor intensidade de emissão de poluentes por passageiro-quilômetro no modo sobre trilhos.

A Análise Custo-Benefício (ACB) incorpora este ganho como uma externalidade positiva, sendo sua valoração indispensável para justificar o aporte público em projetos de infraestrutura alinhados às agendas de sustentabilidade (ESG) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A metodologia para o cálculo deste benefício é estritamente incremental, comparando as emissões do Cenário Base (sem o projeto ferroviário, onde a demanda é atendida pelo modo rodoviário) com as emissões do Cenário Alternativo (com o projeto ferroviário).



METODOLOGIA DE VALORAÇÃO DOS BENEFÍCIOS: OS TRÊS PILARES DA LEGITIMAÇÃO

3.1 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES EVITADAS

A quantificação do benefício ambiental é realizada mediante a apuração da diferença de emissões de CO2 evitadas por tonelada-quilômetro ou por passageiro-quilômetro entre os cenários. Essa diferença é expressa pela variação nos aspectos de emissões (E) no período t , dado por:

$$e \quad e$$

Em que e corresponde ao total de emissões da fatia de demanda captada pelo projeto ferroviário, mas que circula pelo modo rodoviário, e e corresponde ao cenário do projeto, que inclui as emissões residuais do modo ferroviário por passageiro.

3.2 MÉTRICA DE MENSURAÇÃO

A literatura aponta a métrica passageiro-quilômetro ($pax-km$) como uma unidade estratégica para quantificar o benefício ambiental que surge da mudança de modo de transporte (*modal shift*). Estudos como o de Avogadro et al. (2021) focam precisamente no impacto da substituição de modos de alta emissão (aéreo) por ferroviários, onde o cálculo da redução de CO2 depende diretamente do volume de passageiros que fazem essa troca. Da mesma forma, Jiang et al. (2021) revisam o impacto nas emissões com base nas "interações modais", reforçando que o benefício ambiental não é isolado, mas sim um resultado direto do comportamento agregado dos usuários.

A avaliação dos benefícios ambientais de investimentos em infraestrutura ferroviária, como analisado por Četković et al. (2020), depende da adesão dos passageiros (passageiros-km) ao novo modal para que a mitigação de emissões se materialize. Complementarmente, a abordagem centrada no usuário (*user-based*), que utiliza a métrica $pax-km$, fundamenta-se nos fatores comportamentais que induzem a mudança modal, traduzindo o benefício ambiental (redução de emissões) decorrente da opção dos passageiros por trocar o transporte rodoviário (mais poluente) pelo ferroviário (mais eficiente).

3.3 DEFINIÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO

O cálculo do volume de emissões é realizado a partir de fatores médios de emissão por usuário por modo de transporte.

Cenário Base (e): O fator de emissão rodoviário é parametrizado, adotando-se uma média ponderada das emissões dos modos rodoviários que seriam substituídos (como automóveis e ônibus), refletindo a intensidade energética da frota automotiva.

Cenário Alternativo (e): O fator de emissão ferroviário é definido com base na eficiência energética e na tecnologia da operação do trem de passageiros (por exemplo, sistema híbrido), que geralmente apresenta uma intensidade de emissão significativamente menor.

O volume de emissões é, então, calculado para cada estrato socioeconômico i a partir do produto do fator de emissão do modo pela quantidade de passageiros capturados (q) no ano t .



METODOLOGIA DE VALORAÇÃO DOS BENEFÍCIOS: OS TRÊS PILARES DA LEGITIMAÇÃO

3.4 VALORAÇÃO MONETÁRIA

A valoração monetária do benefício de mitigação de emissões é obtida pela aplicação do Preço-Sombra do Carbono (PC), que é o valor atribuído a cada tonelada de CO₂ (ou equivalente) cuja emissão é evitada:

O uso do PC é fundamental porque as externalidades ambientais, ao contrário dos custos de operação, não possuem um preço de mercado transacionado. O Preço-Sombra do Carbono aplicado na ACB deve refletir o custo social marginal das emissões. Este custo social internaliza o valor monetário das perdas de bem-estar causadas pelas externalidades climáticas a nível global e intergeracional, abrangendo impactos sobre a saúde, a produtividade, e os ecossistemas.

Para assegurar a robustez metodológica e a aderência aos normativos, o valor do PC é estabelecido a partir de parâmetros oficiais e estudos econômicos nacionais (como Notas Técnicas do IPEA) e referências internacionais (como o Guia ACB e os guias do *European Investment Bank* - EIB).

A mensuração dos ganhos de GEE, valorada pelo preço-sombra do carbono, frequentemente assume um peso predominante no Valor Presente Líquido dos Benefícios (VPLB) de projetos ferroviários, o que reflete a importância estratégica de internalizar as externalidades globais positivas. Essa magnitude não é vista como uma distorção analítica, mas como a aplicação coerente de preços-sociais que reconhecem o carbono como um ativo de custo social universal, alinhando o projeto aos critérios ESG (*Environmental, Social and Governance*) e às metas climáticas de longo prazo. A metodologia de valoração das externalidades ambientais, portanto, traduz a contribuição da ferrovia para o bem-estar social generalizado, posicionando-a como um instrumento de mitigação climática e de desenvolvimento sustentável.



IMPACTO METODOLÓGICO NO RANKING DE ALTERNATIVAS OPERACIONAIS

A aplicação da Análise Custo-Benefício (ACB) em projetos de infraestrutura de transporte transcende a simples validação de um projeto isolado (viável ou inviável). Sua função estratégica mais relevante é subsidiar a tomada de decisão entre diferentes alternativas operacionais ou escopos de investimento, como a escolha entre operação em via singela, implantação de pátios de cruzamento ou duplicação integral da via, além de diferentes níveis de integração modal e frequência de serviço (*headway*). A metodologia de valoração dos benefícios sociais, detalhada anteriormente, impacta diretamente o "*ranking*" dessas alternativas, ao quantificar como cada cenário operacional afeta os indicadores finais de viabilidade (VSPL, TRE e B/C).

A valoração da redução do tempo de viagem (VTTS), por exemplo, favorece alternativas que investem em maior desempenho. Cenários com infraestrutura robusta (como via duplicada) permitem maiores velocidades médias e frequências, reduzindo o tempo em veículo. Da mesma forma, alternativas que priorizam a integração plena com outros modos (ônibus alimentadores) reduzem drasticamente o "Tempo Generalizado" (TG) percebido pelo usuário, ao eliminar ou mitigar as penalidades comportamentais de espera e transferência. O peso monetário atribuído ao VTTS, especialmente quando segmentado por estratos socioeconômicos, atua como um amplificador: quanto maior o valor atribuído à hora do usuário, mais os indicadores da ACB irão favorecer as alternativas de maior investimento e eficiência operacional.

De forma análoga, a metodologia de valoração da redução de sinistros (VSL) impacta o *ranking* ao priorizar alternativas com maior capacidade de captação de demanda. O cálculo do benefício de segurança é função direta da "exposição evitada" (*pax-km*), ou seja, do volume de passageiros retirados do modo rodoviário. Alternativas operacionais com maior integração, melhor frequência e tarifas competitivas atraem mais usuários.

Consequentemente, ao aplicarem o diferencial de taxas de sinistralidade (rodoviária vs. ferroviária) sobre uma base de demanda maior, esses cenários geram um benefício monetizado pelo VSL exponencialmente superior, refletindo um maior número de vidas salvas e sinistros evitados em termos estatísticos.

O mesmo princípio se aplica à valoração das externalidades ambientais. O benefício da redução de emissões de GEE é calculado multiplicando-se as toneladas de CO2 evitadas pelo Preço-Sombra do Carbono (PC). Assim como na segurança, as emissões evitadas são diretamente proporcionais à demanda capturada. Cenários de rede integrada, que maximizam a migração modal, retiram mais veículos poluentes de circulação. Em contextos nos quais o Preço do Carbono adotado é elevado – conforme recomendações de estudos técnicos nacionais e internacionais (Campoli & Feijó, 2022), este pilar pode se tornar o componente de maior peso no fluxo de caixa social.

O impacto metodológico no *ranking* torna-se, portanto, uma arbitragem entre diferentes objetivos de política pública, refletida nos parâmetros de valoração. Um cenário pode ser o mais rápido (maximizando o VTTS), enquanto outro pode não ser o mais veloz, mas é o que mais atrai passageiros (maximizando os ganhos de VSL e PC). A definição dos valores de referência para cada pilar (seja o valor da hora, o valor da vida ou o preço do carbono) influencia diretamente qual alternativa apresentará o maior Valor Social Presente Líquido (VSPL) e, consequentemente, qual será considerada a mais eficiente do ponto de vista alocativo.

A escolha de um cenário operacional em detrimento de outro é, por conseguinte, um reflexo direto da estrutura metodológica adotada. A decomposição dos benefícios permite ao gestor público enxergar com transparência o que a sociedade "está comprando" com aquele investimento: se é primariamente tempo, segurança ou mitigação climática. A metodologia de ACB, ao fornecer um *ranking* técnico baseado em preços-sociais, legitima a escolha da alternativa que oferece o melhor equilíbrio técnico-econômico e o maior retorno líquido de bem-estar social.



CONCLUSÃO

A proposta central deste trabalho (Volume II) foi aprofundar o arcabouço metodológico da Análise Custo-Benefício (ACB), demonstrando sua função essencial não apenas como instrumento de legitimação social, mas como uma ferramenta técnica indispensável para a priorização de investimentos em transporte ferroviário de passageiros. Partindo da premissa de que tais projetos, embora essenciais para a mobilidade sustentável, geralmente apresentam inviabilidade financeira sob a ótica privada, o artigo dissecou a lógica de valoração dos três pilares que sustentam o retorno coletivo: a Redução do Tempo de Viagem, a Redução de Sinistros (Segurança) e a Redução de Emissões (Ambiente).

O trabalho demonstrou metodologicamente como cada pilar é quantificado, com o Tempo de Viagem valorado pelo VTTS, mas sua magnitude real sendo capturada somente pelo conceito de "Tempo Generalizado" (TG), que inclui as penalidades comportamentais de espera e transferência. A Segurança é mensurada pelo diferencial de risco entre os modos, aplicada sobre a "exposição evitada" (em pax-km) e monetizada pelo Valor Estatístico da Vida (VSL). As Externalidades Ambientais seguem lógica similar, quantificando as emissões evitadas (também em pax-km) e valorando-as pelo Preço-Sombra do Carbono (PC).

O argumento determinante deste estudo é que a forma como esses benefícios são mensurados, e os parâmetros de preço-social adotados, impactam diretamente o ranking das alternativas operacionais. Demonstrou-se que existe uma arbitragem clara: alternativas de maior investimento em desempenho (ex: via duplicada) são favorecidas pelo pilar do Tempo (VTTS); enquanto alternativas focadas em maximizar a captação de demanda (ex: integração modal) são potencializadas pelos pilares da Segurança (VSL) e do Ambiente (PC), cujos benefícios são diretamente proporcionais ao volume de passageiros retirados do modo rodoviário.

Conclui-se, portanto, que a ACB transcende a simples validação de um aporte público. Ela se consolida como um instrumento essencial de política pública que qualifica a tomada de decisão, permitindo ao gestor avaliar, com total transparência, o trade-off entre diferentes escopos de projeto. Ao decompor os ganhos sociais, a metodologia revela exatamente o que a sociedade "está comprando" com o investimento — seja primariamente tempo, segurança ou mitigação climática — legitimando a escolha da alternativa que oferece o melhor equilíbrio técnico-econômico e o maior retorno líquido de bem-estar social.





REFERÊNCIAS

- Anagnostopoulos, A. (2024). Modal Shift to Rail Transport as a Mitigation Measure to Decarbonize the Transport Sector: Review of Barriers and Opportunities. *E3S Web of Conferences*, 585, 12001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458512001>
- Avogadro, N., Cattaneo, M., Paleari, S., & Redondi, R. (2021). Replacing short-medium haul intra-European flights with high-speed rail: Impact on CO2 emissions and regional accessibility. *Transport Policy*, 114, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.08.014>
- Binsuwadan, J., Wardman, M., de Jong, G., Batley, R., & Wheat, P. (2023). The income elasticity of the value of travel time savings: A meta-analysis. *Transport Policy*, 136, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.03.013>
- BRASIL. (2022). *Guia ACB: Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura*.
- Campoli, J. S., & Feijó, J. R. (2022). Nota Técnica Diset nº 102 - Preço do carbono para projetos de investimentos de infraestrutura no Brasil. In *IPEA*. Instituto de Pesquisa Economica Aplicada - IPEA. <https://doi.org/10.38116/ntdiset102>
- Ćetković, J., Lakić, S., Bogdanović, P., Vujadinović, R., & Žarković, M. (2020). Assessing Environmental Benefits from Investment in Railway Infrastructure. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(3), 2125–2137. <https://doi.org/10.15244/pjoes/109849>
- Chhotu, A. K., & Suman, S. K. (2024). Cost Analysis and Prediction of Railroad Level Crossing Accidents for Indian Railways. *Urban Rail Transit*, 10(2), 107–121. <https://doi.org/10.1007/s40864-024-00220-w>
- EC, E. C. (2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*. <https://doi.org/10.2776/97516>
- EIB, E. I. B. (2020). *Appraisal Environmental and Social Review Summary Appraisal Stage (ESRS Appraisal Stage)*.
- FHWA, F. H. A. (2025). *Benefit-Cost Analysis Guidance for Discretionary Grant Programs*.



REFERÊNCIAS

- Garcia, R. C., Goulart, A., Veiga, T. da C., Cunha, L. V. da, & Vilarindo, M. (2016). Development of a feasibility model for a High Speed Rail (HSR) line project. *Journal of Transport Literature*, 10(2), 20–24. <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v10n2a4>
- Henrique, C., & De Carvalho, R. (2020). Custos dos acidentes de trânsito no Brasil: estimativa simplificada com base na atualização das pesquisas do Ipea sobre custos de acidentes nas rodovias. *IPEA*. <http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>
- INFRA S/A. (2022). *Manual de Priorização de Ações e Avaliação Socioeconômica para apoio ao Planejamento de Sistemas e Infraestruturas de Transportes*.
- Jara-Díaz, S. (2007). *Transport Economic Theory*. Elsevier.
- Jiang, C., Wan, Y., Yang, H., & Zhang, A. (2021). Impacts of high-speed rail projects on CO2 emissions due to modal interactions: A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, 103081. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103081>
- Ju, Y., Kim, J., & Kang, W. (2024). Estimating the Value of Time Considering Perceived Congestion and Congestion Duration on Urban Rail Transit. *Journal of Korean Society of Transportation*, 42(5), 533–550. <https://doi.org/10.7470/jkst.2024.42.5.533>
- Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). Modeling Transport. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* (Vol. 4, Issue 1). Wiley.
- Puteri, N. A. S., & Khamim Asy'ari, M. (2025). Hazard analysis and safety management in public transport light rail transit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1473(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1473/1/012043>
- Zhu, W., Zhang, W., Zhang, M., & Fan, W. “David.” (2025). Measuring Route Travel Time Reliability in an Urban Rail Transit Network. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 151(6). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-8713>

**DA INVIABILIDADE FINANCEIRA À
LEGITIMIDADE SOCIAL DO TRANSPORTE DE
PASSAGEIROS: CONTRIBUIÇÃO RELATIVA
DE TEMPO, SEGURANÇA E AMBIENTE NO
RANKING DE ALTERNATIVAS**