

Relatório Preliminar

Caderno de Indicadores Planejamento Integrado de Transportes

Versão inicial para discussão / Consulta Pública (abril2024)

v1

Sumário

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introdução | 7 |
| 2. | Abrangência dos Indicadores..... | 7 |
| 3. | Indicadores Gerais..... | 9 |
| 3.1. | Indicadores gerais de volume de transportes | 11 |
| 3.1.1. | Matriz de transportes em Tonelada-Quilômetro-Útil (TKU) | 11 |
| 3.1.2. | Matriz de transportes em Valor-Quilômetro-Útil (VKU) | 11 |
| 3.2. | Sustentabilidade ambiental | 11 |
| 3.2.1. | Emissões de CO2e do sistema | 11 |
| 3.3. | Acessibilidade | 12 |
| 3.3.1. | Tempo médio ponderado para cargas | 12 |
| 3.3.2. | Tempo Médio Ponderado para o Transporte de Pessoas | 13 |
| 3.4. | Eficiência..... | 14 |
| 3.4.1. | Custo Total do Cenário..... | 14 |
| 3.4.2. | Custo Total do Cenário por 1000*TKU | 15 |
| 3.5. | Segurança | 15 |
| 3.5.1. | Nível de Segurança em Relação ao Cenário Base | 15 |
| 4. | Indicadores Setoriais | 17 |
| 4.1. | Ferroviário | 18 |
| 4.1.1. | Componentes | 18 |
| 4.1.2. | Propriedades..... | 20 |
| 4.1.3. | Resultados Diretos | 22 |
| 4.1.4. | Resultados Indiretos | 22 |
| 4.1.5. | Ambiente | 23 |
| 4.2. | Rodoviário | 24 |
| 4.2.1. | Componentes | 24 |
| 4.2.2. | Propriedades..... | 25 |
| 4.2.3. | Resultados Diretos | 26 |
| 4.2.4. | Resultados Indiretos | 27 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2.5. | Ambiente | 28 |
| 4.3. | Limitações e Melhorias..... | 28 |
| 4.4. | Índice de Benefícios Generalizados | 29 |
| 4.4.1. | Indicador Desenvolvimento Econômico Local | 30 |
| 4.4.2. | Indicador Integração | 31 |
| 4.4.3. | Indicador Capacidade | 33 |
| 4.4.4. | Indicador Acessibilidade | 35 |
| 4.4.5. | Indicador Eficiência Operacional | 35 |
| 4.4.6. | Indicador Segurança | 40 |
| 4.4.7. | Indicador Sustentabilidade | 41 |
| 5. | Referências Bibliográficas..... | 42 |

Lista de equações

| | |
|--|----|
| Equação 1 – Cálculo do TKU total do cenário | 11 |
| Equação 2 – Cálculo da participação do modo k na matriz de TKU no cenário | 11 |
| Equação 3 – Cálculo do VKU total do cenário | 11 |
| Equação 4 – Cálculo da participação do modo k na matriz de VKU no cenário | 11 |
| Equação 5 – Cálculo do indicador de emissões do cenário | 12 |
| Equação 6 – Cálculo do tempo médio do link j | 12 |
| Equação 7 – Cálculo dos veículos por quilometro | 13 |
| Equação 8 - Tempo médio ponderado do modelo | 13 |
| Equação 9 – Tempo médio ponderado para todos os setores | 13 |
| Equação 10 – Cálculo do tempo médio para veículos de passeio | 13 |
| Equação 11 – Volume de veículos de passageiros por link | 14 |
| Equação 12 – Tempo médio ponderado por veículos | 14 |
| Equação 13 – Tempo médio do sistema de transportes de pessoas ponderado pelo volume de passageiros | 14 |
| Equação 14 – Cálculo do custo total de transportes | 15 |
| Equação 15 – Cálculo do custo total de transportes dividido pelo tku total do cenário | 15 |
| Equação 16 – Cálculo do Índice de segurança para veículos pesados | 16 |
| Equação 17 – Cálculo do Índice de segurança para veículos leves | 16 |
| Equação 18 – Cálculo do Índice de segurança do cenário | 17 |
| Equação 19 – Cálculo do indicador de emissões do cenário | 17 |
| Equação 20 – Equação de impacto do PIB devido a investimentos em infraestrutura | 30 |
| Equação 21 – Normalização invertida da integração municipal | 31 |
| Equação 22 – Cálculo do índice de integração provável do município no período de análise | 32 |
| Equação 23 – Variação da integração ponderada | 32 |
| Equação 24 – Indicador de integração | 32 |
| Equação 25 – Indicador de capacidade ferroviária | 33 |
| Equação 26 – Indicador de capacidade ferroviária | 34 |
| Equação 27 – Custo médio rodoviário por classe de capacidade | 36 |
| Equação 28 – Índice de acidentes | 40 |
| Equação 29 – Indicador de segurança rodoviário | 40 |
| Equação 30 – Indicador de segurança ferroviário | 41 |
| Equação 31 – Indicador de sustentabilidade rodoviário | 41 |
| Equação 32 – Indicador de sustentabilidade ferroviário | 42 |

Lista de figuras

Figura 1 – Sistema de Indicadores do PNL 2035 10

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características de indicadores utilizados no PIT8

Tabela 2 – Índice de caracterização da via 16

Tabela 3 - Integração acrescida nos municípios entre o ano base e o horizonte de projeto31

Tabela 4 - Capacidades por tipo de pista 34

Tabela 5 - Escalas de capacidade rodoviária36

Lista de quadros

Quadro 1 – Elementos afetados pelos objetivos dos planos setoriais.....29

1. Introdução

O presente caderno consolida a visão do sistema de indicadores aplicado no primeiro ciclo de Planejamento Integrado de Transportes (PIT), que abrange os indicadores utilizados no Plano Nacional de Logística 2035 (PNL 2035) que foram utilizados especificamente para construção dos Planos Setoriais Ferroviário e Rodoviário deste ciclo. Dessa forma, este apêndice é um detalhamento fundamental do capítulo de índices e indicadores apresentado no corpo do relatório principal deste trabalho.

2. Abrangência dos Indicadores

A estrutura de desenvolvimento do Planejamento Integrado de Transportes foi concebida para garantir coerência conceitual e metodológica entre os níveis estratégico e tático. Nesse contexto, todas as ações estabelecidas nos Planos Setoriais (nível tático), sejam elas iniciativas ou empreendimentos, devem buscar o alcance dos objetivos definidos a partir do diagnóstico (em nível estratégico) no Plano Nacional de Logística – PNL 2035 (EPL, 2021) e nos Planos Setoriais de Transporte. Por isso, é indispensável que os planos táticos liguem explicitamente as ações resultantes do trabalho, com os objetivos originalmente estabelecidos. O elo entre esses elementos são os indicadores, que possibilitam aferir os efeitos (atuais ou potenciais futuros) das ações, medindo assim o alcance dos objetivos do plano.

Assim, a definição e adoção de uma carteira de indicadores, que seja usada tanto para o diagnóstico quanto para a avaliação das ações, se torna uma etapa essencial de qualquer plano, sendo ainda mais relevante em planos de grande abrangência ou complexidade, que tratam com múltiplas instituições pública e privadas, como é o caso do Planejamento Integrado de Transportes no Brasil.

Para a proposição inicial da lista de indicadores adotados, foram realizadas pesquisas em diversas fontes, de forma a sugerir indicadores para caracterizar todas as Propriedades e Resultados do sistema de transporte, com apoio nos elementos definidos na Rede Semântica padronizada que foi definida para o PIT. Após esse levantamento preliminar, foram realizadas reuniões para discussão e validação com as equipes técnicas do Ministério e outros entes por ele apontados.

A Rede Semântica auxilia o trabalho de vinculação dos objetivos a elementos que podem ser “medidos”, concebendo assim, o sistema de indicadores necessários para se caracterizar o sistema de transporte, para auxílio de sua compreensão e para as fases de avaliação do alcance dos objetivos, presente tanto no diagnóstico (situação atual), quanto nos prognósticos (situações potenciais e tendenciais futuras).

Dada a complexidade e a abrangência de um sistema de transporte, é natural que nem sempre seja possível a representação de todos os resultados ou propriedades de um sistema. No entanto, deve-se sempre incorrer esforços para a mensuração de, no mínimo, os elementos que possuem relação com os objetivos estabelecidos no plano.

O estabelecimento ou escolha das métricas para cada indicador, além de sua efetiva aplicação, fica limitado a vários fatores, tais como:

- i. representatividade perante o elemento que se propõe medir;
- ii. abrangência em relação ao sistema;
- iii. dados disponíveis;
- iv. possibilidade de estimativa;
- v. possibilidade de projeção (visão de futuro);
- vi. sensibilidade de afetação em relação às ações analisadas e/ou simuladas no plano; e
- vii. disponibilidade de ferramentas para seu cálculo.

Dessa forma, a lista de indicadores definida conjuntamente foi aplicada, sempre que possível, para avaliação do cumprimento dos objetivos dos planos. Quando não foi possível aplicá-la de forma precisa, os indicadores foram adequados conforme as possibilidades do momento.

Em se tratando de indicadores, é também relevante padronizar e destacar as diferentes características de indicadores utilizados nos Planos de transporte. Eles podem ser classificados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Características de indicadores utilizados no PIT

| | |
|---|--|
| Quanto à finalidade | Finalísticos: mensuram <u>propriedades</u> e <u>resultados</u> diretamente vinculados aos <u>objetivos</u> do ciclo de planejamento |
| | Caracterização: descrevem outras <u>propriedades</u> e <u>resultados</u> , não vinculados a objetivos; visam a construção de séries históricas setoriais |
| | Descritivos: descrevem atributos diretos dos <u>componentes</u> e <u>ambiente</u> do setor; úteis para complementar e compreender melhor indicadores finalísticos e de caracterização |
| | Governança operacional: mensuram o estágio de execução dos <u>mecanismos</u> de intervenção (<u>ações</u> e <u>processos</u>) |
| Quanto à abrangência | Gerais: representam um setor / sistema, de forma conjunta; visam analisar e comparar os resultados de diferentes <u>cenários</u> entre si |
| | Setoriais: refletem características de cada setor de transportes individualmente. Medem o alcance dos objetivos setoriais e, por consequência, apresentam as potencialidades e deficiências setoriais a serem tratadas no planejamento. |
| | Específicos: representam o efeito individual específico de uma ação (empreendimento ou iniciativa); visam analisar e comparar os efeitos de diferentes <u>ações</u> entre si |
| Quanto ao horizonte de aplicação | Ex-post: restritos a dados atuais existentes; ainda não possuem critérios de projeção ou modelos de simulação; aptos para diagnóstico |
| | Ex-ante: tem modelos de projeção; simuláveis em cenários futuros; aptos para diagnóstico e prognóstico |

Ao se listar os dados disponíveis e relacioná-los com a rede semântica, é possível visualizar se a mensuração de um determinado indicador será completa (quando os dados permitem medir todos os elementos daquela propriedade ou resultado, muitas vezes de forma direta), parcial (quando os dados possibilitam medir parte dos elementos daquela propriedade ou resultado), ou indireta (quando os dados

permitem obter parte das informações que representam um ou mais dos elementos de uma propriedade ou resultado, ou seja, quando há relação com a propriedade/resultado principal, mas essa relação não é direta e nem absoluta).

A rede semântica apresenta um arco referente aos resultados diretos do sistema de transporte. Esses, apesar de serem compreendidos como indicadores de caracterização e descritivos (conforme exposto na Tabela 1), não avaliam impactos para fins de classificação de ações ou de avaliação de cenários, pois são utilizados para estimar impactos indiretos, e aferir os efeitos nas propriedades. Assim sendo, a não consideração dessa parcela evita a multicolinearidade e redundância nas avaliações.

Os indicadores são calculados utilizando tanto a base de dados cadastrais organizada para fins do Planejamento Integrado de Transportes, quanto os resultados da simulação de cenários utilizando o modelo de macro simulação intermodal da Infra S.A., além de modelos e estimativas acessórias.

3. Indicadores Gerais

Os indicadores gerais se propõem a medir e avaliar aspectos do Sistema de Transportes como um todo, tendo como foco uma análise de nível estratégico, mas podendo ser utilizados para análises de nível tático. A sua análise se dá por meio de comparação entre diferentes cenários. Medem o alcance da política pública nacional e estratégica e, por consequência, permitem a identificação de necessidades e oportunidades para o sistema de transporte. Aqui, serão discutidos apenas os indicadores utilizados nesta etapa de planejamento tático setorial com o objetivo de atualizar o diagnóstico e prognósticos do PNL 2035.

Dessa forma, serão apresentados apenas indicadores referentes ao sistema de transportes, que são classificados pela Tabela 1 como indicadores finalísticos, gerais e *ex-ante*. Isso significa que eles apresentam resultados diretos de todo o sistema de transportes por meio de cálculos que são projetáveis. Dessa forma, eles permitem a avaliação de como alterações na infraestrutura são capazes de influenciar a logística de transportes brasileira para o atendimento dos objetivos declarados na política nacional de transportes e incorporados aos planos de transportes.

Os *objetivos* do PNL que dizem respeito ao desenvolvimento da rede de transportes, conforme comentado na seção 2 deste Relatório Executivo, são:

1. Prover um sistema acessível, eficiente e confiável para a mobilidade de pessoas e bens;
2. Garantir a segurança operacional em todos os modos de transportes;
3. Prover uma matriz viária racional e eficiente;
- (...)
9. Promover a cooperação e a integração física e operacional internacional;

10. Considerar as particularidades e potencialidades regionais nos planejamentos setoriais de transportes;
11. Atuar como vetor do desenvolvimento socioeconômico e sustentável do país;
12. Garantir a infraestrutura viária adequada para as operações de segurança e defesa nacional.

Com base na definição de cada objetivo, foram listados os elementos de representação, ou seja, os elementos endógenos (que dizem respeito ao sistema de transporte) ou exógenos (que dizem respeito ao ambiente em que o sistema está inserido) para o qual devem ser voltadas as ações de desenvolvimento.

Foi realizado um estudo aprofundado para conceituação e determinação das métricas dos indicadores para medir de forma objetiva cada um dos elementos, em consonância com os modelos de simulação utilizados no PNL 2035 e com seus resultados. A Figura 1 sistematiza os objetivos do PNL (com numeração referente ao objetivo na PNT) os elementos de representação e os indicadores de avaliação de cenários.

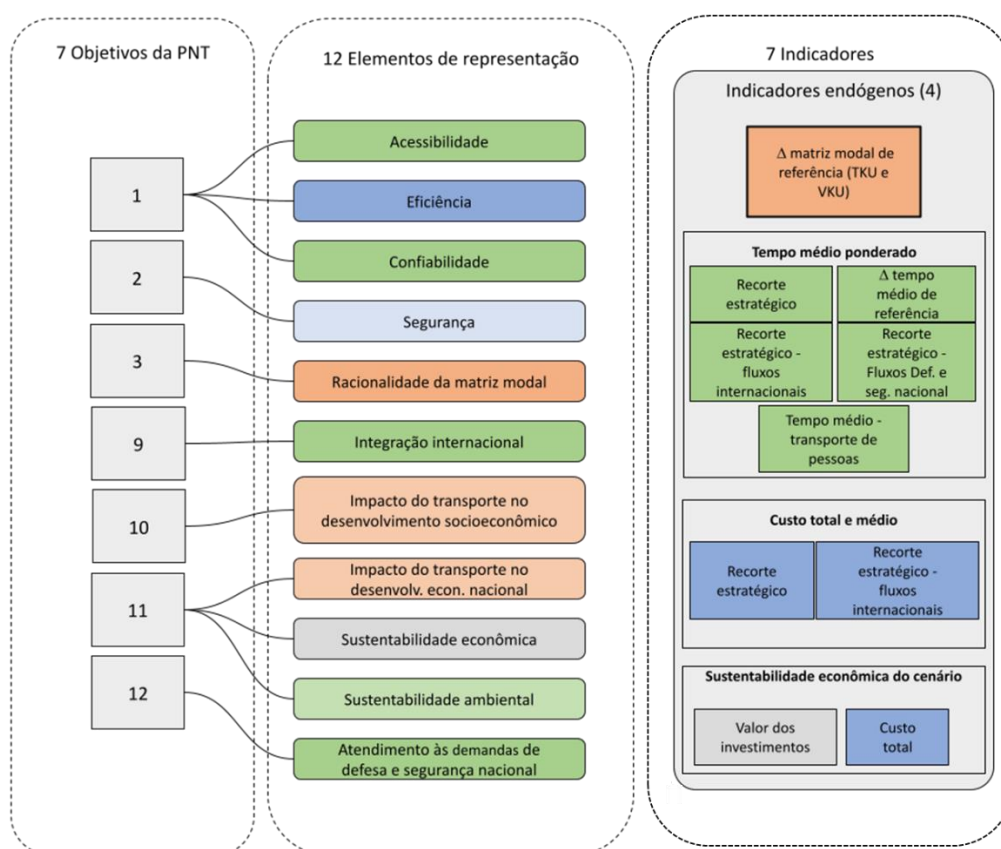


Figura 1 – Sistema de Indicadores do PNL 2035

Na sequência, serão apresentadas as metodologias de cálculo dos principais indicadores utilizados na atualização de diagnóstico e prognóstico destes Planos Setoriais. Primeiro, são introduzidos os indicadores gerais de volume de transportes, indicando a quantidade de carga transportada no sistema em TKU e VKU. Por fim, são apresentados os indicadores por quatro grupos de elementos de representação definidos no PNL: sustentabilidade ambiental, acessibilidade, eficiência e segurança.

3.1. Indicadores gerais de volume de transportes

3.1.1. Matriz de transportes em Tonelada-Quilômetro-Útil (TKU)

Esse indicador visa calcular a repartição modal, em relação ao TKU transportado no modelo, considerando os links rodoviários, hidroviários, cabotagem e ferroviários. Os modos aeroviários e dutoviários também são considerados, mas são calculados de forma exógena ao modelo. Para cada $k \in (\text{Rodoviário}, \text{Hidroviário}, \text{Cabotagem}, \text{Ferroviário}, \text{Aeroviário}, \text{Dutoviário})$ modo, são realizados os cálculos mostrados na Equação 1 e na Equação 2.

Equação 1 – Cálculo do TKU total do cenário

$$\text{TKU Total} = \text{TKU Modelo} + \text{TKU Aeroviário} + \text{TKU Dutoviário}$$

Equação 2 – Cálculo da participação do modo k na matriz de TKU no cenário

$$\text{Participação do modo}_k = \frac{\text{TKU Total do modo}_k}{\text{TKU Total}}$$

3.1.2. Matriz de transportes em Valor-Quilômetro-Útil (VKU)

Da mesma forma que a Matriz de transportes em TKU, esse indicador visa calcular a repartição modal em relação ao valor dos bens transacionados. Também considera os *links* rodoviários, hidroviários, cabotagem e ferroviários do modelo e os modos aeroviário e dutoviário exogenamente. Para cada $k \in (\text{Rodoviário}, \text{Hidroviário}, \text{Cabotagem}, \text{Ferroviário}, \text{Aeroviário}, \text{Dutoviário})$ modo considerado, são realizados os cálculos mostrados na Equação 3 e na Equação 4.

Equação 3 – Cálculo do VKU total do cenário

$$\text{VKU Total} = \text{VKU Modelo} + \text{VKU Aeroviário} + \text{VKU Dutoviário}$$

Equação 4 – Cálculo da participação do modo k na matriz de VKU no cenário

$$\text{Participação do modo}_k = \frac{\text{VKU Total do modo}_k}{\text{VKU Total}}$$

3.2. Sustentabilidade ambiental

3.2.1. Emissões de CO2e do sistema

O indicador de emissões compreende a soma do volume de emissões de todos os *links* rodoviários (carga e passageiros), hidroviários, cabotagem e ferroviários do modelo, além de emissões aeroviárias calculadas de forma exógena. Seu cálculo segue a Equação 19, em que $k \in (\text{Rodoviário}, \text{Hidroviário}, \text{Cabotagem}, \text{Ferroviário}, \text{Aeroviário}, \text{Dutoviário})$ representam os modos de transporte que possuem fatores de emissão específicos para cada grupo de carga transportado, referenciado por $w \in (\text{GSA}, \text{GSM}, \text{OGSM}, \text{GL}, \text{CGC}, \text{CGNC})$. A multiplicação é feita por cada link $j \in (1, \dots, n)$, em que n representa o universo total de links abrangidos pelo indicador. Além do quantitativo para os veículos de carga, o cálculo também é feito

para os veículos rodoviários de pessoas, em que, para cada tipo $p \in (automóvel, ônibus)$ existe um fator de emissão atrelado.

Equação 5 – Cálculo do indicador de emissões do cenário

$$\text{Emissões} = \left(\sum_{j,k,w} \text{Fator de emissão}_{k,w} \times \text{TKU}_{j,k,w} \right) + \left(\sum_{j,p} \text{Fator de emissão}_p \times \text{Veículos}_{j,p} \times \text{Comprimento do link}_j \right)$$

Os fatores de emissões para cargas foram produzidos pela durante a parceria EPL - IEMA e sua metodologia está disponível no site do Observatório Nacional de Logística de Transportes (ONTL)¹. Já os fatores de emissões para ônibus e automóveis foram extraídos do estudo de Carvalho (2011)².

3.3. Acessibilidade

3.3.1. Tempo médio ponderado para cargas

O indicador de Tempo Médio Ponderado para Cargas reflete o tempo médio, em segundos, que uma tonelada de carga demora para perpassar um quilômetro, de forma que a unidade de medida do indicador é “segundos por quilômetro” (seg/km). O indicador abarca apenas links que foram contemplados na Camada Estratégica de Análise (CEA) e pertencentes aos modos rodoviário, ferroviário, hidroviário e cabotagem. Os modos dutoviário e aeroviário também são contemplados, mas calculados de modo exógeno ao modelo. Especificamente para os links rodoviários, excluíram-se os links de rodovias urbanas devido ao caráter peculiar dessas infraestruturas. Também foram excluídos links que apresentaram valores extremamente discrepantes para seu modo, considerados outliers – tais situações, no entanto, representaram apenas 0,0006% dos casos.

Para calcular o tempo médio, em seg/km, para cada link e para cada um dos 38 produtos da matriz de carga. Como o tempo médio entre os produtos é o mesmo para qualquer produto que utiliza uma mesma infraestrutura, uma média simples pode ser aplicada. Para os $i \in (1, 38)$ produtos que passam o link j , a Equação 6 é aplicada.

Equação 6 – Cálculo do tempo médio do link j

$$\text{Tempo Médio}_j = \frac{\sum_{i=1}^{38} \frac{\text{Tempo para perpassar o link}_{i,j}}{\text{Comprimento do link}_j}}{38}$$

¹ Disponível em: https://www.epl.gov.br/greenbonds#dfliip-df_manual/1/ (Acesso em 23/03/2021).

² CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos. Texto para Discussão. TD 1606. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, abril de 2011. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1578/1/td_1606.pdf

Para calcular o volume em veículos por quilômetro que perpassam cada link j . Para isso, soma-se o volume de tráfego, em veículos, de cada umas das i matrizes de carga e multiplica-se pelo comprimento do link Equação 7.

Equação 7 – Cálculo dos veículos por quilometro

$$\text{Veículos por quilômetro}_j = \left(\sum_{i=1}^{38} \text{Veículos}_{i,j} \right) \times (\text{Comprimento do link}_j)$$

Para calcular o tempo médio ponderado para os n links abarcados pelo indicador, multiplica-se a quantidade de veículos por quilometro no link j pelo tempo médio para atravessar o link j e divide-se pela quantidade total de veículos por quilometro do sistema, como apresentado na Equação 8.

Equação 8 - Tempo médio ponderado do modelo

$$\text{Tempo Médio do Modelo} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Tempo Médio}_j \times \text{Veículos por quilômetro}_j}{\sum_{j=1}^n \text{Veículos por quilômetro}_j}$$

Por fim, calcula-se o valor final do indicador, ponderando o Tempo Médio do Modelo pelos tempos médios do modo aeroviário e dutoviário a partir do montante de TKU, como mostrado na Equação 9.

Equação 9 – Tempo médio ponderado para todos os setores

$$\text{TKU Total} = \text{TKU Modelo} + \text{TKU Aeroviário} + \text{TKU Dutoviário}$$

$$\begin{aligned} \text{Tempo Médio para Cargas} = & \frac{\text{TKU Modelo}}{\text{TKU Total}} \times \text{Tempo Médio do Modelo} + \\ & \frac{\text{TKU Aeroviário}}{\text{TKU Total}} \times \text{Tempo Médio Aeroviário} + \frac{\text{TKU Dutoviário}}{\text{TKU Total}} \times \text{Tempo Médio Dutoviário} \end{aligned}$$

3.3.2. Tempo Médio Ponderado para o Transporte de Pessoas

O indicador visa refletir o tempo médio, em seg/km, para uma pessoa percorrer um quilômetro independente do modo de transporte. Constituem universo de *links* do indicador aqueles pertencentes à Camada Estratégica de Análise e do modo rodoviário, desde que não urbanos. Os modos ferroviário, aeroviário e hidroviários também são considerados para o cálculo, por mais que de forma exógena.

Primeiro, calcula-se o tempo médio para automóveis e ônibus, em seg/km, para cada *link* j pela Equação 10

Equação 10 – Cálculo do tempo médio para veículos de passeio

$$\begin{aligned} \text{Tempo Médio para Automóveis}_j = & \frac{\text{Tempo para automóveis perpassarem o link}_j}{\text{Comprimento do link}_j} \\ \text{Tempo Médio para Ônibus}_j = & \frac{\text{Tempo para ônibus perpassarem o link}_j}{\text{Comprimento do link}_j} \end{aligned}$$

Logo, calcula-se o volume em veículos por quilômetro que perpassam cada *link j*. Para isso, multiplica-se o volume de tráfego de automóveis do *link j* pelo comprimento desse *link*. Esse cálculo também é feito individualmente para automóveis e ônibus, como mostrado na Equação 11.

Equação 11 – Volume de veículos de passageiros por link

$$\text{Automóveis por quilômetro}_j = (\text{Volume de automóveis}_j) \times (\text{Comprimento do link}_j)$$

$$\text{Ônibus por quilômetro}_j = (\text{Volume de Ônibus}_j) \times (\text{Comprimento do link}_j)$$

$$\text{Veículos por quilômetro}_j = \text{Automóveis por quilômetro}_j + \text{Ônibus por quilômetro}_j$$

Em seguida, calcula-se o tempo médio para cada *link j*, como mostrado na Equação 12.

Equação 12 – Tempo médio ponderado por veículos

$$\text{Tempo Médio}_j = \frac{A_i + B_i}{\text{Veículos por quilômetro}_j}$$

em que

$$A_i = \text{Tempo Médio para Automóveis}_j \times \text{Automóveis por quilômetro}_j$$

$$B_i = \text{Tempo Médio para Ônibus}_j \times \text{Ônibus por quilômetro}_j$$

Depois, calcula-se a média ponderada para os *n links* abarcados pelo indicador:

$$\text{Tempo Médio do Modelo} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Tempo Médio}_j \times \text{Veículos por quilômetro}_j}{\sum_{j=1}^n \text{Veículos por quilômetro}_j}$$

Por fim, calcula-se o valor final do indicador, ponderando o *Tempo Médio do Modelo* pelos tempos médios para transporte de passageiros pelos modos hidroviário, ferroviário e aeroviário a partir do valor em pessoas por quilômetro (PKM) da matriz interurbana, como apresentado na Equação 13.

Equação 13 – Tempo médio do sistema de transportes de pessoas ponderado pelo volume de passageiros

$$\text{PKM Total} = \text{PKM Modelo} + \text{PKM Hidroviário} + \text{PKM Ferroviário} + \text{PKM Aeroviário}$$

$$\begin{aligned} \text{Tempo Médio para Pessoas} = & \frac{\text{PKM Modelo}}{\text{PKM Total}} \times \text{Tempo Médio do Modelo} + \\ & \frac{\text{PKM Hidroviário}}{\text{PKM Total}} \times \text{Tempo Médio Hidroviário} + \frac{\text{PKM Ferroviário}}{\text{PKM Total}} \times \text{Tempo Médio Ferroviário} + \\ & \frac{\text{PKM Aeroviário}}{\text{PKM Total}} \times \text{Tempo Médio Aeroviário} \end{aligned}$$

3.4. Eficiência

3.4.1. Custo Total do Cenário

Esse indicador visa refletir o custo generalizado de transporte da Camada Estratégica de Análise do cenário. Isto é, a soma dos custos operacionais de transporte e dos custos de valor do tempo para cargas. Enquanto os custos de valor do tempo dependem do produto a ser transportado, independente do modo ou operação, os custos operacionais de transporte são discriminados conforme o modo³ e grupo de carga⁴. Alguns elementos logísticos não são representados, como custo de armazenagem; custos por perda ou roubo da carga; ou outros custos de transação.

O universo de *links* considerados para o cálculo compreende aqueles que fazem parte da Camada Estratégica de Análise e que não são urbanos. Os modos aeroviários e dutoviários são considerados no cálculo, mas de forma exógena. O cálculo é feito conforme demonstrado pela Equação 14, para os *n links* compreendidos pelo indicador.

Equação 14 – Cálculo do custo total de transportes

$$\text{Custo total} = \left(\sum_{j=1}^n \text{Custo total do Link}_j \right) + \text{Custo total Aeroviário} + \text{Custo total Dutoviário}$$

3.4.2. Custo Total do Cenário por 1000*TKU

Esse indicador visa refletir o custo médio por cada tonelada-quilômetro (TKU) transportada na Camada Estratégica de Análise. Seu cálculo é feito da mesma forma que o Custo Total do Cenário, mas dividido pelo TKU total do cenário, conforme apresentado pela Equação 15. Essa conta resulta na unidade de R\$/TKU, de forma que, para melhor apresentação, o resultado é multiplicado por 1000, modificando sua unidade para R\$/1000*TKU.

Equação 15 – Cálculo do custo total de transportes dividido pelo tku total do cenário

$$\text{Custo total} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n \text{Custo total do Link}_j \right) + \text{Custo total Aeroviário} + \text{Custo total Dutoviário}}{\text{TKU total} * 1000}$$

3.5. Segurança

3.5.1. Nível de Segurança em Relação ao Cenário Base

De acordo com a metodologia desenvolvida pela INFRA S.A., os trechos rodoviários recebem índices de probabilidade de acidentes que variam conforme as características do trecho, isto é, se (i) o trecho tem múltiplas faixas por sentido ou apenas uma; (ii) encontra-se em região rural ou urbana; e (iii) se o tráfego predominante é de veículos de pessoas (automóveis ou ônibus) ou veículos de cargas (pesados).

³ Rodoviário – por quantidade de faixas de via; ferroviário – por malha; hidroviário – por restrição da hidrovia; Cabotagem; aeroviário e dutoviário.

⁴ GSA; GSM; OGSM; GL; CGC; CGNC.

Esses índices foram calculados a partir da análise de dados dos acidentes com fatalidades coletados anualmente pela Polícia Rodoviária Federal (PRF)⁵. A análise levou em conta os anos entre 2017 e 2019 e a caracterização pelo tipo de via e uso do solo da região feita no momento de registro da informação no banco da PRF. Ainda, a partir da informação sobre a quilometragem do sinistro, foi mapeado um provável SNV para ele. Assim, foram adicionadas outras duas variáveis a regressão: a predominância do tráfego e o volume médio diário anual (VMDa) de veículos obtidos por meio de informações do DNIT⁶. A Tabela 2 resume os índices para cada caracterização da via.

Tabela 2 – Índice de caracterização da via

| Tipo de pista | Uso do Solo | Índice de pesados | Índice de leves |
|----------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| Múltipla | Rural | 0,0000069975 | 0,0000013479 |
| Múltipla | Urbano | 0,0000135247 | 0,0000104905 |
| Simples | Rural | 0,0000066243 | 0,0000023792 |
| Simples | Urbano | 0,0000230773 | 0,0000054801 |

Cabe notar que vias rurais, com características semelhantes, possuem um índice de acidentalidade menor que vias urbanas, provavelmente devido a menores interferências na via em geral, como, por exemplo, pedestres, acessos e interseções. Além disso, também é perceptível que o índice de vias urbanas para um tráfego predominantemente leve, pistas simples são mais seguras que pistas múltiplas. Isso ocorre possivelmente pois pistas múltiplas em trechos urbanos propiciam velocidades mais elevadas e dificultam pedestres de atravessá-la, aumentando a gravidade dos acidentes.

Uma solução mais adequada para trafegabilidade e segurança em trechos urbanos é a implantação de contornos e variantes urbanas. Elas garantem as condições de tráfego da via e diminuem a interação com a população local, reduzindo o número de transeuntes na pista.

Inicialmente deve ser avaliada a predominância do tráfego entre veículos leves e pesados e então calcular do índice de segurança para cada um dos n links rodoviários compreendidos no universo do indicador pela Equação 16 e Equação 17.

Equação 16 – Cálculo do Índice de segurança para veículos pesados

$$\text{Índice de segurança}_j = \text{Índice de pesados}_j \times \frac{\text{Tráfego total do link}_j}{\text{Comprimento do link}_j}$$

Equação 17 – Cálculo do Índice de segurança para veículos leves

⁵ Dados de acidentalidade em rodovias federais estão disponíveis em <https://www.gov.br/prf/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-da-prf>

⁶ Mais informações sobre os dados de VMDa podem ser consultadas em www.dnit.gov.br/pnct.

$$\text{Índice de segurança}_j = \text{Índice de leves}_j \times \frac{\text{Tráfego total do link}_j}{\text{Comprimento do link}_j}$$

Após o cálculo do índice de segurança de todos os links j , calcula-se o índice de segurança geral do cenário, pelo somatório de todos os índices, como mostrado pela Equação 18.

Equação 18 – Cálculo do Índice de segurança do cenário

$$\text{Índice de segurança do cenário} = \sum_{j=1}^n \text{Índice de segurança}_j$$

Por fim, vale destacar que esse indicador não tem uma proposta preditiva do número potencial de acidentes em um cenário, mas sim da variação desse cenário em relação a um cenário de referência. Assim ele deve ser entendido como um índice puramente comparativo, sendo necessário avaliar o número de um cenário com os demais do plano Emissões de CO₂e do sistema

O indicador de emissões compreende a soma do volume de emissões de todos os *links* rodoviários (carga e passageiros), hidroviários, cabotagem e ferroviários do modelo, além de emissões aeroviárias calculadas de forma exógena. Seu cálculo segue a Equação 19, em que $k \in (\text{Rodoviário}, \text{Hidroviário}, \text{Cabotagem}, \text{Ferroviário}, \text{Aeroviário}, \text{Dutoviário})$ representam os modos de transporte que possuem fatores de emissão específicos para cada grupo de carga transportado, referenciado por $w \in (\text{GSA}, \text{GSM}, \text{OGSM}, \text{GL}, \text{CGC}, \text{CGNC})$. A multiplicação é feita por cada link $j \in (1, \dots, n)$, em que n representa o universo total de links abrangidos pelo indicador. Além do quantitativo para os veículos de carga, o cálculo também é feito para os veículos rodoviários de pessoas, em que, para cada tipo $p \in (\text{automóvel}, \text{ônibus})$ existe um fator de emissão atrelado.

Equação 19 – Cálculo do indicador de emissões do cenário

$$\text{Emissões} = \left(\sum_{j, k, w} \text{Fator de emissão}_{k, w} \times \text{TKU}_{j, k, w} \right) + \left(\sum_{j, p} \text{Fator de emissão}_p \times \text{Veículos}_{j, p} \times \text{Comprimento do link}_j \right)$$

Os fatores de emissões para cargas foram produzidos pela durante EPL-IEMA (2019). Já os fatores de emissões para ônibus e automóveis foram extraídos do estudo de Carvalho (2011)

4. Indicadores Setoriais

O conjunto de indicadores de análise de nível tático é caracterizado por métodos e modelos que permitem uma análise especializada setorial. Tais indicadores podem ser divididos em dois grupos, os indicadores de rede e os indicadores específicos. O primeiro visa avaliar os setores individualmente e as infraestruturas os compõem. O segundo grupo é focado nas ações daquele setor, fazendo parte do índice de benefícios generalizados (IBG).

Para uma análise de transportes multimodal, os indicadores táticos podem não ter métodos ou modelos aplicáveis a todos os setores de uma mesma forma. Em alguns casos é necessário que o indicador se ajuste

às especificidades de cada setor para que as mesmas propriedades sejam avaliadas, independentemente de qual modo está sendo avaliado.

4.1. Ferroviário

4.1.1. Componentes

4.1.1.1. Extensão total da malha ferroviária brasileira

Esse indicador é calculado somando a extensão de todos os trechos ferroviários mapeados na base de dados cadastral, representando a abrangência completa da rede ferroviária. O número não apresenta variação entre os cenários, o indicador é calculado conforme a fórmula abaixo:

$$\sum \text{Extensão dos trechos ferroviários}$$

4.1.1.2. Extensão total da malha ferroviária brasileira operacional

Esse indicador considera as informações da declaração de rede, os trechos que apresentam capacidade instalada e vinculada maior que zero são considerados operacionais. Para cenários futuros, são identificadas as ações que implantam ou deixam operacionais os trechos marcados como não operacionais. Por fim, são somadas as extensões dos trechos operacionais para aquele cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Ext_Oper}$$

Em que:

Ext_Oper é a extensão dos trechos marcados como operacionais.

4.1.1.3. Extensão total da malha ferroviária por tipo de bitola

No cadastro ferroviário, um dos atributos é a classificação da bitola característica daquele trecho. As bitolas podem ser do tipo: larga, métrica, mista e *standard*. Para o cálculo do indicador, as bitolas são agrupadas e somadas às extensões dos trechos correspondentes a cada uma.

4.1.1.4. Extensão total da malha ferroviária por tipo de sistema de sinalização

A classificação da sinalização característica de um trecho ferroviário pode ser dos seguintes tipos: não sinalizado, ABS, ATC, CBTC, CTC, TWE.

4.1.1.5. Extensão total da malha ferroviária por tipo de sistema de controle operacional

A classificação do tipo de controle operacional de um trecho ferroviário pode ser dos seguintes tipos: local ou CCO.

4.1.1.6. Quantidade de pátios ferroviários operacionais

Para esse indicador, são contabilizados os pátios ferroviários marcados como operacionais no sistema. Essa caracterização, para cenários futuros, depende da existência de ações que tenham como impacto alterar a capacidade do pátio de zero para maior que zero. Com essa alteração, o pátio passa a ser classificado como operacional, a contabilização se dá conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Quantidade de pátios operacionais}$$

4.1.1.7. Quantidade de pátios de transbordo de cargas

Para a contabilização dos pátios de transbordo de carga são identificados aqueles em que há um terminal atrelado a ele; Tais pátios são contabilizados para a obtenção do indicador. Para cenários futuros, a existência de ações que implantem um pátio de transbordo de cargas gera o aumento desse número, sendo contabilizado conforme a fórmula abaixo:

$$\sum \text{Quantidade de Pátios de Transbordo de cargas}$$

4.1.1.8. Capacidade dos pátios de transbordo de carga

A capacidade de um pátio ferroviário é a soma das capacidades de cada terminal. Dependendo do cenário, a capacidade é calculada de forma diferente. Para o diagnóstico, as capacidades dos terminais são cadastradas em toneladas úteis por dia. Esse valor é multiplicado por 365 para obtenção de uma capacidade anual, conforme a fórmula abaixo:

$$\text{Capacidade Terminal} = \text{Toneladas úteis dias} \times 365$$

O valor da capacidade é agregado para os pátios. Para pátios que recebem ações, suas capacidades após o recebimento da obra ou empreendimento é declarada no momento do impacto. A fórmula da capacidade dos pátios de transbordo de carga dessa está descrita abaixo:

$$\text{Capacidade Pátio} = \sum_{1}^n \text{Capacidade Terminal}$$

4.1.1.9. Quantidade de terminais de transbordo de cargas

O indicador contabiliza o número total de terminais (existentes e planejados) presentes na base cadastral. O número não apresenta variação de cenário para cenário, o indicador é calculado conforme a fórmula abaixo:

$$\sum \text{Número de Terminais de Transbordo de cargas}$$

4.1.1.10. Quantidade de pátios de transbordo de carga por extensão de via

Para obtenção desse indicador, é calculada uma média ponderada da quantidade de pátios de transbordo de cargas por ferrovia em relação a sua extensão total. A equação abaixo representa o cálculo:

$$\frac{\sum_1^n \text{Quantidade de Pátios} \times \sum_1^n \text{Extensão da Ferrovia}}{\sum_1^n \text{Extensão da Ferrovia}}$$

4.1.2. Propriedades

4.1.2.1. Participação do modo ferroviário na matriz de transporte de TKU

O cálculo do indicador consiste na divisão do carregamento em TKU do setor ferroviário pelo TKU total do sistema, conforme equação abaixo:

$$\frac{\sum \text{TKU dos Links Ferroviários}}{\sum \text{TKU Total}}$$

Em que:

TKU Total é a soma do carregamento em TKU de todos os setores (cabotagem, hidroviário, rodoviário, ferroviário, aeroviário, dutoviário e longo curso)

4.1.2.2. Participação do modo ferroviário na matriz de transporte de VKU

O cálculo desse indicador consiste na divisão do carregamento em VKU do setor ferroviário pelo VKU total do sistema, conforme equação abaixo:

$$\frac{\sum \text{VKU dos Links Ferroviários}}{\sum \text{VKU Total}}$$

Em que:

VKU Total é a soma do carregamento em VKU de todos os setores (cabotagem, hidroviário, rodoviário, ferroviário, aeroviário, dutoviário e longo curso)

4.1.2.3. Custo total por unidade de transporte movimentada

Esse indicador mensura o custo médio de movimentação de um TKU de carga para o modo ferroviário. O valor do custo total é dividido pela movimentação em TKU, obtendo um valor em R\$/TKU. Segue abaixo a fórmula:

$$\frac{\sum \text{Custo dos links ferroviários}}{\sum \text{TKU dos links ferroviários}}$$

4.1.2.4. Saturação

Para o cálculo de saturação ferroviária, retira-se do resultado da simulação de cada cenário as informações de carregamento em veículos equivalentes (veh) e a capacidade para cada *link* e a extensão deles. Após isso, o valor do veh é dividido pela capacidade para obter a saturação daquele *link*, conforme a fórmula a seguir:

$$\text{Satur}_i = \frac{\text{veh}_i}{\text{capacidade}_i}$$

Em que:

veh_i é o carregamento do *link* em veículos equivalentes e $capacidade_i$ é a capacidade (também em veículos equivalentes) daquele *link*.

Para obter o valor final calcula-se a média ponderada da saturação pela extensão dos links. Segue fórmula abaixo:

$$\text{Saturação Ferroviária} = \frac{(\sum_1^n \text{Satur}_i \times \sum_1^n \text{Ext}_i)}{\sum_1^n \text{Ext}_i}$$

Em que:

Satur_i é a saturação do link e Ext_i é a extensão do link.

4.1.2.5. Cidades conectadas à malha ferroviária

Para cálculo desse indicador, são utilizadas ferramentas de estatística espacial. É realizada a análise de quais pátios de transbordo de carga são operacionais para cada cenário. Com essa lista, é feita uma análise de *buffer*, em que os municípios em um raio de 100 km são considerados atendidos. Esse *buffer* é feito utilizando as funcionalidades do PostGIS, especificamente a função *ST_DWithin*. Com essa lista, é possível retirar as duplicidades, pois um mesmo município pode ser atendido por mais de um pátio, e obter a lista final de cidades conectadas.

4.1.2.6. Municípios atendidos pelo modo ferroviário ponderado pelo PIB

Como continuação do indicador acima, são extraídas dos dados do IBGE as informações de PIB de cada município. Com esse número é feita uma média, dividindo o número de cidades conectadas pelo PIB somado delas, conforme fórmula abaixo:

$$\frac{\sum \text{Mun}_i}{\sum \text{PIB}_i}$$

Em que:

Mun_i é o número de municípios e PIB_i é o PIB deles.

Velocidade média comercial

A velocidade calculada é a resultante dos tempos de simulação do *software* utilizado (VISUM) e que pode ser encontrada na seção 3.2 e nos relatórios referentes aos parâmetros de simulação. Para uma avaliação desse indicador, foi utilizado nos planos setoriais o valor retirado de tempos da simulação (em segundos/quilômetro) e seu inverso, utilizado para cálculo da velocidade.

4.1.2.7. Participação na matriz de emissões de carbono

O valor das emissões em Gg de CO₂ equivalente do modo ferroviário é dividido pela soma das emissões de todos os modos, conforme fórmula abaixo:

4.1.3. Resultados Diretos

4.1.3.1. Quantidade total de cargas transportadas

Nesse indicador, são somados os valores de carregamento dos *links* ferroviários em toneladas para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Toneladas carregadas pelos links ferroviários}$$

4.1.3.2. Produção de transporte em TKU

Nesse indicador, são somados os valores de carregamento dos *links* ferroviários em TKU para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{TKU carregado pelos links ferroviários}$$

4.1.3.3. Produção de transporte em VKU

Nesse indicador, são somados os valores de carregamento dos *links* ferroviários em VKU para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{VKU carregado pelos links ferroviários}$$

4.1.3.4. Emissões de CO₂

Nesse indicador, são somados os valores de emissões em Gg de CO₂ equivalente dos *links* ferroviários para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Emissões dos links ferroviários}$$

4.1.3.5. Quantidade de carga transportada por ferrovia

Para esse indicador, são divididos os carregamentos de TKU para cada ferrovia mapeada (entre existentes e planejadas) para os planos setoriais em cada cenário.

4.1.3.6. Quantidade total de cargas transportadas por grupo de carga

Para esse indicador, são divididos os carregamentos de TKU para cada um dos grupos de carga considerados: CGC, CGNC, GSA, GL, GSM, OGSM.

4.1.4. Resultados Indiretos

4.1.4.1. Extensão total da malha ferroviária brasileira economicamente utilizada

Para esse indicador é feita uma análise de carregamento no cenário com o propósito de identificar quais trechos ferroviários são utilizados. Essa diferenciação com relação à extensão da malha operacional é importante pois nem todo trecho que é ativado em um cenário tem carregamento. São somadas as extensões dos links que tiveram carregamento maior que 0, obtendo-se a extensão total da malha, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Ext_Carr}$$

Em que:

Ext_Carr é a extensão dos links com carregamento maior do que 0.

4.1.4.2. Número de municípios atendidos pelo modo ferroviário

Para o cálculo desse indicador, são utilizadas ferramentas de estatística espacial. É uma análise de quais pátios de transbordo de carga são operacionais para cada cenário. Com essa lista, é feita uma análise de *buffer* onde os municípios em um raio de 100 km são considerados atendidos. O *buffer* é feito utilizando as funcionalidades do PostGIS, especificamente a função *ST_DWithin*. Com essa lista, é possível retirar as duplicidades, pois um mesmo município pode ser atendido por mais de um pátio, e obter a lista final de municípios atendidos.

4.1.4.3. Municípios atendidos pelo modo ferroviário ponderado pelo PIB

Como continuação do indicador acima, são extraídas dos dados do IBGE as informações de PIB de cada município. Com esse número é feita uma média, dividindo o número de cidades conectadas pelo PIB somado delas, conforme fórmula abaixo:

$$\frac{\sum \text{Mun}_i}{\sum \text{PIB}_i}$$

Em que:

Mun_i é o número de municípios e PIB_i é o PIB deles.

4.1.4.4. Impacto do investimento sobre o PIB

Os resultados da modelagem econômica dos empreendimentos são consolidados e é feita uma análise de impacto no PIB do país, levando em considerações análises econométricas e sociais.

4.1.5. Ambiente

4.1.5.1. Investimento

O indicador é resultado da modelagem econômica dos empreendimentos. Como resultado da modelagem econômica, são consolidados o valor de CAPEX e OPEX de cada empreendimento em cada cenário.

Compara-se o valor bruto dos investimentos dos empreendimentos ferroviários, somando-os conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{CAPEX}_i + \text{OPEX}_i$$

Em que:

CAPEX_i é o valor de investimento em implantação e ampliação dos empreendimentos e OPEX_i é o valor de investimento em operação, manutenção e conservação dos empreendimentos.

4.2. Rodoviário

4.2.1. Componentes

4.2.1.1. Extensão total da malha rodoviária brasileira

Para esse indicador, são somadas as extensões de todos os *links* rodoviários presentes na rede de simulação, exceto aqueles marcados como urbanos, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Extensão dos links Rurais}$$

4.2.1.2. Extensão total da malha rodoviária brasileira por tipo de pista

A divisão do tipo de pista é baseada na rede de simulação e nos seus respectivos *linktypes*. Para estes também são retirados os *links* urbanos, são considerados os seguintes: rodovia simples, acessos rodoviários, balsa, rodovia duplicada, rodovia com terceira faixa, rodovia de baixa capacidade (secundárias e sem pavimentação), planejadas SNV, rodovias planejadas, rodovias não pavimentadas (baixíssima capacidade).

Para esse indicador, são somadas as extensões de cada *link*. Para cenários futuros, um dos impactos possíveis de ações rodoviárias é a alteração do *linktype*, é possível a comparação com cada um desses tipos de pista para cada cenário. Segue abaixo equação:

$$\sum \text{Ext_linktype}_i$$

Em que:

Ext_linktype_i é a extensão dos *links* que fazem parte do *linktype*.

4.2.1.3. Extensão total da malha rodoviária brasileira por UF

Esse indicador agrupa as extensões rodoviárias para cada UF. Considerando todos os tipos de pista e excluindo os *links* considerados urbanos. Segue equação:

$$\sum \text{Ext_UF}_i$$

Em que:

Ext_UF_i é a extensão dos *links* de cada Unidade da Federação

4.2.1.4. Extensão por qualidade de pavimento

Para esse indicador, são agrupados os *links* para cada qualidade do pavimento (ruim, regular e boa) e somadas as extensões correspondentes. Para cenários futuros, um dos impactos mapeados de ações é a alteração da qualidade do pavimento, é possível comparar cenários para compreender se houve ou não melhoria. Segue abaixo a equação:

$$\sum Ext_Qualidade_i$$

Em que:

$Ext_Qualidade_i$ é a extensão correspondente a cada classificação de qualidade de pavimento

4.2.2. Propriedades

4.2.2.1. Participação do modo rodoviário na matriz de transporte de TKU

O cálculo desse indicador consiste na divisão do carregamento em TKU do setor rodoviário pelo TKU total do sistema, conforme equação abaixo:

$$\frac{\sum \text{TKU dos Links Rodoviários}}{\sum \text{TKU Total}}$$

Em que:

TKU Total é a soma do carregamento em TKU de todos os setores (cabotagem, hidroviário, rodoviário, ferroviário, aeroviário, dutoviário e longo curso)

4.2.2.2. Participação do modo rodoviário na matriz de transporte de VKU

O cálculo desse indicador consiste na divisão do carregamento em VKU do setor rodoviário pelo VKU total do sistema, conforme equação abaixo:

$$\frac{\sum \text{VKU dos Links Rodoviários}}{\sum \text{VKU Total}}$$

Em que:

VKU Total é a soma do carregamento em VKU de todos os setores (cabotagem, hidroviário, rodoviário, ferroviário, aeroviário, dutoviário e longo curso)

Participação do modo rodoviário na matriz de transporte de RPK

O cálculo desse indicador consiste na divisão do carregamento em RPK do setor rodoviário pelo RPK total do sistema, conforme equação abaixo:

$$\frac{\sum \text{RPK dos Links Rodoviários}}{\sum \text{RPK Total}}$$

Em que:

RPK Total é a soma do carregamento em RPK de todos os setores (cabotagem, hidroviário, rodoviário, ferroviário, aeroviário, dutoviário e longo curso)

Custo total por unidade de transporte movimentada

O indicador mensura o custo médio de movimentação de um TKU de carga para o modo rodoviário. O total é dividido pela movimentação em TKU, obtendo um valor em R\$/TKU. Segue abaixo a fórmula:

$$\frac{\sum \text{Custo dos links rodoviários}}{\sum \text{TKU dos links rodoviários}}$$

4.2.2.3. Representatividade do PIB dos municípios atendidos pelo modo rodoviário

Esse indicador busca entender qual a porcentagem do PIB nacional é atendida pelo modo rodoviário. São somados os PIBs de todos os municípios atendidos pelo modo rodoviário, a soma é dividida pelo PIB de todos os municípios do país, conforme a equação abaixo:

$$\frac{\sum \text{PIB dos municípios atendidos pelo modo rodoviário}}{\sum \text{PIB de todos os municípios do país}}$$

4.2.2.4. Participação do modo rodoviário na matriz de emissões

Para esse indicador, o valor das emissões em Gg de CO₂ equivalente do modo rodoviário é dividido pela soma das emissões de todos os modos, conforme fórmula abaixo:

$$\frac{\text{Emissões Rodoviárias}}{\text{Emissões Totais}}$$

4.2.3. Resultados Diretos

4.2.3.1. Quantidade total de cargas transportadas

Nesse indicador, são somados os valores de carregamento dos *links* rodoviários em toneladas para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Toneladas carregadas pelos links rodoviários}$$

4.2.3.2. Produção de transporte em TKU

Nesse indicador, são somados os valores de carregamento dos *links* rodoviários em TKU para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{TKU carregado pelos links rodoviários}$$

4.2.3.3. Produção de transporte em VKU

Nesse indicador, são somados os valores de carregamento dos *links* rodoviários em VKU para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{VKU carregado pelos links rodoviários}$$

4.2.3.4. Emissões de CO₂ por unidade de transporte

Nesse indicador, são somados os valores de emissões em Gg de CO₂ equivalente dos *links* rodoviários para o cenário, conforme fórmula abaixo:

$$\sum \text{Emissões dos links rodoviários}$$

4.2.3.5. Quantidade total de cargas transportadas por grupo de carga

Para esse indicador, são divididos os carregamentos de TKU para cada um dos grupos de carga considerados, CGC, CGNC, GSA, GL, GSM, OGSM.

4.2.4. Resultados Indiretos

4.2.4.1. Extensão da malha rodoviária nacional duplicada

Nesse indicador, é filtrado o *linktype* “Rodovia Duplicada” e são somadas as extensões de todos os *links* classificados nesse tipo. Para cenários futuros, as ações que duplicam uma via são mapeadas e esses *links* são transformados nesse tipo. Dessa forma, obtém-se o valor da extensão de vias duplicadas, conforme equação abaixo:

$$\sum \text{Ext_Dup}$$

Em que:

Ext_Dup é a extensão dos *links* em que o *linktype* é “Rodovia Duplicada”

4.2.4.2. Extensão da malha rodoviária nacional pavimentada

Nesse indicador, é filtrado o *linktype* “Rodovia Duplicada” e são somadas as extensões de todos os *links* classificados com esse tipo. Para cenários futuros, as ações que duplicam uma via são mapeadas e esses *links* são transformados para esse tipo. Dessa forma, obtém-se o valor da extensão de vias duplicadas, conforme equação abaixo:

$$\sum \text{Ext_Dup}$$

Em que:

Ext_Dup é a extensão dos *links* em que o *linktype* é “Rodovia Duplicada”

4.2.5. Ambiente

4.2.5.1. Investimento

Esse indicador parte da consolidação da modelagem econômica, em que são estimados os valores de investimento para cada empreendimento do setor rodoviário em cada cenário. As premissas e metodologias dessa modelagem podem ser encontradas em relatório específico.

Para obtermos o valor desse indicador, são somados os valores de CAPEX e OPEX dos empreendimentos rodoviários para aquele cenário, conforme equação abaixo:

$$\sum \text{CAPEX}_i + \text{OPEX}_i$$

Em que:

CAPEX_i é o valor de investimento em implantação e ampliação dos empreendimentos e OPEX_i é o valor de investimento em operação, manutenção e conservação dos empreendimentos.

4.2.5.2. Investimento privado no setor

Esse indicador parte da consolidação da modelagem econômica, em que são estimados os valores de investimento para cada empreendimento do setor rodoviário em cada cenário. Para obtermos o valor desse indicador, são somados os valores de CAPEX e OPEX dos empreendimentos rodoviários que já têm financiamento do setor privado, conforme equação abaixo:

$$\sum \text{CAPEX}_i + \text{OPEX}_i$$

Em que:

CAPEX_i é o valor de investimento em implantação e ampliação dos empreendimentos e OPEX_i é o valor de investimento em operação, manutenção e conservação dos empreendimentos.

4.3. Limitações e Melhorias

Para os indicadores setoriais, uma série de números são possíveis de serem retirados do modelo. No entanto, para muitos dos cálculos são utilizados métodos similares, diminuindo a variação de análises. Uma mudança que pode ser realizada é a combinação desses cálculos com mais elementos da base de dados cadastral utilizada no plano.

Outra possível melhoria é a inclusão de mais análises espaciais, tendo em vista que todos os setores e todas as ações têm algum tipo de mapeamento geográfico. A inclusão dos indicadores ambientais presentes no Caderno Ambiental do PNL 2035 é um passo nessa direção e deve ser implementado para o próximo ciclo. Pode-se também desenvolver novos modelos estatísticos ou probabilísticos para realizar

análises específicas. Tendo o indicador de segurança rodoviária como base, um próximo passo seria a realização de modelo similar para outros modos.

A análise de indicadores setoriais é feita de diversas contribuições e está em constante aprimoramento, o conteúdo desse relatório reflete uma fotografia do momento em que foi escrito. Serão produzidas edições atualizadas, demonstrando evoluções e limitações encontradas.

4.4. Índice de Benefícios Generalizados

O índice de Benefícios Generalizado tem como objetivo avaliar os principais efeitos da ação sobre o sistema de transportes. Esse índice avalia impactos mais abrangentes, atendimento às boas práticas internacionais e recomendações de órgãos de controle e instituições de financiamento. Além disso, procura avaliar quais serão os efeitos positivos internos ao sistema de transporte, como ampliação da malha, os efeitos externos a ele, como o impacto no PIB e as emissões de CO₂ do sistema.

Após a composição dos objetivos do plano de transporte é necessário criar uma métrica para avaliar de forma quantitativa como cada ação proposta no plano contribui para que o objetivo seja de fato alcançado ao final de sua implementação. Dessa forma, foram propostos indicadores para quantificar os objetivos de cada um dos setores. O Quadro 1 apresenta os elementos medidos pelos indicadores.

Quadro 1 – Elementos afetados pelos objetivos dos planos setoriais

| Elemento / Indicador específico | Definição |
|--|--|
| Desenvolvimento econômico local | Evolução ou progresso medido a partir de variáveis qualitativas e quantitativas ligadas a aspectos culturais, sociais, históricos, econômicos, para um dado intervalo de tempo, a depender do recorte territorial adotado no estudo (município, estado, região, país). |
| Integração/Intercâmbio | Existência de canais (infraestrutura e serviços) para intercâmbio facilitado de pessoas e mercadorias entre duas regiões. |
| Desenvolvimento da Infraestrutura | Variação no nível de oferta de algum elemento da infraestrutura em um determinado espaço de tempo. |
| Capacidade | É a quantidade máxima de veículos de transporte que o sistema comporta. CEFTRU (2006) |
| Acessibilidade | Facilidade de acesso entre as origens e destinos dos desejos de viagem. |

| | |
|-------------------------------|---|
| Eficiência operacional | Eficiência é a otimização de recursos para alcance dos resultados esperados maximizando resultados e/ou minimizando recursos(FULGENCIO, 2007). |
| Segurança | A segurança compreende a prestação dos serviços isenta de riscos para usuários e terceiros. (GOMIDE et al., 2006.) |
| Sustentabilidade | É o conjunto de práticas econômicas, financeiras e administrativas que visam o desenvolvimento econômico de um país ou empresa, preservando o meio ambiente e garantindo a manutenção dos recursos naturais para as futuras gerações. |

4.4.1. Indicador Desenvolvimento Econômico Local

O indicador de desenvolvimento econômico local mensura o impacto marginal de um empreendimento no atendimento às necessidades econômicas e sociais do país. Nesse sentido, escolheu-se o investimento em CAPEX necessário para o empreendimento, dividido pela a média ponderada do Produto Interno Bruto (PIB) dos municípios que ele intercepta, o fator de ponderação é a extensão do empreendimento que está abarcada em cada um dos municípios.

Assim a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a formulação matemática utilizada.

Equação 20 – Equação de impacto do PIB devido a investimentos em infraestrutura

$$\beta_{1j} = \frac{CAPEX_j}{\sum \left(\frac{\text{Extensão do empreendimento em } i}{\text{Extensão total do empreendimento}} \times PIB_{\text{município } i} \right)}$$

Em que:

- β_{1j} é o valor do indicador de desenvolvimento econômico local do empreendimento j;
- $CAPEX_j$ é o valor investido em CAPEX no empreendimento j;
- $\sum \left(\frac{\text{Extensão do empreendimento em } i}{\text{Extensão total do empreendimento}} \times PIB_{\text{município } i} \right)$ é a média dos PIBs dos municípios pelos quais o empreendimento j passa, ponderados pela parcela da extensão do empreendimento que está em cada município.

Apesar de consistente, o indicador pode ser aprimorado, já que o PIB é apenas uma métrica de desenvolvimento socioeconômico. Vickerman (2008) propõe que seja feita uma análise dos empregos criados em relação ao desemprego municipal, indicando que a geração de empregos pode ser uma *proxy* relevante do desenvolvimento econômico local. Outra possível melhoria é a criação de um modelo que

analisa os impactos no Índice de GINI, que mede a concentração de renda, de investimentos em transportes.

A literatura aponta alguns efeitos diretos de melhorias de transporte na sociedade, dentre tais efeitos pode-se destacar a redução de custos de transportes e do tempo de viagem. Essas métricas podem se traduzir, indiretamente, em maior facilidade de acesso da população a serviços básicos, como saúde e educação (PIENAAR, 2018). A metodologia proposta neste plano setorial procura mensurar tais fatores em outros indicadores, contudo, tais aspectos da literatura são importantes para o aprimoramento da cesta de indicadores e das fórmulas de cálculo de desses indicadores nos próximos ciclos de planejamento.

4.4.2. Indicador Integração

O indicador de Integração mensura quanto um empreendimento contribui para a integração nacional dos municípios. Essa variável é medida por meio de aplicações do método de sintaxe espacial em nível nacional, proposto por Rodrigues e Silva e de Holanda (2019). A partir da aplicação do método de sintaxe espacial em nível nacional, cada município obtém um valor de integração nacional, relativo à facilidade de deslocamento para qualquer outro município do país, dado um ano base. Calcula-se também um valor provável adicional de integração nos municípios entre o ano base e o horizonte do projeto para qualquer ação topológica no local, como caracterizado na Tabela 3.

Tabela 3 - Integração acrescida nos municípios entre o ano base e o horizonte de projeto

| | |
|--|--------|
| Integração média acrescida 2017-2035 ($I_{2017-2035}$) | 0.3834 |
|--|--------|

O indicador atribui maior valor a ações que afetem municípios com piores índices de integração sejam priorizadas. Para isso, os valores de integração de cada município são normalizados de forma que o município com maior integração receba o valor zero e o de menor integração receba o valor 1. A Equação 21 apresenta a formulação descrita.

Equação 21 – Normalização invertida da integração municipal

$$\text{Integração normalizada}_i = \frac{\text{MAX}(\text{Integração municipal}_i) - \text{Integração municipal}_i}{\text{MAX}(\text{Integração municipal}_i) - \text{MIN}(\text{Integração municipal}_i)}$$

Em que:

- Integração normalizada_i é o valor da integração normalizado variando de 0 a 1, no qual 0 seria o município de maior integração e 1 o de menor;
- Integração municipal_i é o valor da integração municipal para o município i.

Após a normalização, é realizada uma verificação topológica de quais municípios são afetados diretamente pela ação. Caso a ação seja de natureza linear, a verificação realizada é de intersecção, ou seja, engloba-se todos os municípios que possuam trechos da ação em seu interior. Para ações pontuais, são feitas duas análises topológicas para aferição da influência da ação: verifica-se se o limite municipal

contém o ponto da obra, caso não contenha, como em plataformas *offshore*, é realizada uma análise de proximidade, verificando qual o município mais próximo da ação.

Montada a lista de ações relacionadas aos municípios, a quantidade de ações em cada município é contabilizada e seu valor é multiplicado pelo valor médio, apresentado na Tabela 3. O resultado representa o percentual de acréscimo de integração total do município ao final do período de análise. O indicador apresenta o cálculo do valor de integração de cada município após a execução de todas as ações.

Equação 22 – Cálculo do índice de integração provável do município no período de análise

$$\text{Integração municipal}_{\text{ano de projeto}} = \text{Integração municipal}_i * \left(1 + \sum \text{empreendimentos}_i \times I_{2017-2035}\right)$$

Em que:

- Integração municipal_{ano de projeto} é o valor projetado da integração do município i para o ano de análise do projeto;
- empreendimentos_i é o número de empreendimentos que afetam o município i.

Para a análise priorizada de empreendimentos, a variação da integração municipal é calculada e multiplicada pelo valor normalizado, conforme mostrado na Equação 23.

Equação 23 – Variação da integração ponderada

$$\Delta \text{Integração}_{\text{pondo}} = \text{Integração municipal}_{\text{ano de projeto}} \times \text{Integração normalizada}$$

Em que:

- $\Delta \text{Integração}_{\text{pondo}}$ é a variação da integração do município i ponderada por sua normalização.

Por fim, a priorização dos empreendimentos é realizada pela soma de todas as integrações ponderadas dos municípios afetados por ele, conforme apresentado na Equação 24.

Equação 24 – Indicador de integração

$$\beta_{2j} = \sum \Delta \text{Integração}_{\text{pond}}$$

Em que:

- β_{2j} é o valor do indicador de integração para o empreendimento j.

O valor do ano base considera a rede de transportes brasileira de 2017. Ressalta-se a importância da atualização do ano base para a melhor representação da situação atual do sistema de transportes e dos municípios. A priorização não considera todas as possíveis relações topológicas de integração, pois melhorar a conexão de um município de baixa integração com um município de alta integração deveria resultar em uma variação da integração maior que a melhoria da conexão entre dois municípios de baixa integração.

Dentre as limitações metodológicas, ressalta-se que seria possível calcular esse indicador pelos resultados do modelo de simulação: a partir dos dados de rotas extraídos do modelo de simulação, é possível avaliar se a execução de um

empreendimento seria capaz de atrair um maior número de rotas para essa infraestrutura, aumentando, desse modo, a integração.

4.4.3. Indicador Capacidade

O indicador de capacidade mede o máximo de produção que um sistema é capaz de ofertar, em situações ideais. Para um sistema de transportes, a métrica de capacidade pode ser estabelecida a partir da quantidade que ele é capaz de transportar, em toneladas úteis (TU), em toneladas por quilômetro útil (TKU) ou em veículos equivalentes.

Os estudos de capacidade viária estão comumente ligados a um nível de serviço das infraestruturas. Quanto mais perto da capacidade máxima o elemento analisado opera, pior costuma ser o nível de serviço ofertado pela infraestrutura. Ainda, entende-se que, para infraestruturas que atualmente possuem movimentações muito baixas, o crescimento da movimentação representa um acréscimo na capacidade, não necessariamente refletido em um estado de queda da qualidade do serviço. Os itens a seguir apresentam os métodos de cálculo para cada setor estudado.

Cada uma das formulações apresentadas possui melhorias específicas debatidas individualmente para auxiliar na decisão governamental de investimentos. Entretanto, a análise de capacidade e, por consequência, nível de serviço envolve o entendimento de fenômenos multimodais. Assim, o indicador de capacidade avalia não o nível de serviço de uma infraestrutura específica afetada pelo empreendimento, mas o nível de serviço de todas as infraestruturas utilizadas nas rotas de produtos e pessoas que passam pelo elemento trabalhado.

4.4.3.1. Ferroviário

O indicador de capacidade ferroviária procura avaliar o aumento de capacidade do sistema. O setor ferroviário possui um modelo de capacidade complexo, já que as formulações não dependem apenas de características da via ou da composição do tráfego, mas de acordos entre atores e quantidade de frota de veículos por subsistema de análise.

Assim, tentativas de estimação de aumento de capacidade ou de nível de serviço por meio da interpretação de impactos poderiam levar a conclusões incompletas. Como forma de mitigar esse impasse, mantendo o entendimento do indicador, avalia-se a quantidade movimentada na infraestrutura afetada. A Equação 25 apresenta a formulação matemática proposta.

Equação 25 – Indicador de capacidade ferroviária

$$\beta_{5j} = \sum_{i=1}^n \text{TKU}_i$$

Em que:

- β_{5j} é o indicador de capacidade ferroviária, em TKU;

- TKU_i é a medida de produção da infraestrutura i , sendo dada como o produto da tonelada útil movimentada pela extensão da infraestrutura i ;
- n é a quantidade de infraestruturas afetadas pelo empreendimento j .

Importante tomar nota que modelos de capacidade ferroviária mais robustos estão em etapa de desenvolvimento. Quando concluídos e validados, será possível uma análise mais assertiva do nível de serviços desse setor.

4.4.3.2. Rodoviário

A avaliação da capacidade para o setor rodoviário foi baseada no Manual Técnico do DNIT (2006). Foram realizados ajustes para adaptação dos modelos utilizados na simulação dos cenários. A Tabela 4 apresenta as capacidades adotadas para cada tipo de pista, em veículos equivalentes por hora.

Tabela 4 - Capacidades por tipo de pista

| Tipo de pista | Capacidade (veh/h) |
|---------------------------|--------------------|
| Pista baixa capacidade | 1000 |
| Pista Simples | 1500 |
| Pista com Faixa adicional | 2250 |
| Pista Dupla | 3000 |

Para o cálculo do indicador de capacidade rodoviária é avaliada a variação da capacidade acrescentada pelo empreendimento ponderada pela sua extensão, como mostrado na Equação 26. O indicador mensura o quanto de capacidade foi acrescida no sistema, em veículos equivalentes quilometro.

Equação 26 – Indicador de capacidade rodoviária

$$\beta_{5j} = \sum_{i=1}^n \left(\text{capacidade}_{i_{\text{ano de projeto}}} - \text{capacidade}_{i_{\text{data base}}} \right) \times L_i$$

Em que:

- β_{5j} é o indicador de capacidade rodoviária para o empreendimento j , em veh.km;
- $\text{capacidade}_{i_{\text{ano de projeto}}}$ é a capacidade do elemento i rodoviário após os impactos do empreendimento j no ano de projeto;
- $\text{capacidade}_{i_{\text{data base}}}$ é a capacidade do elemento i rodoviário na data base;
- L_i é a extensão do elemento i rodoviário;
- n é a quantidade de elementos rodoviários afetados pelo empreendimento j .

O indicador avalia o aumento absoluto da capacidade do sistema de transportes rodoviário. Uma análise adicional que pode ser feita é o cálculo do nível de serviço após o término dos empreendimentos. Como os dados dispostos são anualizados, seria necessário realizar tratamento de dados oriundos da simulação para efetivamente utilizar essa métrica.

4.4.4. Indicador Acessibilidade

4.4.4.1. O indicador de acessibilidade mensura a facilidade de acesso entre origens e destinos de viagem por meio da variável tempo. Ferroviário/Rodoviário

O indicador calculado para os setores rodoviário e ferroviário utiliza a variação do tempo, dado os impactos do empreendimento na infraestrutura. A proposta é avaliar o tempo estimado com o empreendimento e comparar a um cenário sem alterações na rede.

Avalia-se o tempo médio para se percorrer um quilômetro na infraestrutura impactada pelo empreendimento no “Cenário Contrafactual”. Em seguida, realiza-se a avaliação para o cenário de análise, com o novo empreendimento. O cálculo do indicador se dá pela diferença percentual entre o valor de análise e o valor de referência, como mostra a equação a seguir:

$$\beta_{\text{acessibilidade}} = \frac{T_{\text{cenário contrafactual}} - T_{\text{cenário análise}}}{T_{\text{cenário contrafactual}}}$$

Em que:

$\beta_{\text{acessibilidade}}$ é o valor de acessibilidade do empreendimento;

$T_{\text{cenário contrafactual}}$ é o valor do tempo necessário para se percorrer 1 km no cenário contrafactual, em s/km;

$T_{\text{cenário análise}}$ é o valor do tempo necessário para se percorrer 1 km no cenário de análise, em s/km.

4.4.5. Indicador Eficiência Operacional

O indicador de eficiência operacional mensura o quanto a execução de um empreendimento contribui para o uso eficiente de recursos, como tempo e dinheiro, no sistema de transportes brasileiro. Avalia-se, desse modo, a redução de custos proporcional a carga de cada cenário em relação ao cenário contrafactual, no qual não são realizadas obras.

O indicador mede quantos reais (R\$) foram poupados em média, dado o quanto uma infraestrutura afetada movimentada. Cabe notar que, apesar de trazer uma estimativa da redução de custos, ele ainda resulta em uma média geral do sistema. Como forma de aprimorar o cálculo, seria adequado analisar os pares origem - destino que passam pela infraestrutura antes e depois dela ser afetada. Assim, seria possível avaliar a alteração do custo médio dessas rotas.

4.4.5.1. Rodoviário

Para o setor rodoviário são examinados os custos de transportes de cargas e pessoas no cenário de análise. A redução de custos nesse setor se dá por dois fatores: a melhora da qualidade da pista e ampliação de capacidade. A primeira etapa do cálculo consiste no filtro dos *links* rodoviários e a classificação de cada

um deles em uma escala de capacidade. Desse modo, as vias são agrupadas em escalas de capacidade como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Escalas de capacidade rodoviária

| Escala | Descrição |
|--------|--|
| 0 | Rodovias planejadas |
| 1 | Balsas |
| 2 | Pista simples Pistas urbanas Acessos Pistas de baixa capacidade |
| 3 | Pista com faixa adicional rural |
| 4 | Pistas duplas rural |

Em paralelo, são retiradas as movimentações para o cenário avaliado em TKU e RPK, além do custo associado a cada *link*. Depois de classificados soma-se as movimentações de cada escala de capacidade, como mostra a Equação 27.

Equação 27 – Custo médio rodoviário por classe de capacidade

$$CMT_{\text{rodoviário}_{m_e}} = \frac{\sum CT_{m_e}}{\sum \text{Movimentação}_{m_e}}$$

Em que:

- $CMT_{\text{rodoviário}_{m_e}}$ é o custo médio de transporte rodoviário do tipo de matriz m para o cenário de análise na escala de capacidade e ;
- m é o tipo de matriz analisada, na qual é utilizado o subíndice “p” para passageiros e “c” para cargas;
- e é a escala de capacidade descrita na Tabela 5;
- CT_{m_e} é o custo de transporte do tipo de matriz m na escala de capacidade e , em reais;
- $\text{Movimentação}_{m_e}$ é a movimentação do tipo de matriz m na escala de capacidade e , em tku para cargas e em rpk (revenue passenger kilometer ou passageiro pagante por quilometro) para pessoas;

Em seguida, as classes são divididas em dois grupos para uma primeira conferência de cálculo, conforme tabela 7 abaixo:

Tabela 7 – Grupo de escala de capacidade rodoviária

| Escala | Grupo de Escala de Capacidade |
|--------|-------------------------------|
| 1 | A |
| 2 | A |

| | |
|---|---|
| 3 | B |
| 4 | B |

Da mesma forma que foi feito para as escalas de capacidade, o agrupamento para os dois grupos é feito somando-se as movimentações e os custos para cada um dos componentes. Nessa etapa são somadas apenas as movimentações dos *links* do tipo de matriz de cargas, como mostra a equação 20.

Equação 20 – Custo médio rodoviário por grupo de escala de capacidade

$$CMT_{\text{rodoviário}_g} = \frac{\sum CT_g}{\sum \text{Movimentação}_g}$$

Em que:

- $CMT_{\text{rodoviário}_g}$ é o custo médio de transporte rodoviário de cargas para o cenário de análise no grupo de escala g ;
- g é o grupo de ajuste descrito na tabela 7;
- CT_g é o custo de transporte de cargas no grupo de escala g , em reais;
- Movimentação_g é a movimentação de cargas no grupo de escala g , em tku;

Com os valores de $CMT_{\text{rodoviário}_{m_e}}$ e $CMT_{\text{rodoviário}_g}$ são calculados dois multiplicadores de ajustes: o Multiplicador₁, utilizando o custo médio dos grupos de escala e o Multiplicador₂, utilizando o custo médio das escalas de capacidade. Os multiplicadores também levam em consideração os serviços do empreendimento, para cada multiplicador temos um fator de custo poupado que é considerado no cálculo. Os serviços e seus fatores são agrupados conforme a tabela 8.

Tabela 8 – Grupo de Serviço

| Serviços | Grupo de Serviço | Fator de Custo Poupado |
|---|------------------|------------------------|
| Implantação, Construção, Adequação ou Ampliação | X | 1 |
| Manutenção ou Conservação | Y | 0,04 |

Com isso, temos as equações que calculam os multiplicadores. Seguem abaixo:

Equação 21 – Multiplicador 1 (Grupos de Escala de Capacidade)

$$\text{Multiplicador}_1 = (CMT_{\text{rodoviário}_a} - CMT_{\text{rodoviário}_b}) \times \text{Fator}_s$$

Em que:

- Multiplicador₁ é o multiplicador de ajuste baseado nos grupos de escala de capacidade;

- $CMT_{rodoviário_a}$ é o custo médio de transporte rodoviário de cargas para o cenário de análise no grupo de escala a;
- $CMT_{rodoviário_b}$ é o custo médio de transporte rodoviário de cargas para o cenário de análise no grupo de escala b;
- $Fator_s$ é o fator de custo poupado para os serviços.

Equação 21 – Multiplicador 2 (Escala de Capacidade)

$$\text{Multiplicador}_2 = (CMT_{rodoviário_3} - CMT_{rodoviário_4}) \times Fator_s$$

Em que:

- Multiplicador_2 é o multiplicador de ajuste baseado nas escalas de capacidade;
- $CMT_{rodoviário_3}$ é o custo médio de transporte rodoviário de pessoas para o cenário de análise na escala 3;
- $CMT_{rodoviário_4}$ é o custo médio de transporte rodoviário de pessoas para o cenário de análise na escala 4;
- $Fator_s$ é o fator de custo poupado para os serviços;

Após o cálculo dos multiplicadores, a análise passa a ser feita por empreendimento. Cada empreendimento é associado a um ou mais *links*, assim, é possível obter o carregamento de cada empreendimento em cada cenário. Para a análise de custos, é necessário identificar o TKU e RPK acrescido no cenário em comparação ao cenário contrafactual, nos *links* afetados pelo empreendimento. Além disso, os empreendimentos estão atrelados a seus serviços componentes, dessa forma, pode-se relacionar os multiplicadores a cada empreendimento. A equação 22 detalha o cálculo do TKU ou RPK acrescido de cada empreendimento:

Equação 22 – Carregamento acrescido pelo empreendimento

$$\text{Carregamento Acrescido}_{i_m} = \sum \text{Movimentação}_{m_e} - \sum \text{Movimentação}_{m_c}$$

Em que:

- $\text{Carregamento Acrescido}_{i_m}$ é o carregamento acrescido pelo empreendimento i na matriz m, sendo TKU para cargas e RPK para pessoas;
- $\text{Movimentação}_{m_c}$ é a movimentação na matriz m, sendo TKU para cargas e RPK para pessoas no cenário contrafactual;
- $\text{Movimentação}_{m_e}$ é a movimentação na matriz m, sendo TKU para cargas e RPK para pessoas no cenário analisado;

Após a retirada desse valor, relaciona-se o serviço do empreendimento com os multiplicadores associados a cada serviço calculados anteriormente. O valor final do indicador de eficiência operacional é obtido para o setor rodoviário por meio da seguinte equação:

Equação 23 – Equação de custo poupado em reais para a infraestrutura

$$\beta_{7j} = \left(\text{Carregamento Acrescido}_{j_{tku}} * \text{Multiplicador}_1 \right) + \left(\text{Carregamento Acrescido}_{j_{rpk}} * \text{Multiplicador}_2 \right)$$

Em que:

- β_{7j} é o indicador de eficiência operacional para o empreendimento j;
- Carregamento Acrescido_{j_{tku}} é o tku acrescido pelo empreendimento j em relação ao cenário contrafactual;
- Carregamento Acrescido_{j_{rpk}} é o rpk acrescido pelo empreendimento j em relação ao cenário contrafactual;
- Multiplicador₁ é o fator de custo poupado baseado nos grupos de escala de capacidade;
- Multiplicador₂ é o fator de custo poupado baseado nas escalas de capacidade;

4.4.5.2. Ferroviário

Para o setor Ferroviário, a metodologia de obtenção do indicador de eficiência operacional compara quanto do custo é poupado na migração de cargas do modo rodoviário para ele. Esse fator é obtido comparando o custo médio de cargas do cenário analisado do modo ferroviário com o modo rodoviário, conforme a equação 24 abaixo:

Equação 24 – Fator de custo poupado pelos modos ferroviário e hidroviário em relação

$$\text{Multiplicador}_{\text{ferroviário}} = \left(\left(\frac{\sum \text{Custo}_{\text{rodoviário}}}{\sum \text{TKU}_{\text{rodoviário}}} \right) - \left(\frac{\sum \text{Custo}_{\text{ferroviário}}}{\sum \text{TKU}_{\text{ferroviário}}} \right) \right) \div 1000$$

Em que:

- Multiplicador_{ferroviário} é o multiplicador de custo poupado pelo modo m em relação ao modo rodoviário;
- Custo_{rodoviário} é o custo total associado aos *links* rodoviários;
- TKU_{rodoviário} é o carregamento em TKU dos *links* rodoviários;
- Custo_{ferroviário} é o custo total associado aos *links* do modo ferroviário;
- TKU_{ferroviário} é o carregamento em TKU dos *links* do modo ferroviário;

Após a obtenção desse multiplicador, são calculados os carregamentos em TKU acrescidos pelo empreendimento com relação ao cenário contrafactual, conforme a equação 25.

Equação 25 – Carregamento acrescido pelo empreendimento

$$\text{Carregamento Acrescido}_i = \sum \text{Movimentação}_e - \sum \text{Movimentação}_c$$

Em que:

- Carregamento Acrescido_i é o carregamento acrescido pelo empreendimento i em tku;
- Movimentação_c é a movimentação em TKU no cenário contrafactual;
- Movimentação_e é a movimentação em TKU no cenário analisado;

Para a obtenção do indicador de eficiência operacional, multiplicamos o carregamento acrescentado pelo empreendimento pelo fator multiplicador, conforme a equação 26:

Equação 26 – Equação de custo poupado em reais para a infraestrutura

$$\beta_{7j} = (\text{Carregamento Acrescido}_i * \text{Multiplicador}_{\text{ferroviário}})$$

Em que:

- β_{7j} é o indicador de eficiência operacional para o empreendimento j;
- Carregamento Acrescido_i é o tku acrescido pelo empreendimento j em relação ao cenário contrafactual;
- Multiplicador_{ferroviário} é o fator de custo poupado pelo modo ferroviário em relação ao modo rodoviário.

Em que

4.4.6. Indicador Segurança

O indicador de segurança reflete a redução de acidentes viários do sistema de transportes brasileiro. O indicador não avalia a segurança contra danos ao patrimônio. Como as mortes em rodovias estão entre as maiores causas de fatalidade no país, a análise procura entender se esse tipo de causalidade é reduzido após os efeitos dos novos empreendimentos no sistema.

São realizados cálculos separados para diferentes setores. Para o setor rodoviário, utiliza-se o modelo probabilístico descrito no PNL, que leva em conta o tipo da via e o uso do solo. Para o setor ferroviário, é mensurado se o empreendimento reduz o número de veículos na rodovia, quanto maior a redução, maior o valor do indicador para esse empreendimento.

4.4.6.1. Rodoviário

Para o setor rodoviário é utilizado o mesmo modelo probabilístico utilizado no PNL 2035. O modelo avalia o tráfego da rodovia, se é predominantemente de pessoas ou de cargas, avalia também as características da via (seu uso do solo, tipo de superfície e composição do tráfego). Dessa forma, mensura-se a probabilidade de acontecer um acidente fatal. A Equação 28 apresenta a formulação do modelo proposto.

Equação 28 – Índice de acidentes

$$I_k = \frac{\text{veh}_k}{\text{extensão}_k} \times X_{\text{características da via}_k}$$

Em que:

- I é o índice de acidentes do segmento k;
- veh_k é a quantidade de veículos, de passeio ou de cargas, que utilizam o segmento k, em veículos equivalentes;
- extensão_k é a extensão do segmento k, em km;
- $X_{\text{características da via}_k}$ é o índice de acidentes que depende das características da via.

Após avaliado o índice para o cenário de análise, avalia-se também o índice para o mesmo segmento no cenário contrafactual. O indicador de segurança é dado pela subtração do índice no cenário contrafactual pelo índice no cenário de análise, como mostra a equação abaixo.

Equação 29 – Indicador de segurança rodoviário

$$\beta_{8j} = I_{\text{contrafactual}_j} - I_{\text{cenário análise}_j}$$

Em que:

- β_{8j} é o indicador de segurança rodoviário para o empreendimento j, adimensional;
- $I_{\text{contrafactual}j}$ é o índice de segurança do empreendimento j para o cenário contrafactual;
- $I_{\text{cenário análise}j}$ é o índice de segurança do empreendimento j para o cenário de análise;

4.4.6.2. Ferroviário

Para o setor ferroviário, o cálculo do indicador de segurança é dado pela variação de veículos equivalentes que utilizam a infraestrutura afetada no cenário de estudo em comparação com o cenário contrafactual. A Equação 30 apresenta a formulação matemática descrita.

Equação 30 – Indicador de segurança ferroviário

$$\beta_{8j} = M_{\text{cenário análise}} - M_{\text{cenário contrafactual}}$$

- β_{8j} é o indicador de segurança ferroviário para o empreendimento j, em veh;
- $M_{\text{cenário análise}}$ é a movimentação de cargas no cenário de análise que passa pelo empreendimento j, em veh;
- $M_{\text{cenário contrafactual}}$ é a movimentação de cargas no cenário contrafactual que passa pelo empreendimento j, em veh.

4.4.7. Indicador Sustentabilidade

O indicador de sustentabilidade procura medir os impactos ambientais dos empreendimentos. Em aderência ao PNL, o indicador mede a quantidade de CO₂ poupado pela implementação de cada empreendimento.

4.4.7.1. Rodoviário

Em geral, empreendimentos rodoviários resultam em um aumento da demanda reprimida por esse modo de transporte. Dessa forma, os empreendimentos rodoviários são ranqueados inversamente pela quantidade de gases de efeito estufa emitidos. Empreendimentos com maior potencial poluente ganham menos pontos que os que emitem potencialmente menos.

Dessa forma, o cálculo do indicador utiliza a movimentação em TKU por grupo de carga e avalia a emissão do empreendimento no cenário de análise.

Equação 31 – Indicador de sustentabilidade rodoviário

$$\beta_{\text{sustentabilidade}} = \text{Emissão média por TKU} \times \text{TKU}$$

Em que:

$\beta_{\text{sustentabilidade}}$ é o valor de sustentabilidade do empreendimento;

Emissão média por TKU é a quantidade de emissão de CO₂ emitida no empreendimento por tonelada quilômetro útil;

TKU é quantidade total de tonelada útil transportada por quilômetro no empreendimento.

4.4.7.1. Ferroviário

Para o setor ferroviário, é avaliado o aumento de movimentação em relação ao cenário contrafactual. Como o modo ferroviário é menos poluente que o rodoviário, a troca de modo é considerada positiva para o meio ambiente. O indicador é obtido pela movimentação de carga no empreendimento ferroviário em um dado cenário, multiplicado pelo fator de redução de emissão do modo rodoviário para o ferroviário, e a subtraindo desse valor, a movimentação de carga do empreendimento ferroviário em um cenário contrafactual, multiplicado pelo fator de redução de emissão do modo rodoviário para o ferroviário nesse cenário.

A subtração é feita porque, ainda que os empreendimentos ferroviários emitam menos CO₂ que os empreendimentos rodoviários, é necessário ponderar o empreendimento ferroviário comparado no próprio setor, premiando o indicador para os empreendimentos que reduzem a emissão do sistema. A equação abaixo apresenta a formulação matemática para o setor ferroviário.

Equação 32 – Indicador de sustentabilidade ferroviário

$$\beta_{9j} = \sum (M_{\text{cenário análise}} \times F_{\text{médio cenário análise}} - M_{\text{cenário contrafactual}} \times F_{\text{médio cenário contrafactual}})_k$$

Em que:

- β_{9j} é o indicador de sustentabilidade ferroviário para o empreendimento j, em tonelada de CO₂ poupado;
- $M_{\text{cenário análise}}$ é a movimentação de cargas que passa pelo empreendimento j, em ton;
- $F_{\text{médio cenário análise}}$ é o fator médio de redução de emissão do setor rodoviário para o setor ferroviário;
- $M_{\text{cenário contrafactual}}$ é a movimentação de cargas no cenário contrafactual que passa pelo empreendimento j, em ton;
- $F_{\text{médio cenário contrafactual}}$ é o fator médio de redução de emissão do setor rodoviário para o setor ferroviário no cenário de contrafactual.

5. Referências Bibliográficas

- Brasil. (1973) Lei 6.001, de 19 de dezembro de 1973. Obtido de [https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6001.htm#:~:text=Não haverá discriminação entre trabalhadores,a que pertencer o índio](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6001.htm#:~:text=Não%20haver%C3%A1%20discrimina%C3%A7%C3%A3o%20entre%20trabalhadores,a%20que%20pertencer%C3%A3o%20%C3%A0%20ind%C3%BAria%20ferrovi%C3%A1ria).
- Brasil. (2015) PORTARIA INTERMINISTERIAL No - 60, DE 24 DE MARÇO DE 2015. *Portaia*. Obtido de http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Portaria_Interministerial_60_de_24_de_marco_de_2015.pdf
- Carvalho, C. H. R. de. (2011) Emissões Relativas De Poluentes Do Transporte Motorizado De Passageiros Nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros. *Ipea*, 42. Obtido de http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf
- Conama. (2004) Resolução Conama n° 347/2004.
- CONAMA. (2010) Resolução CONAMA 428/2010. Obtido de https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=501

- CPRM. (2003) Mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais.
- DNIT. (2006) Manual de estudos de tráfego. *Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR*, 384.
- EPL-IEMA. (2019) Metodologia Epl-Iema Para Emissões De Gee E Poluentes Locais. Obtido de https://ontl.epl.gov.br/wp-content/uploads/2021/03/Metodologia-Emissoes_GEE.pdf
- EPL. (2021) PNL 2035 - Plano Nacional de Logística 2035. Obtido de <https://ontl.epl.gov.br/planejamento/relatorios/>
- EPL. (2022) Análise socioambiental dos cenários de desenvolvimento da infraestrutura.
- Fhwa. (2022) Freight Analysis Framework Commodity Flow Forecast Study (FAF Version 5): Final Forecasting Results., (November).
- JANSEN, D. C. (2011) Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas. *Encontro Nacional da Associação de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia*, 70. Obtido de https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/publicacoes/mapa-de-potencialidades-de-ocorrencia-de-cavernas-no-brasil/mapa_potencialidade_br_cecav_jun12.pdf
- Pienaar, W. J. (2018) Principles of social cost-benefit analysis of public road projects followed in South Africa. *South African Journal of Industrial Engineering*, 29(4), 129–140. doi:10.7166/29-4-1926
- Rodrigues E Silva, L., e de Holanda, F. (2019) Space syntax in a national scale: A case-study on inter-urban network transportation in Brazil. *12th International Space Syntax Symposium, SSS 2019*.
- Vickerman, R. (2008) Transit investment and economic development. *Research in Transportation Economics*, 23(1), 107–115. doi:10.1016/j.retrec.2008.10.007

