



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E  
GESTÃO TERRITORIAL

Victor Delegrego

**FUTURE PROOFING EM SISTEMAS DE TRANSPORTES: MODELO PARA  
AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO**

Florianópolis

2023



Victor Delegregó

**FUTURE PROOFING EM SISTEMAS DE TRANSPORTES: MODELO PARA  
AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Cristine do Nascimento Mutti,  
PhD

FLORIANÓPOLIS

2023

Delegregó, Víctor  
FUTURE PROOFING EM SISTEMAS DE TRANSPORTES : MODELO PARA  
AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO / Víctor Delegregó ;  
orientadora, Cristine do Nascimento Mutti, 2023.  
160 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis,  
2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. Future-  
Proofing. 3. resiliência. 4. transportes. 5. Nova Ferroeste. I.  
Mutti, Cristine do Nascimento. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes  
e Gestão Territorial. III. Título.

Victor Delegregó

**FUTURE PROOFING EM SISTEMAS DE TRANSPORTES: MODELO PARA  
AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 29 de junho de 2023,  
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Eduardo Lobo, Dr.  
UFSC

Prof.<sup>a</sup> Vivian da Silva Celestino Reginato, Dra.  
UFSC

Prof.<sup>a</sup> Lisiane Ilha Librelotto, Dra.  
UFSC

Eng. Alessandro Orsi, Ph.D  
Green Building Factory

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado  
adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão  
Territorial.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial  
(PPGTG-UFSC)

---

Prof.<sup>a</sup> Cristine do Nascimento Mutti, PhD  
Orientadora

Florianópolis, 2023.



## **AGRADECIMENTOS**

Essa dissertação de mestrado é o resultado de anos de estudos, pesquisa e dedicação. Acredito que não teria alcançado este objetivo sem o amor, apoio e encorajamento dos meus pais, Luis Gustavo e Stella, que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões e me ajudaram a enfrentar os desafios da vida. Gostaria de agradecer também ao meu irmão Henrique por sempre estar presente como irmão e amigo.

À minha orientadora Cristine do Nascimento Mutti, agradeço imensamente pelo incentivo, apoio e prontidão em ajudar em todos os momentos, me dando sempre a liberdade para conduzir os estudos e pesquisas na direção que julguei mais interessante. Aos demais professores e colegas do PPGTG, agradeço o conhecimento e experiência que compartilharam comigo, que de vários modos me auxiliaram a desenvolver minhas habilidades acadêmicas e a enriquecer essa dissertação.



## RESUMO

No setor de transportes é geralmente desejável prolongar a vida útil dos sistemas por diversas décadas, além do tempo estipulado no projeto. No entanto, observa-se que a infraestrutura atual segue uma tendência de envelhecimento e obsolescência. Isso conduz à necessidade de pensar em como preparar os sistemas de transportes para o futuro, considerando incertezas internas e externas à sociedade. Esta dissertação aborda o tema do *Future-Proofing* no setor de transportes, ou seja, a preparação dos sistemas de transportes para eventos incertos, com a finalidade de minimizar impactos negativos e aproveitar oportunidades. Em todas as atividades da engenharia existe a incerteza, a qual é lidada através de metodologias reconhecidas para cada área. No entanto, quando se trata de riscos incertos ou não previsíveis, há falta de consenso sobre como lidar com eles. Eventos não previstos podem tornar obras e operações de sistemas de transportes vulneráveis e obsoletas. A subjetividade do tema e a falta de processos reconhecidos para avaliar e direcionar a implementação de soluções de *Future-Proofing* levam a um baixo consenso entre as partes envolvidas e entraves para a decisão. Esta dissertação buscou abordar o problema ao propor um modelo para a avaliação e apoio à tomada de decisão em *Future-Proofing*. Através de uma revisão integrativa sobre a literatura no tópico foi possível identificar quatro principais Motivadores de *Future-Proofing*: Licitação e Gestão, Questão ambiental, Tecnologia e Inovação e Políticas sociais. Também foi possível identificar as lacunas na literatura que incluíam a falta de uma definição formal. É aqui proposto que o *Future-Proofing* em transportes é um processo direcionado a “elevar a resiliência do sistema a eventos futuros incertos e/ou a mitigar impactos causados pelo sistema sobre seu entorno”. O modelo foi desenvolvido a partir de recomendações e modelos anteriores e consiste em uma análise por etapas bem definidas, em que crescem a especificidade e o conhecimento sobre o problema e suas possíveis soluções com a aplicação das etapas. Os processos sugeridos são tanto qualitativos quanto quantitativos, tendo como premissa o registro e a discussão adequada das premissas, de forma a serem auditáveis e válidas segundo preceitos técnicos e científicos. A aplicação prática do modelo foi demonstrada para o projeto da Nova Ferroeste, em que foram levantados eventos incertos e relevantes para um trecho desse projeto. O evento das precipitações extremas foi selecionado para análises mais detalhadas e, a partir de modelagens e dados abertos sobre esse projeto, chegou-se a valores monetários para a tomada de decisão. Em conclusão, o modelo provou-se útil para reduzir o problema da complexidade de decisão em *Future-Proofing* porque permitiu direcionar um conceito abstrato por processos bem definidos e auditáveis. O que o modelo por si só não é capaz de resolver é o problema relacionado à multiplicidade de visões e interesses entre as partes envolvidas no projeto, construção e operação de grandes projetos.

**Palavras-chave:** *Future-Proofing*; transportes; resiliência, Nova Ferroeste, tomada de decisão



## ABSTRACT

In the field of transportation, it is generally desirable to extend the lifespan of systems for several decades beyond the projected timeline. However, it is observed that the current infrastructure is following a trend of aging and obsolescence. This leads to the need to consider how to prepare transportation systems for the future, considering internal and external uncertainties to society. This dissertation addresses the topic of Future-Proofing in the transportation sector, which refers to the preparation of transportation systems for uncertain events in order to minimize negative impacts and seize opportunities. In all engineering activities, uncertainty exists and is dealt with through recognized methodologies for each area. However, when it comes to uncertain or unpredictable risks, there is a lack of consensus on how to handle them. Unforeseen events can make transportation systems vulnerable and obsolete. The subjectivity of the topic and the lack of recognized processes to evaluate and direct the implementation of Future-Proofing solutions lead to low consensus among the parties involved and obstacles to decision-making. This dissertation sought to address the problem by proposing a model for evaluating and supporting decision-making in Future-Proofing. Through an integrative review of the literature on the topic, it was possible to identify four main motivators of Future-Proofing: Procurement and Management, Environmental, Technology and Innovation, and Social Policies. It was also possible to identify gaps in the literature, including the lack of a formal definition. It is proposed here that Future-Proofing in transportation is a process aimed at "increasing the system's resilience to uncertain future events and/or mitigating the impacts caused by the system on its surroundings." The model was developed based on previous recommendations and models found through the integrative literature review and consists of a well-defined step-by-step analysis, in which specificity and knowledge about the problem and its possible solutions grow through the application of the stages. The suggested processes are both qualitative and quantitative, with the premise of recording and adequately discussing assumptions so that they are auditable and valid according to technical and scientific principles. The practical application of the model was demonstrated for the New Ferroeste project, where uncertain and relevant events for a section of this project were identified. The event of extreme precipitation was selected for more detailed analysis, and based on modeling and open data of the project, monetary values for decision-making were determined. In conclusion, the model proved to be useful in reducing the problem of decision complexity in Future-Proofing because it allowed an abstract concept to be guided by well-defined and auditable processes. However, what the model alone is unable to solve is the problem related to the multiplicity of views and interests among the parties involved in the project, construction, and operation of large projects.

**Keywords:** Future-Proofing; transportation; resilience, New Ferroeste, decision-making

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Performance</i> de ativo de infraestrutura no tempo .....	26
Figura 2 - Estrutura da pesquisa .....	45
Figura 3 - Quantidade de publicações que abordam FP em transportes por ano da publicação .....	52
Figura 4 - Termos de palavras-chave com cinco ou mais ocorrências.....	53
Figura 5 - Custo de intervenção em relação ao tempo após evento adverso.....	63
Figura 6 - Atraso no tempo de viagem em relação ao tempo após evento adverso..	63
Figura 7 - Estrutura do modelo de análise e apoio à tomada de decisão de FP .....	87
Figura 8 - Modelo de matriz de vulnerabilidade do sistema aos eventos levantados	92
Figura 9 - Planejamento temporal para implementação da Nova Ferroeste .....	104
Figura 10 - Trecho da matriz de riscos da Nova Ferroeste apresentada no EVTEA-J .....	106
Figura 11 - Média anual de precipitações dos principais municípios cortados pelo novo traçado .....	111
Figura 12 - Disposição do evento analisado na matriz de vulnerabilidade .....	112
Figura 13 - TKU segundo dados de 2020.....	115
Figura 14 - Destaques da aplicação do modelo por etapa .....	128
Figura 15 - Dados abertos de indicadores operacionais da Rumo .....	156
Figura 16 - Dados abertos de resultado operacional da Rumo .....	157
Figura 17 - Dados abertos de receitas e tarifas da Rumo .....	157

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação da dissertação quanto às suas categorias de pesquisa ....	44
Quadro 2- Dados dos 20 principais artigos da revisão .....	54
Quadro 3 - Correspondência entre publicações e Motivadores de FP .....	57
Quadro 4 - Eventos levantados com possíveis impactos de longo prazo .....	107
Quadro 5 - Quadro com os aumentos aproximados das chuvas de projeto para a região de estudo.....	117
Quadro 6 - Processo de cálculo do Custo da Resiliência para etapa 5 do modelo .	119
Quadro 7 - variáveis para a avaliação por ROT para a Nova Ferroeste .....	124
Quadro 8 - Resultados da avaliação de ROT para a Nova Ferroeste .....	126
Quadro 9 - Intensidade de chuvas atuais (mm) por tempo de retorno (Tr).....	154
Quadro 10 - Memória de cálculo de acréscimos de precipitação considerados.....	155

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	151
Equação 2 .....	152
Equação 3 .....	152

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CoBIE	<i>Construction Operations Building Information Exchange</i>
FP	<i>Future-Proofing</i>
GBT	Túnel Base de São Gotardo
ICE	<i>Institution of Civil Engineers</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
O&M	Operação e Manutenção
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PPPs	Parcerias Público-Privadas
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
REBET	<i>REsilience, Brittleness and Emerging Technologies</i>
ROR	<i>Real Options Reasoning</i>
ROT	<i>Real Options Theory</i>
UE	União Europeia
WoS	<i>Web of Science</i>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.3	PERGUNTA DE PESQUISA E PREMISSAS.....	18
1.4	DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES.....	19
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>23</b>
2.1	SISTEMAS DE TRANSPORTES E SUA MANUTENÇÃO A LONGO PRAZO.....	23
2.2	RISCOS DE EVENTOS NÃO PREVISTOS.....	28
2.3	CONCEITO DE <i>FUTURE-PROOFING</i> .....	31
2.4	APLICAÇÕES PRÁTICAS DE <i>FUTURE-PROOFING</i> EM TRANSPORTES.....	33
2.5	PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DO <i>FUTURE-PROOFING</i> .....	36
2.6	AVALIAÇÃO DE PROPOSTAS DE <i>FUTURE-PROOFING</i> .....	40
<b>3</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>43</b>
3.1	CLASSIFICAÇÕES DESSA PESQUISA.....	44
3.2	ETAPA DA REVISÃO INTEGRATIVA.....	45
3.3	ETAPA DE ELABORAÇÃO DO MODELO.....	48
3.4	ETAPA DA APLICAÇÃO DO MODELO.....	51
<b>4</b>	<b>REVISÃO INTEGRATIVA: DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1	DESENVOLVIMENTO DA REVISÃO INTEGRATIVA.....	52
4.2	LICITAÇÃO E GESTÃO COMO MOTIVADOR DE FP.....	58
4.3	QUESTÃO AMBIENTAL COMO MOTIVADOR DE FP.....	64
4.4	TECNOLOGIA E INOVAÇÃO COMO MOTIVADORES DE FP.....	65
4.5	POLÍTICAS SOCIAIS COMO MOTIVADORES DE FP.....	68
4.6	OUTROS TÓPICOS.....	71
4.7	CONCLUSÃO DA REVISÃO INTEGRATIVA.....	73
<b>5</b>	<b>MODELO DE AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO DE <i>FUTURE-PROOFING</i>.....</b>	<b>77</b>
5.1	BASES DA LITERATURA PARA O MODELO.....	77

5.2	ESTRUTURA DO MODELO .....	86
5.2.1	<b>Etapa 1: Delimitação do sistema de transporte.....</b>	<b>88</b>
5.2.2	<b>Etapa 2: Levantamento de eventos incertos .....</b>	<b>89</b>
5.2.3	<b>Etapa 3: Avaliação da vulnerabilidade do sistema .....</b>	<b>91</b>
5.2.4	<b>Etapa 4: Avaliação de risco dos eventos .....</b>	<b>93</b>
5.2.5	<b>Etapa 5: Cálculo do custo da resiliência.....</b>	<b>94</b>
5.2.6	<b>Etapa 6: Definição de planos de mitigação.....</b>	<b>96</b>
6	<b>APLICAÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>101</b>
6.1	DELIMITAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE .....	101
6.1.1	<b>Detalhamento do objeto de análise .....</b>	<b>102</b>
6.2	LEVANTAMENTO DE EVENTOS INCERTOS .....	105
6.3	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA.....	109
6.4	AVALIAÇÃO DE RISCO DOS EVENTOS.....	112
6.5	CÁLCULO DO CUSTO DA RESILIÊNCIA .....	116
6.6	DEFINIÇÃO DE PLANOS DE MITIGAÇÃO .....	122
6.7	DESTAQUES DA APLICAÇÃO DO MODELO.....	127
7	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>135</b>
	<b>APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA E MÉTODO DE AVALIAÇÃO POR ROT</b> <b>.....</b>	<b>151</b>
	<b>APÊNDICE B – PREMISSAS E MEMÓRIA DE CÁLCULO DE</b> <b>PRECIPITAÇÕES VARIÁVEIS.....</b>	<b>153</b>
	<b>ANEXO A – EXEMPLO DE DADOS OPERACIONAIS ABERTOS .....</b>	<b>156</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os aspectos gerais que dão origem à pesquisa, tais como sua justificativa, objetivos e limitações. Também é apresentado um resumo da ordem e conteúdo dos capítulos da dissertação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O *Future-Proofing* é um tópico de pesquisas com interesse crescente que consiste em preparar-se para eventos incertos, reduzindo impactos negativos e aproveitando oportunidades. Em setores essenciais, como o de transportes, esse assunto é relevante principalmente devido aos longos períodos operacionais dos sistemas (LI; LOVE, 2022).

A infraestrutura atual, principalmente em países desenvolvidos, segue uma tendência de envelhecimento e obsolescência. Além de mais recursos para renovação desses sistemas, é preciso pensar em como preparar os transportes para o futuro, que conta com incertezas internas e externas à sociedade (GATIEN *et al.*, 2020).

Exemplos recentes como o derretimento das pistas no aeroporto de Luton devido às temperaturas extremas para o verão inglês estão dentre alguns dos casos mais divulgados pela mídia (REALE, 2023). Outro tipo de evento não previsto pode ser exemplificado pelo ataque hacker à Maersk em 2017, tendo resultado na interrupção das operações por dias e prejuízo de ao menos U\$ 300 milhões (HEIKKILÄ; SAARNI; SAURAMA, 2022).

Fatores desconhecidos são inerentes em todas as atividades de engenharia. Alguns desses são considerados habituais e tratados no dia a dia pelas organizações do setor. Sabe-se, por exemplo, que na construção de um túnel o comportamento de um maciço não pode ser estimado precisamente antes da escavação (EHRBAR, 2015). De forma semelhante, sabe-se que a demanda por modos de transporte é variável com o tempo e com a concorrência (LI; LIN; WU, 2019). Já existem metodologias reconhecidas para estudar e tratar tais incertezas e a má gestão desses riscos pode estar mais ligada a erros processuais do que ao desconhecimento do futuro.

São especificamente os eventos não previstos, ou que variam de forma inesperada, que podem tornar obras e operações de sistemas de transportes

vulneráveis, obsoletas e até inviáveis (KRYSTALLIS; LOCATELLI; MURTAGH, 2022; LEMER, 1996). Há um interesse crescente de governos, empresas, organizações e academia em buscar mitigar os riscos e aproveitar as oportunidades dessas mudanças, o que leva o nome de *Future-Proofing* (ADEY *et al.*, 2021). Na academia essa é ainda uma área nova que está em exploração crescente.

Sugere-se na literatura que a subjetividade do tópico *Future-Proofing* e a falta de processos reconhecidos para avaliar e direcionar sua implementação conduza a um baixo consenso entre as partes (NIPA; KERMANSHACHI; KARTHICK, 2022), um problema significativo para a implementação de soluções. Em geral, não são questões puramente técnicas que trazem complexidade e incapacidade de decisão dentro desse tema, mas sim a interação que essas decisões têm com interesses sociais e econômicos das diversas partes envolvidas desde a licitação, até a construção e operação de um sistema de transportes.

A presente dissertação busca contribuir para o tópico com a proposta de um modelo de avaliação e apoio à tomada de decisão em *Future-Proofing*. Esse modelo direciona a análise dos eventos incertos em transportes por etapas bem definidas, em que crescem a especificidade e o conhecimento sobre o problema e suas possíveis soluções a cada etapa que se passa. A existência desse modelo permite conduzir a discussão com base em uma linguagem comum e um conhecimento compartilhado do assunto. Os processos sugeridos são tanto qualitativos quanto quantitativos, tomando-se o cuidado para que as premissas sejam registradas e discutidas adequadamente de forma a serem auditáveis e válidas segundo preceitos técnicos e científicos.

A aplicação prática do modelo foi demonstrada para um caso real, o projeto da Nova Ferroeste. Este projeto refere-se à construção e renovação de um trecho ferroviário que ligará os estados do Mato Grosso do Sul até o litoral no porto de Paranaguá, passando pelo estado do Paraná e com ligação à Chapecó, em Santa Catarina. Foram levantados os eventos incertos relevantes para um trecho desse projeto, sendo que o evento das precipitações extremas foi selecionado para análises mais detalhadas. A partir de modelagens e dados abertos sobre esse projeto, chegou-se a valores monetários relativos à viabilidade e importância do investimento em *Future-Proofing*.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é propor um modelo de análise e apoio à tomada de decisão de *Future-Proofing* para transportes.

Os objetivos específicos são:

- a) apresentar a relevância do *Future-Proofing* para transportes;
- b) identificar os fatores que motivam o *Future-Proofing* em transportes;
- c) propor uma definição para o termo no contexto de transportes;
- d) identificar e descrever as principais lacunas da literatura atual;
- e) detalhar o modelo e seu embasamento na literatura, e
- f) aplicar o modelo em um caso real e relevante.

## 1.3 PERGUNTA DE PESQUISA E PREMISSAS

Como descrito por Silva e Menezes (2001), o problema que a pesquisa busca solucionar deve desejavelmente ser descrito como uma pergunta a ser respondida. Elaborou-se aqui a seguinte pergunta de pesquisa:

*Como o Future-Proofing de sistemas de transportes pode ser avaliado para facilitar a tomada de decisão?*

Visando responder a essa pergunta, foram delimitadas algumas premissas:

Premissa principal: é viável propor um modelo conceitual sistemático e confiável, voltado para a avaliação e tomada de decisão do *Future-Proofing*.

Premissas secundárias:

- a) o problema da necessidade de um modelo já teria sido abordado por outras publicações, incluindo os requisitos desejáveis para ele;
- b) a discussão sobre *Future-Proofing* seria atual e relevante, envolvendo diversos campos do conhecimento e motivações;
- c) como os resultados práticos do *Future-Proofing* são vistos em longo prazo, um método de pesquisa baseado em estudos de caso práticos seria uma tarefa pouco viável para o escopo dessa dissertação, e

- d) a literatura internacional sobre o *Future-Proofing* em transportes é a fonte de informações mais adequada para a condução da pesquisa, por conter tanto dados históricos de longo prazo quanto recomendações atuais.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES

Estão listadas abaixo as delimitações e limitações da pesquisa desenvolvida nessa dissertação.

O estudo está delimitado da seguinte forma:

- delimitações de conceito: o uso do termo *Future-Proofing* na literatura de transportes é recente, como demonstrado em mais detalhes no capítulo 4. Isso implica que há considerações, definições e usos desse termo que são diversas da utilizada para essa pesquisa, elaborada no capítulo 4. As bases da literatura para o que é considerado aqui como *Future-Proofing* são expostas e discutidas nos capítulos 2 e 4;
- delimitações de métodos de análise: para a análise da literatura foi utilizado o método de revisão integrativa. Compreende-se que esse método confere uma formalidade na análise da literatura mais confiável do que em uma revisão narrativa (SOUZA; DIAS; CARVALHO, 2010). Dado o fato de que o autor executou a revisão sozinho, a revisão integrativa foi considerada a mais válida para a elaboração do modelo, porém, entende-se que caso houvesse os recursos para isso seria possível desenvolver a pesquisa de outras formas, como baseando-se em estudos de caso aprofundados;
- delimitações de objeto da análise: o objeto da análise foram os grandes sistemas de transportes, conforme caracterizados no capítulo 2 e 4. Compreende-se que para a avaliação de objetos com características diversas a esses os métodos utilizados e os resultados obtidos podem não ser adequados;
- delimitações da amostra: para a aplicação foi escolhido o projeto da Nova Ferroeste. Esse projeto correspondeu bem às delimitações de objeto da análise e a justificativa para a escolha dele é descrita em detalhes no capítulo 6;

- delimitações de solução: a solução proposta para o problema de pesquisa foi a criação de um modelo que utiliza processos qualitativos e quantitativos que buscam ser justificáveis pelo conhecimento científico e auditáveis por grupos externos. Mesmo assim, reconhece-se que outras soluções eram possíveis assim como outras abordagens para desenvolvimento de uma solução semelhante;
- delimitações de inovação: a pesquisa traz um método que visa inovar na forma de analisar os investimentos de *Future-Proofing* para sistemas de transportes. Entende-se que a inovação proposta está restrita a esse âmbito, e
- delimitações da aplicação: a aplicação do modelo no capítulo 6 foi executada somente pelo autor, simulando a condição de um analista externo. Compreende-se que isso não envolve todas ou uma parte estatisticamente significativa das aplicações possíveis do modelo em sistemas de transportes.

Seguem algumas das limitações reconhecidas da dissertação:

- limitação de análise externa: a análise foi realizada sem acesso direto à equipe diretamente envolvida no projeto. Isso pode conduzir a resultados menos detalhados, pois os dados utilizados são em si limitados e podem não fornecer um quadro completo do problema ou situação;
- Limitação de poder de acionamento: a análise externa não tem poder de acionamento dos resultados e recomendações. Isso significa que as recomendações podem não ser implementadas ou podem ser ignoradas, limitando o impacto e possivelmente a validade da análise;
- Limitação de tempo e recursos: a análise foi limitada ao período de um mestrado e não contou com recursos dedicados, o que pode ter afetado a profundidade e amplitude da análise realizada. Por exemplo, a análise realizada foi limitada a um trecho específico do projeto da Nova Ferroeste, e é importante ressaltar que a análise deve continuar além do exposto no texto, tanto de forma mais aprofundada quanto mais ampla;
- Limitação de validação externa: o modelo ainda não recebeu uma validação externa à pesquisa, seja por membros de organizações da Nova Ferroeste e/ou aplicação por outro grupo em projeto distinto, e

- Limitação de impacto social: caso contasse com mais recursos a análise poderia ter sido ampliada para tratar de questões como a viabilidade econômica, social e ambiental da obra, os possíveis impactos no meio ambiente e na vida das pessoas afetadas, além das limitações do modelo de concessões do governo brasileiro.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está dividida em sete capítulos, que são descritos textualmente abaixo.

O capítulo 1 – “Introdução”, traz uma breve justificativa sobre importância atual do tópico de *Future-Proofing* para o setor de transportes, dado o interesse em prolongar a vida útil desses sistemas. Além disso, argumenta-se que é importante aprofundar o conhecimento sobre o assunto, dado o interesse manifestado por organizações diversas em anos recentes de conseguir implementar efetivamente tais soluções, trazendo benefícios e atendendo a interesses. Ainda, esse capítulo resume brevemente a estrutura e conteúdo dos capítulos seguintes, a pergunta de pesquisa, os objetivos e as delimitações e limitações da pesquisa.

O capítulo 2 – “Revisão da Literatura”, traz a importância de se estender a vida útil dos sistemas de transportes e sua infraestrutura, tanto para os projetos existentes quanto para aqueles novos. Discute-se também como a dependência desses sistemas em futuros distantes está associada a incertezas que podem resultar em sérios riscos não previstos. Apresenta-se uma definição de *Future-Proofing* para infraestruturas em geral, seguida de exemplos práticos de aplicações em grandes projetos de transportes da atualidade.

Expõe-se a preocupação na literatura sobre a complexidade das decisões de *Future-Proofing*, que envolvem a cooperação e consenso de diversas organizações e grupos, e as consequências de não se conseguir implementar tais soluções em médio e longo prazo. Argumenta-se pela literatura recente sobre a falta de métodos a serem seguidos para avaliar os benefícios dessas soluções, que também carregam incertezas, e como pode-se proceder para avançar nesse tipo de análise.

Já no capítulo 3 – “Método”, expõe-se a estrutura da pesquisa, com os processos e métodos adotados e sua lógica sequencial. Também é fornecida uma

categorização geral da pesquisa, em termos de sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos.

No capítulo 4 – “Revisão Integrativa: desenvolvimento e resultados”, buscou-se avaliar a literatura relevante em *Future-Proofing* de transportes a partir de uma pergunta norteadora da busca e um processo de revisão descritos no capítulo 3. As publicações foram coletadas, filtradas, selecionadas por relevância, categorizadas e comparadas entre si. Os resultados da revisão serviram de base para responder à pergunta de pesquisa e elaborar o modelo proposto, no capítulo 5. Também foi possível identificar as lacunas atuais na literatura e delimitar o escopo do *Future-Proofing* em transportes, propondo uma definição para o termo nesse contexto.

Para o capítulo 5 – “Modelo de avaliação e apoio à tomada de decisão de *Future-proofing*”, os aprendizados desenvolvidos no capítulo 4 foram utilizados para construir o modelo proposto. Explica-se o modelo em detalhes, discorrendo-se também sobre suas limitações.

O capítulo 6 – “Aplicação do modelo” é uma demonstração prática do uso do modelo em um caso real, o projeto para a Nova Ferroeste. São explicados detalhes sobre o projeto, o porquê do *Future-Proofing* ser importante para esse caso, e como a aplicação do modelo proposto pode enriquecer as perspectivas futuras sobre investimentos na ferrovia.

No capítulo 7 – “Conclusão” faz-se uma revisão dos tópicos, objetivos e resultados tratados e desenvolvidos nessa dissertação. Discute-se também a importância da pesquisa para a sociedade e para o setor de transportes, além de sugestões de pesquisas subsequentes e complementares a essa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo visa introduzir o tema dos eventos incertos e seus potenciais efeitos nos sistemas de transportes. Essa discussão passa através dos conceitos de resiliência das infraestruturas e como adaptá-las para um futuro incerto, uma temática nova em transportes que está associada ao conceito de *Future-Proofing*.

### 2.1 SISTEMAS DE TRANSPORTES E SUA MANUTENÇÃO EM LONGO PRAZO

Os sistemas de transportes, em particular, possuem longa durabilidade física e operacional, prevista desde a concepção do projeto, com expectativa de vida útil de 50 a 70 anos ou mais (LEMER, 1996; LI; LOVE, 2022). Comparando-os com construções de edificações urbanas, nota-se um contraste não só na durabilidade física, mas também de tempo esperado de uso (LANGSTON, 2014). Isso pois, embora um prédio costume permanecer seguro estruturalmente após o período especificado em projeto, é comum haver pressão de mercado para que seja demolido ou profundamente readequado com o tempo (MARTIN, 2015). Com exceção de edifícios tombados, a decisão em relação à demolição dessas construções costuma ocorrer sem conflitos de interesse, pois os proprietários têm a função econômica como principal consideração (MAURI, 1997).

Já os sistemas de transportes viabilizam a economia e as relações interpessoais dentro de cidades e regiões, tendo em vista sua importância social (MARTIN, 2015). A complexidade desses ativos reside no fato de envolverem múltiplos *stakeholders* em seu ciclo de vida, desde o projeto até a posse, incluindo diferentes organizações públicas e privadas (DEMIREL *et al.*, 2016).

Nesse sentido, a manutenção a longo prazo dos sistemas de transportes se apresenta como um desafio, uma vez que sua substituição por novos sistemas é custosa e a longevidade dos ativos é desejada. Esse desejo de prolongamento de vida destoia do que é praticado em outros setores, como o de energia (ENGEL; FISCHER; GALETOVIC, 2015). Em tal setor, por exemplo, a manutenção de turbinas eólicas por mais de 25 anos costuma ser desvantajosa, uma vez que a construção e instalação de ativos mais modernos traz melhor *performance* em termos de

segurança, eficiência energética, poluição e retorno financeiro (KELLEY, 2017), incentivos não sempre observados em transportes.

Atualmente, é evidente um cenário global de envelhecimento das estruturas, principalmente nos países ocidentais. De fato, parte das estruturas de transportes nesses países foi construída há mais de 50 anos, podendo chegar a mais de 100 anos de operação, dependendo do contexto (LECHNER; FEIX, 2022). Nos Estados Unidos, por exemplo, a média de idade das pontes em operação é de 44 anos, sendo que mais de 40% delas já ultrapassaram a idade de serviço prevista de 50 anos. Adicionalmente, 7,5% do total de 46 mil pontes do país está categorizado como em más condições estruturais. O setor de transporte aéreo dos Estados Unidos também enfrenta dificuldades com uma estrutura antiga e tecnologicamente defasada, que não consegue atender à demanda normal, mesmo fora do período de pandemia de COVID-19 (ASCE, 2021).

Os sistemas de transportes, em sua maioria, são propriedade de organizações do setor público (GKOUMAS *et al.*, 2019). Após a crise financeira de 2008, em diversos países observou-se uma tendência de desinvestimento do setor público nesses sistemas. Na União Europeia, por exemplo, os investimentos em construção e manutenção foram menores em 2018 do que em 2008, mesmo sem ajustar pela inflação (ZACHARIADIS, 2018). No entanto, há fortes indícios de que essa tendência esteja mudando globalmente na década de 2020. Como exemplo, o governo dos Estados Unidos propôs um plano de dois trilhões de dólares para construção e revitalização dos sistemas de transportes do país, sob o slogan "reconstruir melhor" ("*build back better*"). Na Austrália, o governo comprometeu-se a investir pelo menos 100 bilhões de dólares em novas e antigas infraestruturas de sistemas de transportes de 2019 a 2029 (LOVE *et al.*, 2021a). Já no Brasil, os investimentos públicos em sistemas de transportes continuam sendo reduzidos desde 2010, passando do pico de R\$28,44 bilhões para R\$8,79 bilhões em 2021 (CNT, 2022).

Com as mudanças econômicas, sociais e tecnológicas, os investimentos em sistemas de transportes podem gerar novas demandas que precisarão ser supridas em breve. Atualmente, as despesas envolvidas com a manutenção dos ativos de transportes já não estão sendo adequadamente atendidas, mesmo em países desenvolvidos (ABIAD *et al.*, 2014). Os valores recomendados para investimento em transportes tendem a ser vultuosos e apresentam variabilidade entre autores. Como

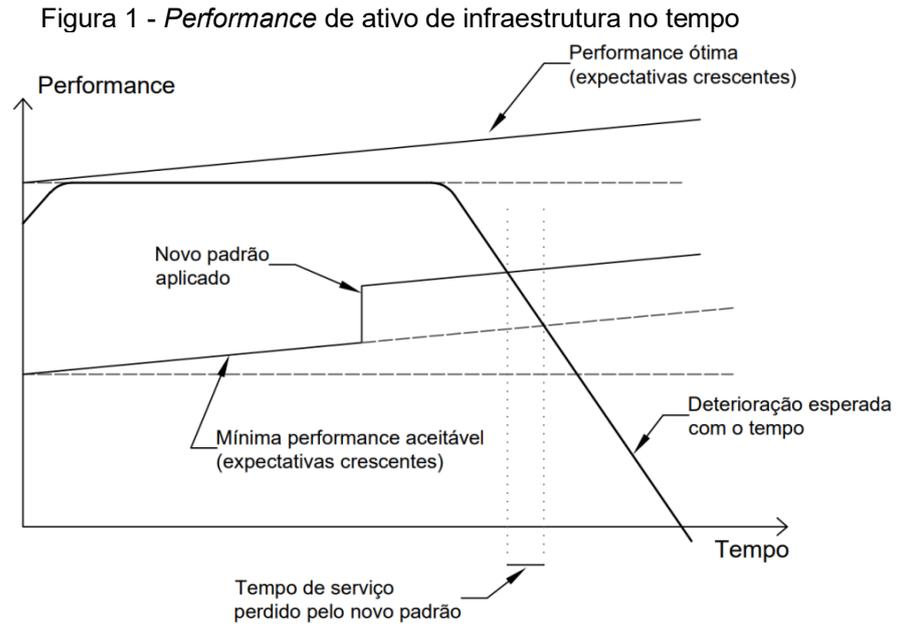
referência, pode-se citar recomendações gerais de que a manutenção da infraestrutura existente e o investimento em novas construções deveriam estar acima de 7,3% do PIB anual para países emergentes (HALLEGATTE *et al.*, 2019), €688mi (U\$ 825,6mi em janeiro de 2021) para países da União Europeia (EEA, 2022) e de U\$1,5tri para os países asiáticos (LOVE *et al.*, 2021a).

Os valores recomendados para futuros investimentos em sistemas de transportes baseiam-se principalmente em projeções determinísticas, que consideram condições e riscos já identificados no presente para desenhar cenários e simulações bem definidas (HAGMANN, 2012). No entanto, não é comum que sejam consideradas variações nos cenários de acordo com potenciais riscos que ainda não são observados ou conhecidos (SAIDEL *et al.*, 2011). Isso é um problema quando se considera o longo tempo de serviço desejado para a infraestrutura de transportes.

O tempo de serviço é uma das principais ideias dentro da discussão sobre a longevidade dos sistemas de transportes (KENNY, 2018) e é frequentemente definido como o tempo necessário para que os ativos do sistema atinjam a ruína física. De maneira geral, a durabilidade estrutural dos ativos de transportes costuma se comportar de forma previsível segundo modelos físicos e químicos de degradação e pode, em parte, ser considerada matematicamente (LECHNER; FEIX, 2022).

Embora essa definição de tempo de serviço, baseada na ruína física, faça sentido em casos como o de pavimentos rodoviários, ela não é sempre aplicável no âmbito de transportes. Isso porque esses sistemas estão sujeitos a fatores externos, alguns dos quais são subjetivos e alheios à engenharia (THOMPSON *et al.*, 2012).

Para explicar essas influências de maneira simplificada, Lemer (1996) utiliza um gráfico didático de *performance* versus tempo (Figura 1), em que a *performance* é definida por quaisquer aspectos que possam medir o bom funcionamento do sistema.



Fonte: Lemer (1996)

De acordo com a Figura 1 a *performance* dos ativos de um sistema de transportes apresenta um breve período de melhoria operacional, que ocorre durante a fase de aprendizado, e permanece estável em um patamar ótimo de projeto por diversos anos. Após esse período, há uma queda acelerada da *performance* com o passar do tempo. Contudo, é importante ressaltar que a curva real de *performance* dependerá das manutenções periódicas realizadas e dos desgastes causados pelo ambiente e uso (VANGELI *et al.*, 2021).

A queda no desempenho não é o único fator que influencia negativamente o tempo de serviço dos sistemas de transportes, uma vez que as expectativas operacionais tendem a aumentar com o passar do tempo, incluindo a ideia de padrão ótimo e padrão mínimo (Figura 1). Os fatores responsáveis por isso podem ter natureza tecnológica (1), regulatória (2), econômica e social (3) e de valores e comportamentos (4).

Os fatores de tipos 1 e 2 tendem a ter incidência pontual e bem definida, como a mudança na legislação que impede veículos em determinadas vias ou a incompatibilidade tecnológica entre equipamentos, como um novo avião que é grande demais para algumas pistas antigas.

Já os fatores de tipos 3 e 4 provocam um aumento gradual e pouco previsível nas expectativas de desempenho, motivados seja por novas demandas comerciais ou pelas preferências dos usuários. Embora não tenha sido discutido por Lemer (1996),

são cada vez mais evidentes as mudanças motivadas pelas alterações climáticas. Espera-se que, gradual ou abruptamente, o fator climático continue a exigir uma evolução nos padrões ótimos e mínimos dos sistemas de transportes (RANGER; REEDER; LOWE, 2013).

Quando um sistema de transportes oferece um serviço abaixo da expectativa mínima, pode-se dizer que ele está obsoleto. Um ativo obsoleto não precisa estar quebrado ou gasto, mas simplesmente estar fora dos padrões aceitáveis, em uma condição de falha funcional (MULHOLLAND; PITT; MCLENNAN, 2016). Um exemplo didático dessa realidade são os aquedutos romanos, que ainda estão em boa parte íntegros e capazes de atender os requisitos originais de projeto, mas já não se adequam ao novo padrão de funcionamento esperado para o fornecimento de água.

De forma contra intuitiva, alguns sistemas de transportes antigos oferecem um serviço de baixa *performance*, porém, não estão obsoletos. Isso porque seus usuários reduziram suas expectativas, seja devido à significância histórica da estrutura ou por condições externas atípicas, como em uma guerra (MULHOLLAND; MCLENNAN; PITT, 2015).

É comum que sistemas de transportes obsoletos continuem em funcionamento por anos, pois frequentemente a obsolescência é um processo lento, que é notado gradativamente e de forma diferente entre os usuários (MAURI, 1997). Foi observado que aproximadamente metade das pontes nos EUA com deficiência estrutural reconhecida também apresentavam uma ou mais deficiências funcionais (CHANG; GARVIN, 2008). Já as pontes categorizadas como funcionalmente inadequadas eram somente aquelas sem deficiência estrutural identificada, que costumavam continuar em operação até que oferecida uma opção melhor. Assim, o estudo pôde demonstrar que falhas funcionais estavam sendo colocadas em segundo plano e podiam passar despercebidas na visão dos gestores.

Modelos matemáticos aliados à experiência de profissionais podem auxiliar no acompanhamento do desgaste físico ou funcional que ocorre gradualmente ao longo do tempo. Esses modelos também podem apoiar decisões como a frequência de inspeções e intervenções necessárias para evitar a obsolescência. No entanto, os gestores ainda preferem o uso de critérios determinísticos para a decisão de investimentos em manutenções e agendamento de inspeções (IVANOV *et al.*, 2021). Ainda assim, é difícil contabilizar com precisão as despesas e os serviços futuros associados a essas manutenções, pois faltam referências detalhadas na literatura

para os vários tipos de ativos de transportes (MULHOLLAND; MCLENNAN; PITT, 2015).

Com o crescente uso de sistemas digitais na construção, o acompanhamento da obsolescência de componentes eletrônicos também se tornou uma necessidade para a gestão de ativos, algo que já é comum em outros setores mais tecnológicos (ABILI; ONWUZULUIGBO; KARA, 2013) (PAGE, 2012). Nesse contexto, é essencial observar também o chamado ciclo de vida do produto, em que o componente deixa gradualmente de estar disponível no mercado (SANDBORN, 2017).

## 2.2 RISCOS DE EVENTOS NÃO PREVISTOS

Em vista das incertezas futuras, a preocupação com transportes deve ir além da construção e manutenção regulares desses ativos, garantindo que o sistema seja robusto e possa se recuperar rapidamente de impactos não previsíveis (LYONS; DAVIDSON, 2016). Os efeitos disruptivos das mudanças climáticas, escassez de recursos naturais, interrupção no fornecimento de bens e serviços, crescente automação dos veículos e uma demanda incerta de energia para o futuro são alguns dos riscos de longo prazo que, apesar de identificados, são incertos e, portanto, difíceis de serem estimados com boa confiabilidade (GODFREY; SAVAGE, 2012). Preparar-se na prática para as incertezas futuras envolve decisões complexas, investimentos e medidas que podem exigir alto CAPEX<sup>1</sup> (*Capital Expenditure*) e acompanhamento contínuo (MILLER; LESSARD, 2001).

Serviços de transportes confiáveis são essenciais para o funcionamento diário e normal das comunidades próximas. Essa necessidade é ainda mais evidenciada quando ocorrem situações extraordinárias, como enchentes, incêndios e danos a outras infraestruturas (GUIDOTTI; GARDONI; ROSENHEIM, 2019). Problemas ou falhas que afetam sistemas de transportes impactam por definição toda a cadeia logística que depende deles (CAVDAROGLU *et al.*, 2013), aumentando o risco de falhas em cadeia (CALLAWAY *et al.*, 2000).

---

<sup>1</sup> Uma despesa de capital (CAPEX) é o dinheiro que as organizações usam para comprar, atualizar ou estender a vida útil de um ativo. Em transportes pode significar equipamentos, instalações e infraestrutura necessários para melhorar sua capacidade, eficiência e segurança.

Um exemplo de como o custo total de uma falha pode se estender bem além das proximidades da estrutura afetada foi visto em 2015, quando a ponte Tex Wash, na Califórnia, sofreu uma inundação. A ponte conectava duas rodovias importantes, a I-10 e a US-95, e sua falha interrompeu o transporte de bens e pessoas em todo o sudoeste dos Estados Unidos, afetando significativamente a economia local.

*As inundações repentinas de julho de 2015 erodiram as fundações da Ponte TexWash no sentido leste, causando o colapso da estrutura do tabuleiro e enfraquecendo de maneira significativa a fundação da Ponte TexWash. Esse incidente parou completamente o tráfego da Califórnia para os outros estados do leste dos Estados Unidos, interrompendo o transporte de bens e serviços. Isso resultou em um desvio de duas horas através da remota região desértica, sem áreas de descanso ou postos de combustíveis. Os custos de substituição da ponte não foram tão significativos quanto o efeito causado por seu colapso na vida das pessoas (VANGELI *et al.*, 2021, p. 16).*

No contexto das Parcerias Público-Privadas (PPPs), com acordos de concessão a alocação inadequada de riscos pode levar a problemas como litígios contratuais, renegociações e até mesmo o abandono do projeto. Foi constatado que 53% dos contratos de transportes na América Latina precisaram passar por renegociações (GUASCH, 2004). Isso é especialmente verdadeiro em grandes projetos de transportes, que podem ser caracterizados por sua complexidade e relevância em termos de (FLYVBJERG, 2014):

- 1) investimento financeiro: envolvem um investimento financeiro significativo, geralmente ultrapassando centenas de milhões ou bilhões de dólares;
- 2) escopo: têm escopo extenso, como a construção de grandes rodovias, linhas de trem de alta velocidade ou expansões de aeroportos;
- 3) prazo: exigem uma quantidade significativa de tempo para planejar, projetar e construir, muitas vezes abrangendo vários anos ou até décadas, e
- 4) impacto: podem ter um impacto significativo no meio ambiente, nas comunidades locais e nas economias regionais.

No entanto, lidar adequadamente com os riscos associados a esses casos é um desafio que muitas vezes está além da capacidade da gestão pública em contratos de PPP. Isso se deve, em parte, à premissa de que os riscos mais importantes serão tratados adequadamente no início do projeto e oficializados por contratos entre as

partes. Porém, a gestão dos riscos de projetos de sistemas de transportes que se estendem por várias décadas, incluindo a fase de operação, é diferente da dos projetos com prazos mais usuais, de até cinco anos até a conclusão (XIONG *et al.*, 2017).

O aprendizado com experiências passadas tem sido fundamental para o aprimoramento dos contratos atuais. No entanto, autores afirmam que é impossível prever todas as ocorrências que possam colocar em risco a manutenção e operação de sistemas de transportes (DEMIREL *et al.*, 2016). Alguns riscos difíceis de precisar devem ser deixados sem uma solução fixa, mesmo após a assinatura do contrato (XIONG *et al.*, 2017).

Para lidar com questões não previstas, Demirel *et al.* (2016) propõem uma abordagem que inclui flexibilidade tanto no projeto de engenharia quanto no contrato. Nessa perspectiva, as partes se comprometem a validar premissas de maneira imparcial e a aprender continuamente com o processo, evitando conflitos de poder e influência que muitas vezes caracterizam os litígios. Segundo os autores, há uma forte ligação entre monitoramento e a tomada de decisão, buscando-se o aprendizado.

As renegociações contratuais, frequentemente necessárias, representam uma abordagem reativa para lidar com mudanças, mas seu uso indevido pode gerar confrontos e colocar em risco as concessões (XIONG *et al.*, 2017). É necessário encontrar modelos mais proativos de relacionamento entre os stakeholders, incluindo processos de gestão adaptativa que permitam o monitoramento constante e a intercomunicação para promover aprendizado e direcionar a tomada de decisões (XIONG *et al.*, 2017).

O monitoramento contínuo da operação também pode auxiliar os órgãos públicos a garantir a qualidade e o alto nível operacional ao longo de anos, evitando comportamentos oportunistas. Isso porque após recuperar os valores investidos é possível que os membros privados de uma concessão percam o interesse em manter o alto nível de serviço (ENGEL; FISCHER; GALETOVIC, 2015; GUASCH, 2004). É necessário ressaltar que o monitoramento não tem capacidade de previsão para alguns eventos disruptivos como ataques, mudanças bruscas de demanda, questões políticas etc. (HOEFT *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, as práticas de gestão de riscos têm como objetivo identificar de maneira sistemática as origens potenciais dos riscos, bem como seus impactos e interações. Os riscos podem ser de causas variadas, como política, legal,

econômica, social ou resultantes de causas naturais, dentre outras (SCHOLZ; SANTOS, 2018). É comum que sejam listados e categorizados em um registro único por projeto, atribuindo-se características como um responsável para acompanhamento, probabilidade de ocorrência, expectativa de severidade, mitigação adotada e planos de contingência (EHRBAR, 2015).

No entanto, em um contexto de longo prazo, as análises se tornam mais complexas, sendo difícil ou mesmo impossível calcular uma probabilidade de ocorrência ou definir causas prováveis (HAGMANN, 2012; KRYSTALLIS; LOCATELLI; MURTAGH, 2022). A análise detalhada de risco consiste em um exame analítico dos riscos identificados e envolve a consideração das causas e fontes de risco, levando em conta a presença e efetividade de quaisquer medidas de controle existentes. Tais medidas podem incluir controles técnicos, como manutenções regulares das vias, ou administrativos, como políticas de verificação da qualidade. (PALIN *et al.*, 2021).

Em particular, há riscos relacionados a eventos extremos e que exigem medidas de alerta e preparação da sociedade, pois pode não ser possível prever e proteger-se sistematicamente contra eles (PALIN *et al.*, 2021). Nesses casos, os riscos também podem ser chamados de incertezas, pois não trazem consigo causas ou probabilidades computáveis.

Assim, o foco principal na análise de incertezas não está em prever causas futuras, mas sim em simular e remediar as consequências caso os eventos ocorram. Quando possível, uma avaliação de risco deve considerar uma ampla gama de impactos e possíveis respostas a esses, considerando também o potencial de oportunidades advindas da incerteza (PALIN *et al.*, 2021). O interesse de instituições de melhorar os processos para endereçar os riscos complexos pode ser visto no desenvolvimento de novas normas ISO, como o grupo de normas ISO-1409X, sobre riscos, adaptação e investimento/financiamento relacionados a eventos climáticos e às mudanças climáticas (PALIN *et al.*, 2021).

### 2.3 CONCEITO DE FUTURE-PROOFING

O interesse em definir diretrizes para a adequação de empreendimentos de transportes, sob uma ótica denominada em inglês como *Future-Proofing* (GHAZY *et al.*, 2022), tem aumentado entre governos, empresas e pesquisadores. O *Future-*

*Proofing* (FP) pode ser compreendido como o conjunto de ações e provisões que visam aumentar a resiliência do sistema frente a eventos futuros incertos e/ou mitigar impactos negativos do sistema sobre seu entorno (GODFREY; SAVAGE, 2012).

A discussão com base no conceito de FP formaliza a necessidade de ações e investimentos direcionados à extensão da vida útil dos sistemas de transportes. Exemplos práticos de FP em sistemas de transportes podem envolver a extensão da vida operacional com o aumento de resistência em fundações ou adição de novas pistas em uma ponte. Além disso, há também os cenários de FP que permitem a adaptação ou mudança de uso de uma estrutura, ou então a fácil substituição de equipamentos essenciais (HALLEGATTE *et al.*, 2019).

O FP tem sido empregado formalmente no setor da construção desde os anos 2000 e é frequentemente associado a outros termos como gestão da obsolescência, reconfiguração, adaptação, resiliência e flexibilidade (CARMICHAEL, 2020). Para o FP, essas terminologias estão interligadas pela ideia de antecipar o futuro para minimizar perdas e maximizar ganhos da visão de uma organização (GEORGIADOU; HACKING; GUTHRIE, 2012). Embora esses termos sejam sinônimos em diversos aspectos, o FP tem sido preferido, como visto em seu crescente uso por governos e acadêmicos no setor de transportes (CARMICHAEL, 2020) (LOVE *et al.*, 2019).

É importante distinguir entre as incertezas que são inerentes à operação diária e aquelas que são desconhecidas (OLSSON, 2006). As incertezas que fazem parte da operação diária, como a demanda variável por modos de transporte, são amplamente conhecidas e geralmente tratadas no dia a dia pelas organizações do setor (MASOOD *et al.*, 2016). Essas incertezas podem ser modeladas e gerenciadas por meio de técnicas estatísticas e de previsão, permitindo que as empresas de transportes planejem suas operações com um certo grau de confiança.

Exemplos de problemas devidos a riscos comuns ao setor de transporte foram observados no caso do Eurotunnel, em que modelagens de viabilidade inadequadas falharam em considerar as incertezas de projeto e de demanda, levando a atrasos significativos, custos adicionais e prejuízos prolongados (GRANT, 1997).

Masood *et al.* (2016) basearam-se na definição prévia de Godfrey e Savage (2012) para definirem o FP de infraestruturas como “o processo de antecipar eventos, mudanças, necessidades ou usos futuros para se preparar adequadamente, minimizar o impacto e aproveitar as oportunidades.” Ressaltaram ainda que as soluções de FP para infraestruturas devem apresentar duas características (MASOOD *et al.*, 2016):

- resiliência do sistema: garantir a capacidade de manter o controle sobre o sistema diante de circunstâncias e eventos inesperados ou fora do controle, e
- potencial de adaptação: permitir ou facilitar adaptações e mudanças em face de novas exigências e capacidades.

A resiliência na engenharia pode ser descrita como a capacidade de manter o controle sobre um sistema perturbado (COLLIS; SCHMID; TOBIAS, 2014). Já em transportes o termo costuma ser apresentado de formas diversas, associado à manutenção do nível de serviço, à capacidade de se recuperar de impactos e à resistência física das estruturas (NIPA; KERMANSHACHI; KARTHICK, 2022).

Mandelbaum e Buzacott (1990) definiram o potencial de adaptação como a quantidade de alternativas que permanecem após uma tomada de decisão, ou “espaço de manobra” para futuras decisões ainda desconhecidas. Em cenários altamente complexos, nos quais é inviável prever o futuro, a tomada de decisão baseada em experiências passadas costuma ser mais adequada (APARICIO, 2017). Contudo, quando é possível antever uma demanda específica no futuro, pode-se fazer um investimento em soluções de engenharia específicas (COLLIS; SCHMID; TOBIAS, 2014).

## 2.4 APLICAÇÕES PRÁTICAS DE *FUTURE-PROOFING* EM TRANSPORTES

Este subcapítulo é dedicado a apresentar algumas aplicações práticas de FP em sistemas de transportes. Os casos selecionados buscam demonstrar a diversidade de aplicações e abordagens do FP em grandes sistemas de transportes em tempos atuais.

Os eventos não previstos, em especial os eventos climáticos extremos, têm sido responsáveis por incidentes frequentes que impactam a segurança e o desempenho das infraestruturas de transportes, como ilustrado pelo caso da ferrovia Dawlish no Reino Unido (GKOUMAS *et al.*, 2019). Em 2014, partes da via precisaram ser restauradas devido a tempestades ocorridas na região (DAWSON; SHAW;

ROLAND GEHRELS, 2016). Para aumentar a resiliência desse sistema na seção mais afetada, foram realizadas as seguintes ações (MASOOD *et al.*, 2016):

- estabilização do talude em áreas críticas;
- restauração completa de componentes eletrônicos e de sinalização e,
- restauração e melhoria da passarela pública à beira-mar.

Foram também sugeridas algumas medidas por Masood *et al.* (2016):

- reconstrução do paredão de contenção a alturas de ondas previstas para o ano 2050 e com a possibilidade de ser elevado ainda mais, caso necessário, considerando fundações e espaço disponível;
- modularidade – se os muros forem reconstruídos de forma modular, os reparos e extensões em eventos climáticos podem ser mais fáceis e rápidos. Também permitirá a execução facilitada de mais vias, que estão em planejamento, e
- reuso – considerando a modularidade dos muros, poderia haver uma facilidade no reuso de estruturas e componentes.

Outro exemplo recente e relevante na discussão de FP é o do Túnel Base de São Gotardo (GBT), na Suíça, que com seus 57 km de extensão é considerado o maior túnel do mundo. Como é comum em túneis escavados em rocha saturada, ocorrem influxos de água do maciço para a escavação, o que pode gerar movimentações e tensões capazes de prejudicar estruturas próximas (FABBRI, 2004). Esse foi o caso de três represas situadas na área do túnel, cujo dano significativo poderia impedir a continuidade das escavações por anos, com alto custo associado. Decidiu-se, então, implementar um sistema de monitoramento em vez de agir prontamente no reforço das áreas escavadas sob as represas (EHRBAR, 2015).

Esse sistema atuou por cerca de 15 anos e permitiu o refinamento dos modelos e uma predição precisa do comportamento da estrutura. Quando um fluxo de 13l/s foi identificado em uma das represas, foi decidido atuar pontualmente com um reforço estrutural por *grouting*, o que reduziu o fluxo para níveis aceitáveis. Com a experiência adquirida, foram então aplicados mais reforços semelhantes em outros pontos (EHRBAR, 2015).

Para garantir a qualidade do projeto e unificar o controle, cada empreiteiro envolvido na construção do GBT utilizou o mesmo sistema de registro e nomenclatura

com formulários padronizados (EHRBAR; KELLENBERGER, 2003). Os requisitos do projeto foram divididos em "requisitos fixos sem liberdade de ação" e "requisitos abertos com liberdade de ação", e foram acordados entre o governo, a construtora e o futuro operador. Os requisitos fixos envolviam escopo, orçamento e prazo, enquanto os requisitos abertos incluíam qualidade, redução de custos, segurança, marcos, organização de processos e comunicação (EHRBAR, 2015).

A adoção de uma definição de risco que considera tanto aspectos positivos quanto negativos foi considerada uma decisão-chave (EHRBAR; KELLENBERGER, 2003). A cada três meses, os riscos identificados eram alinhados, tanto em relação a problemas quanto a oportunidades, e as decisões tomadas eram registradas em planos de ação.

Para garantir a consistência do processo decisório, a construtora adotou o princípio dos Quatro Olhos, que exigia que todas as decisões fossem revisadas e aprovadas por uma segunda pessoa, que não estivesse envolvida diretamente com o assunto em questão. Esse processo foi apoiado por uma empresa consultora externa ao projeto (SPANG; EHRBAR; ELBAZ, 2019).

Nesse sentido, a implementação de um sistema de monitoramento permitiu à construtora avaliar os riscos de forma mais precisa, o que contribuiu para a mitigação dos impactos negativos e para a identificação de oportunidades de melhoria. Isso demonstra a importância de se adotar medidas preventivas e de monitoramento em projetos de sistemas de transportes, especialmente em contextos de incerteza e complexidade. A abordagem utilizada pela construtora pode ser considerada uma estratégia de FP, na medida em que buscou aumentar a resiliência do sistema diante de eventos futuros incertos, através do monitoramento ativo.

A existência e acesso às documentações de projeto são essenciais para a gestão de sistemas de transportes mesmo após a construção, durante a operação e manutenção (O&M) dos sistemas. É importante que a documentação *as-built* reflita o estado real do que foi executado para que os sistemas possam ser gerenciados adequadamente.

No entanto, construções antigas não estão de acordo com os processos de trabalho atuais, e a documentação *as-built* é frequentemente entregue em papel ou em CAD, o que pode ser problemático. Em vezes a documentação é elaborada após a conclusão da obra, quando alguns sistemas já não estão facilmente acessíveis para consulta.

Falhas na documentação podem resultar em diversos problemas, como o aumento do tempo gasto com informações imprecisas e redução grave da segurança e da eficiência das equipes de O&M. É essencial que a documentação seja atualizada de forma contínua, não apenas em relação à descrição dos sistemas, mas também quanto à disponibilidade da informação.

No estudo de Love *et al.* (2018) foi descrita a iniciativa de digitalização dos documentos elétricos do terminal de trem de Bayswater, na Austrália. Essa estrutura, que foi aberta em 1896, agora passa por um processo de reconstrução iniciado em 2021. Os autores seguiram metodologias internacionais de *Building Information Modeling* (BIM) com tecnologias de padrão aberto, como o CoBIE e o IFC, para categorizar, correlacionar, corrigir e disponibilizar os projetos e documentos elétricos relevantes aos controladores.

Nesse processo, foram corrigidos defeitos da documentação existente, aumentando a segurança da operação e a flexibilidade para mudanças futuras no sistema de transportes. Durante o trabalho, tornou-se evidente a importância da revisão dos documentos do terminal em vários níveis. A maioria dos componentes elétricos nos desenhos estava numerada de forma incorreta, havia diversos itens, como interruptores, que não estavam documentados, e componentes importantes de quadros de energia eram referenciados nos textos, mas não nos desenhos.

Problemas como esses demonstram que a maneira ainda prevalente de documentar o pós-execução não só é insuficiente como também traz inseguranças. Tal estudo destaca ainda a importância da revisão e atualização periódica da documentação dos sistemas de transportes, a fim de aumentar a segurança e a flexibilidade desses diante de mudanças futuras. A digitalização e a adoção de metodologias BIM são ferramentas essenciais nesse processo (TAN; MASOOD, 2021).

## 2.5 PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DO *FUTURE-PROOFING*

Gbadamosi *et al.* (2021) afirmam que não há um caminho único para iniciar o FP em transportes. É necessário realizar uma análise criteriosa das condições atuais da estrutura, da organização, dos processos vigentes e dos parceiros responsáveis, sempre destacando o valor agregado. Dessa forma, é possível identificar as necessidades e os desafios específicos do sistema de transporte em questão e traçar um plano de ação mais adequado.

A fase operacional é a mais longa da vida da infraestrutura de sistemas de transportes, mas muitas vezes é considerada menos importante pelos governos, que desenham novos projetos com foco na entrega física da obra. No entanto, negligenciar a importância da fase operacional pode resultar em problemas organizacionais complexos, incluindo litígios e retrabalho (HOEFT *et al.*, 2021).

Sistemas de transportes são frequentemente afetados por fatores que conduzem a falhas em seu ciclo de vida, tais como previsões desatualizadas, falta de transparência, divergências de interesses e expectativas entre as partes envolvidas, e falta de definição clara dos objetivos e responsabilidades dos *stakeholders* (HOEFT *et al.*, 2021). Para garantir o sucesso do projeto, é essencial a comunicação efetiva com os *stakeholders*, incluindo o público em geral, promovendo uma participação multilateral. No entanto, devido às próprias características das Parcerias Público-Privadas (PPPs), é comum encontrar processos fragmentados que comprometem o sucesso do projeto.

Embora seja importante envolver todos os *stakeholders* em todos os estágios das PPPs, na prática, menos de 5% deles estão em cada uma, o que aumenta a possibilidade de atitudes oportunistas (HOEFT *et al.*, 2021). Para mitigar esses riscos, é fundamental uma gestão efetiva nas transições entre as fases do projeto, avaliando as interfaces e considerando todo o ciclo de vida da infraestrutura.

Olsson (2006) realizou um estudo para avaliar se a flexibilidade em diferentes setores se encontrava no processo ou no produto e se ela era prevista de alguma forma. Em geral, o autor notou que os grandes sistemas de transportes apresentavam pouca flexibilidade no produto após a fase inicial, mas uma maior flexibilidade no processo, dependendo dos interesses das empresas envolvidas. Isso reforça a importância de considerar soluções na fase operacional como fundamentais no FP.

*Gestores de projeto parecem ser favoráveis à flexibilidade quando eles e os donos (project owners) estão na mesma organização ou em organizações próximas. Isso foi frequentemente o caso em projetos de infraestrutura de transportes. Quando a gestão de projetos e o dono do projeto estão em*

*organizações diferentes, a gestão teve uma visão negativa sobre flexibilidade (OLSSON, 2006, p. 71).*

A adoção de novas tecnologias e estratégias inovadoras é necessária para melhorar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de transportes (EHRBAR, 2015) e viabilizam a flexibilidade de O&M para o FP (DEMIREL *et al.*, 2016).

A multiplicidade de interesses concorrentes dos *stakeholders* pode representar um obstáculo à inovação e, nesse contexto, o governo pode tomar ações contraditórias (TSAKALIDIS; GKOUMAS; PEKÁR, 2020). Como exemplo, é possível observar que os governos tendem a subsidiar indústrias locais fortes, sejam elas automotivas, de aviação ou de transporte marítimo, muitas vezes participando diretamente do setor com estatais ou empresas de capital misto. Ao mesmo tempo, esses governos estabelecem medidas que forcem o setor a reduzir suas emissões de carbono, o que pode ter potenciais impactos no curto prazo e, por outro lado, promover a busca pela inovação.

Verweij, Loomans e Leendertse (2020) realizaram uma pesquisa sobre os fatores envolvendo o papel do ente público na inovação em transportes. De acordo com os resultados obtidos, as concessões a consórcios de empresas menores resultam em mais investimentos em inovação do que as concedidas a grandes empresas. Além disso, a influência do governo na inovação geralmente não é diretamente visível e ocorre por meio da gestão das interfaces entre as etapas do projeto.

A divisão rígida de responsabilidades entre grandes empresas envolvidas em contratos de DBFM (*design, build, finance, maintain*) pode ser prejudicial nesse quesito, uma vez que essa configuração não promove a colaboração a longo prazo (LOVE *et al.*, 2021b).

Esmalian *et al.* (2022) buscaram examinar as práticas adotadas por agências de transportes para incorporar a resiliência contra eventos climáticos incertos nos ativos. Os autores destacam uma limitação da literatura existente sobre como incorporar a resiliência no planejamento e desenvolvimento de projetos de transportes, bem como a falta de diretrizes e padrões para facilitar esse processo. Ressalta ainda que as organizações envolvidas precisam adotar uma abordagem sistemática com uso de ferramentas diversas para incorporar a resiliência, tendo em vista a complexidade das colaborações entre agências no setor de transporte.

Um levantamento mostrou que menos da metade das agências estaduais de transporte incorporaram medidas de resiliência em seus planos de transporte, e a maioria dos entrevistados reconheceu que suas organizações deveriam considerar a resiliência no planejamento de projetos de transporte. Distritos metropolitanos parecem ser mais conscientes e efetivos nessa implementação (ESMALIAN *et al.*, 2022). Além disso, notou-se que diferentes definições de resiliência levaram agências a implementar suas próprias versões do conceito (ESMALIAN *et al.*, 2022).

Há uma lacuna em termos de estruturas e ferramentas para avaliar sistematicamente a vulnerabilidade da rede viária. Dentre os modelos existentes alguns requerem processos iterativos e outros o desenvolvimento de árvores de decisão, onde um pequeno número de escolhas discretas pode ser feito (NIPA; KERMANSHACHI; KARTHICK, 2022). Além disso, a falta de recursos e financiamento adequados também pode ser um obstáculo para a incorporação da resiliência em projetos de transporte (ESMALIAN *et al.*, 2022).

A exclusão da resiliência no planejamento pode conduzir a consequências socioeconômicas perigosas se a infraestrutura interconectada for severamente danificada. Para projetar um sistema de infraestrutura resiliente, as medidas pré-evento que aumentam a resiliência e as ações de recuperação pós-evento devem ser considerados simultaneamente pelos planejadores e gestores no processo de tomada de decisão (NIPA; KERMANSHACHI; KARTHICK, 2022).

Por meio de entrevistas com profissionais envolvidos na gestão de transportes foi reconhecido que a grande maioria concordava com o princípio de que "melhorar a resiliência é melhor do que investir em recuperação" (NIPA; KERMANSHACHI; KARTHICK, 2022). No entanto, não houve concordância sobre como investir na prática em resiliência, ou sobre prever reservas de investimento para isso. Ainda, notou-se que as opiniões relativas à resiliência dos transportes dependiam principalmente da posição/função das pessoas nas organizações (NIPA; KERMANSHACHI; KARTHICK, 2022).

Investimentos para o aumento da resiliência são efetuados por causa de mudanças seja na probabilidade ou impacto dos riscos considerados anteriormente. Isso abre espaço para o uso de um modelo para avaliar e indicar medidas visando reduzir o valor a ser gasto, baseado em métricas financeiras (NIPA; KERMANSHACHI; KARTHICK, 2022). No entanto, outros fatores como interesses diversos entre *stakeholders* e atritos processuais complicam a situação real de tomada

de decisão, fazendo com que, na realidade, uma análise somente não seja o suficiente para determinar a materialização do investimento recomendado (PALIN *et al.*, 2021).

A multiplicidade de opções, interesses e opiniões pode dificultar ou tornar inviável a implementação efetiva do FP em sistemas de transportes, por não se conseguir chegar à efetiva tomada de decisão. Mesmo assim, um modelo para apoiar na avaliação de medidas e suporte na tomada de decisão de FP é destacado como uma parte essencial para avançar frente a esses problemas, pois permite a compreensão cuidadosa dos diversos fatores envolvidos e a avaliação rigorosa das alternativas disponíveis.

## 2.6 AVALIAÇÃO DE PROPOSTAS DE *FUTURE-PROOFING*

A avaliação (*valuation*), processo frequentemente utilizado na engenharia para atribuir um valor monetário a algo, seja tangível ou intangível, é uma ação necessária para determinar o valor dos projetos em relação ao ganho econômico e lucro que trazem às partes interessadas. Esse é um processo que exige uma abordagem multidisciplinar e não é restrito a um único tipo de profissional ou metodologia (CRUNDWELL, 2008).

No contexto de grandes projetos de transportes com alto CAPEX, diversos processos de avaliação são necessários para obter e alocar o capital necessário, seja esse um capital próprio ou proveniente de financiamento (LYONS; DAVIDSON, 2016). Para isso, o método de avaliação escolhido pode ser chave no correto entendimento do valor, pois há o risco de considerar-se de forma insuficiente as dinâmicas de mercado mais sensíveis a mudanças, incertezas e interações entre *stakeholders*.

A Análise Custo-Benefício é um método comumente utilizado em empreendimentos de transportes e avalia fatores amplos, como efeitos e repercussões de curto e longo prazo sobre as empresas, usuários e região afetada (CRUNDWELL, 2008). Se utilizada de forma determinística, a Análise Custo-Benefício pode ter limitações significativas quando se trata de avaliar projetos de FP, devido ao alto grau de incerteza desses. Por exemplo, em um cenário de rápida evolução tecnológica pode ser inviável determinar que tecnologias serão relevantes e adequadas em momentos futuros.

Já a prática de avaliação baseada em análises probabilísticas é ainda objeto de desconfiança em determinados cenários. Por exemplo, parar avaliar a

vulnerabilidade de uma estrutura ao aumento do nível do mar, a adoção da melhor estimativa probabilística para esse parâmetro é a prática corrente, mas pode trazer fragilidade e um falso senso de segurança caso a estimativa não seja precisa (RANGER; REEDER; LOWE, 2013).

Dessa forma, há uma preferência por restringir os esforços de avaliação a casos em que os cenários determinísticos se mostram mais efetivos e trazem menores chances de arrependimento ou que evitem a percepção de desperdício de recursos, mesmo que esses envolvam grandes investimentos de capital (PENNINGS; WIEGMANS; SPIT, 2020).

Há medidas de FP consideradas mais certeiras e que podem ser consideradas por processos de avaliação mais determinísticos (PENNINGS; WIEGMANS; SPIT, 2020). Por exemplo, previsões para futura ampliação de terminais e pistas de aeroportos (ZAHARIA; PIETREANU, 2018), áreas para novas plataformas em um metrô (BIESEK, 2012) e a escolha de soluções estruturais que facilitem posterior reforço e alteração (SREEVES, 2007).

Em novos projetos de transportes é frequentemente sugerido que o processo de decisão é facilitado quando os investimentos são considerados e já determinados o quanto antes durante as fases de projeto (GHAZY *et al.*, 2022). No entanto, é comum que as discordâncias entre partes travem esse processo ou diminuam sua validade (FANKHAUSER; SMITH; TOL, 1999) (RANGER; REEDER; LOWE, 2013).

Há também visões emergentes de como implementar o FP que propõe uma abordagem contrária a fixar soluções específicas o quanto antes. Com o uso de recursos tecnológicos envolvendo equipamentos e dados, há soluções de propósito amplo e que não requerem alto investimento em soluções físicas (ZAHARIA; PIETREANU, 2018). Um exemplo são os sistemas de monitoramento, que vêm sendo amplamente estudados como facilitadores de prognóstico das condições de ativos, desde pequenas estruturas até o nível de redes de transporte (ACHILLOPOULOU *et al.*, 2020).

Essa capacidade de propor investimentos e ações com base no monitoramento e aprendizado é uma característica não só desejável, mas também com um valor financeiro quantificável, que recebe o nome de opção (KRYSTALLIS; LOCATELLI; MURTAGH, 2022). A teoria de opções reais (*Real Options Theory* ou ROT) é atualmente a mais utilizada para avaliar tais opções embutidas em ativos tangíveis e de alto valor (CARMICHAEL, 2020).

Com base nessa metodologia de avaliação, considera-se o futuro do ativo e a capacidade de um gestor consciente interferir nas características desse ao longo do tempo e em cenários diversos. Essa análise fornece não só um valor financeiro associado aos investimentos, mas também direcionamento aos gestores sobre quando realizar esse investimento/alteração ou não (ČULÍK, 2016). A análise é inspirada na ciência das opções financeiras, que são características dos mercados de ações e commodities.

Em ROT o termo “reais” deriva do termo *real estate*, utilizado para descrever ativos imóveis em inglês. Embora haja diversas similaridades entre as teorias de opções financeiras e opções reais, incluindo algumas nomenclaturas, há também diferenças conceituais e de modelagem (GREDEN; GLICKSMAN, 2005).

A seguir, são apresentados alguns estudos que ilustram a aplicação de modelos de ROT em transportes.

- Combinação de opções na construção de uma ferrovia de alta velocidade em Taiwan (BOWE; LEE, 2004): para avaliação da viabilidade usando ROT os autores consideraram opções de expansão e opções de abandono do projeto. A análise mostrou que a combinação de opções resultou em maior valor para o projeto do que a análise convencional de fluxo de caixa descontado.
- Investimento inicial em pesquisa e desenvolvimento (P&D) para sistemas inteligentes anticolisão em rodovias (DE NEUFVILLE *et al.*, 2008): embora a probabilidade de sucesso fosse baixa, o investimento abria opções futuras para novos desenvolvimentos tecnológicos no setor de transportes.
- Garantias contratuais de demanda mínima e capacidade de renegociação de contratos (BRANDÃO *et al.*, 2012; XIONG; ZHANG, 2016): uso de ROT em projetos de sistemas de transportes. A análise demonstrou que essas opções podem aumentar o valor do projeto e a sua resiliência a eventos futuros incertos.

É importante notar que a ROT foi utilizada por tais autores para mensurar o benefício no âmbito da rentabilidade, gestão e segurança do sistema, de maneira

precificada, ao se realizar um investimento com incertezas relacionadas ao tempo e seu valor.

Outros autores já registraram a sugestão de utilizar ROT para avaliar e justificar investimentos que visam elevar a resiliência e adaptação em transportes (KRYSTALLIS; LOCATELLI; MURTAGH, 2022; MACHIELS; COMPERNOLLE; COPPENS, 2021). No entanto, há poucas pesquisas que tratam sobre esse assunto e ainda não há um padrão aceito, que possa direcionar a avaliação e servir de apoio para a tomada de decisão sob incerteza envolvendo FP (PENNINGS; WIEGMANS; SPIT, 2020).

De maneira alternativa, uma abordagem não analítica para a avaliação de opções, chamada de raciocínio de opções reais (*real-options reasoning* ou ROR), pode ser usada para grandes projetos em transportes, evitando a formulação matemática pela teoria de opções reais (KRYSTALLIS; LOCATELLI; MURTAGH, 2022). Nesse método uma pessoa concentra a responsabilidade de mediar a discussão de opções, apresentando e promovendo as opções existentes em busca de motivar os diversos *stakeholders* a investir nelas. Nesse processo são utilizados recursos mais simples do que a modelagem matemática probabilística, como as árvores de decisão. A discussão segue até que as opções sejam confirmadas ou rejeitadas (BIESEK, 2012).

Ainda não está determinado na literatura quanto o método de ROR pode ser útil para chegar-se à decisão. Porém, há indicativos de que pode sim beneficiar a tomada de decisão quando acompanhado de um processo que direciona essa análise (BIESEK, 2012).

Em geral, a avaliação desempenha diversos papéis no FP de transportes. Ela possibilita quantificar custos, benefícios e riscos dos investimentos, além de analisar o impacto da integração de tecnologias inovadoras. Ao apresentar os dados de forma clara, a avaliação estimula discussões e negociações entre as partes interessadas, facilitando a alocação eficiente de recursos para o FP. Além disso, uma avaliação formalizada pode servir de base para monitorar o desempenho dos sistemas de transportes ao longo do tempo e estabelecer indicadores de desempenho para acompanhamento do sistema.

### 3 MÉTODO

Esse capítulo descreve as bases metodológicas para a elaboração dessa dissertação.

### 3.1 CLASSIFICAÇÕES DESSA PESQUISA

Silva e Menezes (2001) expõem que uma pesquisa pode ser especificada segundo quatro categorias, como apresentado no Quadro 1.

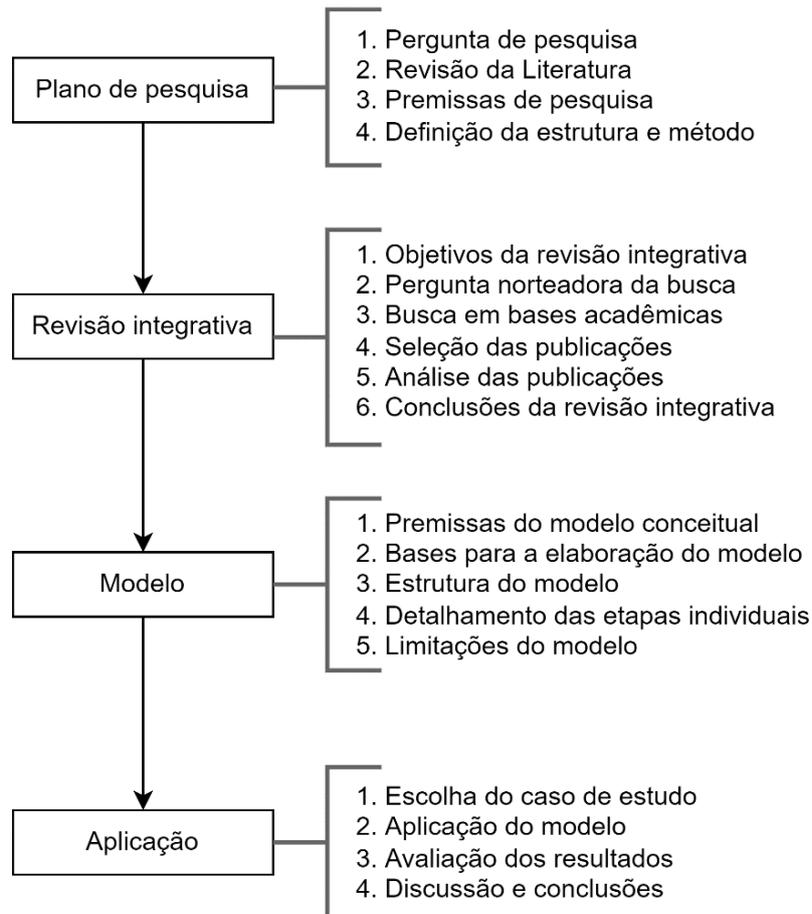
Quadro 1 - Classificação da dissertação quanto às suas categorias de pesquisa

<b>Categoria</b>	<b>Tipo</b>	<b>Justificativa</b>
<b>Natureza</b>	Aplicada	Teve o objetivo de criar um modelo conceitual voltado para a aplicação prática em um problema específico, o do FP em sistemas de transportes
<b>Abordagem</b>	Qualitativa	A pesquisa que resultou no modelo conceitual se deu através de uma análise sistemática, porém baseada no ponto de vista do autor, sobre as opiniões e práticas descritas na literatura. Buscou-se ponderar as opiniões e interesses que envolvem o assunto de FP em transportes para descrever uma relação lógica entre os processos que envolvem tomada de decisões e avaliação de eventos incertos.  Quanto ao modelo em si, busca-se trazer o viés quantitativo como ferramenta para auxiliar na ponderação de resultados que envolvem incertezas, de forma a garantir-se um processo assertivo e auditável
<b>Objetivos</b>	Descritiva	Buscou estabelecer relações entre variáveis, por exemplo: como a probabilidade de ocorrência e o impacto previsto de um evento têm relação com a importância desse evento no contexto de uma decisão administrativa e/ou regulatória
<b>Procedimentos técnicos</b>	Pesquisa Bibliográfica	O instrumento principal utilizado para levantar as bases práticas e teóricas foi a revisão integrativa

Fonte: autor com base em Silva e Menezes (2001)

Na Figura 2 é apresentada a estrutura da pesquisa.

Figura 2 - Estrutura da pesquisa



Fonte: autor

### 3.2 ETAPA DA REVISÃO INTEGRATIVA

Nessa dissertação a revisão integrativa foi a técnica adotada para avaliar o cenário atual de FP de transportes. A revisão integrativa é uma técnica que surgiu como uma alternativa para revisar e combinar estudos com diversas metodologias. Ao combinar dados da literatura empírica e teórica, a revisão integrativa pode definir conceitos, identificar lacunas nas áreas de estudo, revisar teorias e analisar metodologicamente os estudos em um determinado tópico (UNESP, 2015).

Essa modalidade tem o potencial de promover revisões em várias áreas do conhecimento, mantendo o rigor metodológico das revisões sistemáticas (UNESP, 2015). Com o uso de uma amostra abrangente que combina publicações com

abordagens diversas, pode-se proporcionar uma compreensão sólida e coerente de conceitos complexos, teorias ou questões técnicas (SOUZA; DIAS; CARVALHO, 2010). Inclusive, uma revisão integrativa pode ser conduzida com objetivos diversos, como definir conceitos, rever teorias ou realizar análises metodológicas dos estudos incluídos em um tópico específico (UNESP, 2015).

Buscou-se, com a revisão integrativa, entender o escopo atual da literatura e seus agrupamentos, inclusive de como o conceito de FP é abordado no contexto de transportes. As principais publicações foram analisadas e comparadas em detalhe para delimitar qualitativamente as lacunas na literatura atual e estabelecer uma base teórica para a proposição do modelo. Cuidou-se com o ressaltado por Souza e Dias e Carvalho (2010) sobre extrair os dados de forma precisa e evitar erros na transcrição de informações.

Quanto aos objetivos que motivaram o uso dessa técnica de revisão, pode-se descrever:

- a) objetivo principal: extrair as bases conceituais para a criação de um modelo de análise e apoio à tomada de decisão de FP
  
- b) outros objetivos:
  - 1) identificar os fatores que motivam o FP em transportes;
  - 2) propor uma definição para o termo no contexto de transportes, e
  - 3) identificar e descrever as principais lacunas da literatura atual.

A busca em base de dados deve ser ampla e diversificada para garantir a confiabilidade e fidedignidade dos resultados. Essa pode incluir bases eletrônicas, periódicos, referências obtidas a partir dos estudos selecionados e até o contato com pesquisadores e material não-publicado. Se não for possível incluir todos os estudos encontrados, os critérios de inclusão e exclusão devem ser claramente expostos e discutidos (SOUZA; DIAS; CARVALHO, 2010). Ainda, a definição de uma pergunta norteadora é crucial, pois determina quais estudos serão incluídos, os métodos utilizados e informações coletadas. Isso dependerá do raciocínio teórico e conhecimentos prévios do pesquisador (SOUZA; DIAS; CARVALHO, 2010).

A revisão foi limitada a publicações acadêmicas da literatura internacional contidas nas bases *Scopus* e *Web of Science*, com última busca em março de 2023.

Foram buscadas publicações que dentro do processo de revisão integrativa pudessem responder à pergunta:

*Qual o estado atual da literatura de FP em transportes?*

Para isso foram escolhidas as publicações que apresentavam o termo “*future-proof\**” em qualquer local do texto e “*transport\**” nos resumos e títulos das publicações. Os asteriscos serviram para incluir opções como *future-proof*, *future-proofing*, *transport* e *transportation* nos termos de busca, pois são verificadas diferentes grafias na literatura para os mesmos contextos dependendo do autor ou do país em questão.

Pelo sistema de filtros da base de dados Scopus alguns tópicos não correlatos com transportes, como ciências médicas e biológicas, foram eliminados automaticamente. Como a Web of Science apresentou menos artigos na busca, optou-se por não aplicar os filtros disponíveis na plataforma de busca. Buscou-se por publicações de 2022 ou anteriores, não havendo limitação quanto à data mais antiga. Seguem abaixo os *strings* de busca usados para cada base de dados:

- Scopus: ( ALL ( future-proof\*) AND TITLE-ABS-KEY ( transport\*)) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENGI") OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "SOC") OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENVI") OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENER") OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "BUSI") OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "DECI") OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ECON"))
- WoS: (ALL=("future-proof\*" OR "futureproof\*")) AND AB=(transport\*)

A busca conjunta entregou 313 resultados, que após excluídas as entradas repetidas resultaram em 295 publicações de artigos de periódicos, artigos de conferências e capítulos de livros.

Partiu-se então para um critério de exclusão por aderência ao tema. Os artigos excluídos ou não tratavam sobre o setor de transportes ou então tinham foco exclusivamente em aspectos tecnológicos, como eletrônica para veículos ou comunicação wireless. Restaram para a análise 105 publicações com aderência ao tema de interesse.

### 3.3 ETAPA DE ELABORAÇÃO DO MODELO

A criação de modelos conceituais pode ser vista como o propósito de uma pesquisa qualitativa, que dá sentido e generaliza os achados (GREEN, 2014), ou como uma “estrutura do que foi aprendido que explica melhor a progressão natural de um fenômeno estudado” (GRANT; OSANLOO, 2014).

Um modelo conceitual é normalmente representado em uma forma diagramática e elaborado a partir de resultados da pesquisa, da modificação de um modelo conceitual anterior ou a combinação de partes de dois ou mais modelos. Há também outras formas de representar o modelo, como símbolos, desenhos e até textualmente (SOUZA; STRUCHINER, 2021).

O modelo de avaliação e apoio à tomada de decisão em FP foi elaborado e proposto a partir de informações e modelos conceituais anteriores, retirados de uma parte da literatura selecionada no processo de revisão integrativa, com a adição de algumas publicações referenciadas por essa literatura. Aqui entende-se tomada de decisão como o processo pelo qual um indivíduo, grupo ou organização chega a conclusões sobre as ações futuras a seguir, geralmente de maneira iterativa, envolvendo a definição do problema, coleta de informações, tomada de decisão e aprendizado a partir da experiência (SCHOEMAKER; RUSSO, 2014).

Para Souza e Struchiner (2021) a revisão da literatura, que pode ou não ser sistemática, busca ampliar o conhecimento do pesquisador sobre a abordagem do tema em estudo na literatura, bem como aprimorar seus conhecimentos das variáveis, conceitos e dimensões do tema. Ainda, os autores consideram que o “conhecimento prévio do pesquisador, é uma variável importante e que deve ser explorada e explicitada na elaboração do Modelo Teórico.” Alinhado a esse raciocínio, entendeu-se que a revisão integrativa gerou um novo conhecimento que foi suficiente para suprir a elaboração do modelo conceitual. Utilizou-se então a comparação e confronto entre modelos e recomendações já propostos de forma a construir um novo, conforme descrito por Souza e Struchiner (2021).

Tal processo, segundo Kothari (2004) é considerado válido para a elaboração de um modelo, por utilizar informações relevantes, atuais e com posições diversas, complementares e em vezes discordantes sobre o tópico.

O modelo busca cobrir todas as etapas lógicas e sequenciais que um usuário deve executar para que realize adequadamente a avaliação de FP. Ainda, procurou-

se utilizar o suporte da literatura para que cada etapa da análise esteja condicionada a um processo sistemático e auditável. Para isso, o modelo faz uso de abordagens quantitativas e qualitativas, considerando que a incerteza e subjetividade são inerentes ao processo. O registro adequado dos passos permite resultados repetíveis por outro grupo que siga o processo com premissas semelhantes.

Buscou-se que o modelo fosse aplicável por usuários diversos, desde equipes internas a uma organização até analistas externos que desejam obter dados mais rápidos que, ainda que menos precisos, seguem a mesma forma sistemática de análise. Ainda, um usuário pode iniciar a análise de qualquer das etapas sequenciais do modelo, desde que já detenha as saídas da fase anterior.

Buscou-se que o modelo fosse válido, no que se refere à relevância das ferramentas de análise, e confiável, em relação ao processo sistemático de registro e uso de informações e premissas que ficam a cargo do usuário. A “validade de conteúdo” pode ser interpretada como a medida em que um instrumento de medição oferece uma cobertura adequada do tópico em estudo (KOTHARI, 2004). Assim, se o instrumento é aplicável a uma amostra representativa do universo, a validade de conteúdo é boa. Sua determinação é principalmente baseada em julgamento e intuição, sem uma maneira numérica de expressá-la (KOTHARI, 2004). Para comprovar a validade do modelo proposto, foi conduzida uma aplicação prática, de maneira sistemática e com o registro detalhado das informações e pressupostos utilizados. Pôde-se também evidenciar a relevância das ferramentas de análise e a confiabilidade do processo para um cenário conforme delimitado.

A confiabilidade dos instrumentos refere-se a fornecer resultados consistentes, dado processos repetidos da mesma pessoa e com o mesmo instrumento, ou processos comparáveis quanto utilizada por pessoas ou grupos diferentes (KOTHARI, 2004). Buscou-se a validade e confiabilidade do modelo proposto segundo as definições acima e que o modelo fosse prático de utilizar, em outros termos, que fosse econômico, conveniente e interpretável (KOTHARI, 2004).

Um fator de complicação para escolhas estratégicas é a aversão natural das pessoas à ambiguidade. Em um modelo que supõe a total racionalidade dos decisores, a ambiguidade não é levada em conta e, portanto, projetos que envolvem alta ambiguidade decorrentes de incertezas diversas, provavelmente estarão fadados a erros sistemáticos dos avaliadores (SCHOEMAKER; RUSSO, 2014).

É comum que em grandes projetos, como os de transportes, a teoria econômica consiga estabelecer de maneira satisfatória a taxa de desconto para refletir o custo de capital, mas ofereça pouca orientação sobre como estimar fluxos de caixa ou o valor de opções futuras (SCHOEMAKER; RUSSO, 2014). Além disso, o problema pode não ser apenas a avaliação das alternativas explicitamente consideradas, mas sim problemas em restringir o número de opções efetivamente avaliadas (SCHOEMAKER; RUSSO, 2014).

Para a tomada de decisão sob tal cenário incerto, um processo de delimitação e seleção das opções pode ocorrer sob a orientação de um diagrama de influências ou fluxograma, que são representações gráficas comumente utilizadas em problemas de análise de decisão. Elas também podem servir de base para um modelo quantitativo quando necessário (SHACHTER, 1988).

Em um modelo quantitativo de análise de decisão as incertezas são representadas por meio de probabilidades subjetivas. O decisor então age escolhendo a opção cujas consequências têm a máxima utilidade esperada, ou seja, que maximizam a probabilidade de atingir o resultado esperado, podendo-se usar metas para direcionar essa avaliação (BORDLEY; LICALZI, 2000).

Uma fragilidade no processo decisório é o viés de confirmação, em que uma análise favorável na visão do decisor, aliado à falta de conhecimento, induz a uma escolha não ótima. Isso pode ser resolvido parcialmente através de um feedback repetido (como em previsões diárias do tempo) ou por um questionamento das premissas através de construção de cenários diversos e uso de estruturas em árvore para suporte à decisão (SCHOEMAKER; RUSSO, 2014).

O modelo proposto nessa dissertação utiliza um fluxograma dividido em seis etapas sequenciais. No entanto, ele não reflete somente um processo sequencial, pois um usuário que já detenha as informações das etapas iniciais pode fazer uso disso para começar a análise em uma etapa mais adiantada. Além disso, é possível utilizar as etapas de maneira independente. O modelo proposto segue os princípios metodológicos e de conteúdo discutidos nesse capítulo.

No capítulo 5, referente ao Modelo, é apresentado o modelo de avaliação e apoio à tomada de decisão de FP. Como base para a proposição do modelo foram utilizadas as experiências e proposições já existentes na literatura, que foi considerada relevante e apropriada para essa finalidade. De forma complementar, foram trazidas referências de normas e relatórios atuais publicados. Algumas

publicações figuram dentre as principais referências para a estrutura, ordem e conteúdo das etapas propostas para o modelo (ADEY *et al.*, 2019; EU, 2021; GHAZY *et al.*, 2022; LOVE *et al.*, 2021a; MARTANI *et al.*, 2021; PENNING; WIEGMANS; SPIT, 2020; SHAH *et al.*, 2014). Mais detalhes sobre as bases da literatura se encontram no capítulo 5 dessa dissertação.

### 3.4 ETAPA DA APLICAÇÃO DO MODELO

Um modelo conceitual permite não só a avaliação do problema em si, mas também que a teoria por trás desse modelo seja medida, testada e expandida (GRANT; OSANLOO, 2014). A aplicação do modelo dessa dissertação teve o intuito de validar a sequência lógica dos passos descritos e demonstrar a amplitude de considerações que ele permite. Ainda, buscou-se validá-lo em relação a um de seus casos de uso propostos, o da avaliação realizada por um analista externo.

Considera-se que um modelo conceitual só pode ser validado consistentemente quando testado por terceiros, que também darão recomendações para a alteração desse (GRANT; OSANLOO, 2014). Para Filho e Struchiner (2021) esse processo de aplicação e resposta deve ser feito por especialistas na área. Essa é uma limitação da presente dissertação, que fez uma validação interna e simulada, com a aplicação em um caso sem supervisão ou revisão externa.

Para a aplicação do modelo foi escolhido o projeto da Nova Ferroeste, ferrovia que substituirá e ampliará uma estrutura já existente no estado do Paraná. Esse projeto se adequa ao propósito do método, sendo um sistema de transporte de alta relevância econômica e social, com longo período operacional. No momento da escrita desta dissertação, a ferrovia ainda está em uma fase pré-projeto executivo, momento em que a implementação de FP tende a ser mais efetiva. Mais detalhes sobre o caso de estudo e a aplicação do modelo se encontram no capítulo 6 desta dissertação.

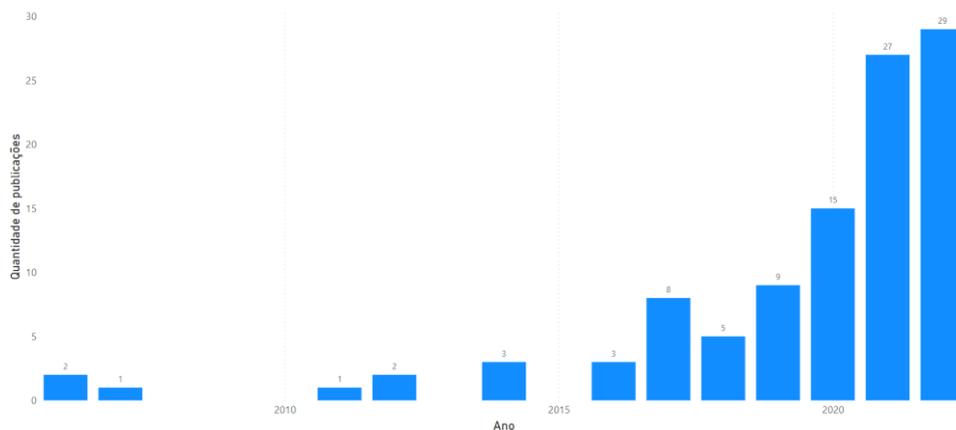
## 4 REVISÃO INTEGRATIVA: DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados o desenvolvimento da revisão integrativa, a análise por tópicos motivadores do FP, uma proposta de definição de FP para transportes e uma discussão sobre as atuais lacunas da literatura para modelos de apoio à análise e tomada de decisão no tópico.

### 4.1 DESENVOLVIMENTO DA REVISÃO INTEGRATIVA

Das 105 publicações selecionadas pelo processo descrito na seção 3.2 dessa dissertação, 90 (86%) são de 2016 ou data mais recente, sendo que 71 (68%) datam entre 2020 e 2022, com números crescentes ano após ano a partir de 2016. As publicações anteriores a 2016 foram esporádicas, sendo um total de nove com a mais antiga de 2006, como mostra a Figura 3. Isso indica que a discussão acadêmica envolvendo FP em transportes se tornou ativa há menos de duas décadas e gera um interesse crescente na academia, principalmente desde 2016.

Figura 3 - Quantidade de publicações que abordam FP em transportes por ano da publicação



Fonte: elaborado pelo autor

Identificou-se que há autores que detêm uma proporção significativa das publicações. Love, P.E.D. é o que mais aparece, em 16 artigos (15%) como autor principal e em mais 7 artigos (7%) como coautor. Entende-se que essa alta representatividade pode trazer a questão de vieses de autores e grupos de pesquisa para o tópico.



Quadro 2- Dados dos 20 principais artigos da revisão

Índice	Autores	Título	Ano	Palavras-chave originais
1	Miklautsch P., Woschank M.	<i>Decarbonizing Industrial Logistics</i>	2022	<i>Climate change; decarbonization; logistics; technology</i>
2	Ghazy S., Tang Y.H., Mugumya K.L., Wong J.Y., Chan A.	<i>Future-proofing Klang Valley's veins with REBET: A framework for directing transportation technologies towards infrastructure resilience</i>	2022	<i>Brittleness; Delphi technique; Emerging technologies; Infrastructure resilience; Transportation; Urban mobility</i>
3	Schurig S., Turan K.	<i>The concept of a 'regenerative city': How to turn cities into regenerative systems</i>	2022	<i>Climate change; Health; Local action; Regenerative city; Sustainability; Urban transition</i>
4	Love P.E.D., Ika L.A., Matthews J., Li X., Fang W.	<i>A procurement policy-making pathway to future-proof large-scale transport infrastructure assets</i>	2021	<i>Assets; Australia; Future-proofing; Policy-making pathway; Procurement</i>
5	Martani C., Adey B.T., Robles I., Gennaro F.D., Pardi L., Beltran-Hernando I., Toribio-Diaz C., Redondo N.J., Díaz A.A.M.	<i>Estimating the resilience of, and targets for, a transport system using expert opinion</i>	2021	<i>hazards; risk &amp; probability analysis; transport management</i>
6	Nkurunziza D., Tafahomi R., Faraja I.A.	<i>Identification of challenges and opportunities of the transport master plan implementation in the city of Kigali-rwanda</i>	2021	<i>Kigali; Road network; Transport master plan; Urban planning</i>
7	Shaikh P.W., Mouftah H.T.	<i>Intelligent Charging Infrastructure Design for Connected and Autonomous Electric Vehicles in Smart Cities</i>	2021	<i>Autonomous Mobility on Demand; Cabled Charging; Connected and Autonomous Electric Vehicle; Dynamic Wireless Charging; Intelligent Transportation System; Internet of Things; Shared Autonomous Electric Vehicle; Smart City; Static Wireless Charging; Vehicle to Grid; Vehicle to Infrastructure</i>
8	Love P.E.D., Ika L., Matthews J., Fang W.	<i>Shared leadership, value and risks in large scale transport projects: Re-calibrating procurement policy for post COVID-19</i>	2021	<i>Alliance; Economic value; Private participation in infrastructure; Procurement</i>
9	Chowdhury S., Zhu J.	<i>The Usage of Association Rule Mining towards Future-Proofed Transportation Infrastructure Planning</i>	2021	-
10	Pennings R., Wiegman B., Spit T.	<i>Can we have our cake and still eat it? A review of flexibility in the structural spatial development and passenger transport relation in developing countries</i>	2020	<i>Developing countries; Flexibility; Metropolitan areas; Passenger transport; Structural spatial development</i>
11	Gschösser F., Cordes T., Lumetzberger D., Tautschnig A., Bergmeister K.	<i>Railway transport systems' contribution to sustainable development</i>	2020	-
12	Bolshakova A.V., Boronachin A.M., Larionov	<i>Embedded Multiphysical Track Diagnostic Systems for Intelligent Transport</i>	2019	<i>Diagnostics; Embedded systems; Inertial sensor; MEMS; Odometer; Rail; SINS; Spectrum; Surface defect</i>

	D.Y., Podgornaya L.N., Shalymov R.V.			
13	Bolsin N.	<i>Designing national guidelines for automated vehicle trials in Australia</i>	2018	<i>Australia; Automated vehicles; Data; Insurance; Intelligent transport systems; Transport; Trials</i>
14	Love P.E.D., Zhou J., Matthews J., Lavender M., Morse T.	<i>Managing rail infrastructure for a digital future: Future-proofing of asset information</i>	2018	<i>Asset management; Digitization; Future-proof; Rail; System information model</i>
15	Love P.E.D., Ahiaga-Dagbui D., Welde M., Odeck J.	<i>Light rail transit cost performance: Opportunities for future-proofing</i>	2017	<i>CAPEX performance; Digitization; Future-proofing; Light rail transit; OPEX</i>
16	Shah J., Jefferson I., Ghataora G., Hunt D.	<i>Resilient geotechnical infrastructure asset management</i>	2014	-
17	Siciliano, V; Roche, E; Buchhorn, M; Cataldo, F	<i>PROTECTRAIL - The Railway-Industry Partnership for Integrated Security of Rail Transport</i>	2012	<i>Protectrail; Railway Security; Integrated Security</i>
18	Garstenauer J., Počuča S.	<i>The future of railway communications</i>	2011	-
19	Sreeves J.	<i>Future-proof: Upton upon Severn viaduct, UK</i>	2007	<i>Bridges; Roads &amp; highways; Steel structures</i>
20	Ponsford A., Kunur M.	<i>Mobilicity PPT automated transport system</i>	2006	<i>Automated transportation systems; Environmental impact; Public transport; Series HEVs; Sustainable mobility</i>

Fonte: elaborado pelo autor

Conduzindo-se uma avaliação detalhada sobre o conjunto das 20 publicações principais, observou-se que o termo FP carece de uma definição formal em 18 delas (90%). Os dois artigos que mostram tal definição são: Love *et al.* (2017), que trazem como referência a definição apresentada por Masood *et al.* (2016), para o FP de infraestruturas em geral, apresentado no capítulo 2 dessa, e Siciliano *et al.* (2012), que restringem o FP em transportes a endereçar “ameaças e comportamentos antissociais que se alteram de forma diária”, fazendo alusão a ameaças de ataques terroristas a sistemas de transportes.

Em 14 (70%) dessas publicações, o termo aparece entre uma ou duas vezes no corpo do artigo, havendo também os casos em que o termo é usado com mais frequência, como em Love *et al.* (2017) e Chowdhury e Zhu (2021), com 26 e 13 usos, respectivamente.

Ficou evidente durante a revisão integrativa que o conceito de FP em transportes ainda não é padronizado. Ainda, esse é dependente do contexto que está sendo usado e do que motiva o FP.

Mesmo com essa lacuna conceitual, publicações científicas e programas governamentais fazem uso do termo sem delimitá-lo propriamente. Martani *et al.* (2021), por exemplo, é um artigo com foco em FP e publicado como resultado de um projeto de pesquisa financiado em 2020 pela União Europeia (UE) em cinco milhões de euros, intitulado "*Future Proofing Strategies for Resilient Transport Networks against Extreme Events*". No entanto, nem o artigo nem a página oficial do projeto da UE definem FP formalmente (UE, 2022). Enquanto o interesse no tópico aumenta e o volume de publicações anuais cresce de forma consistente, ainda há uma incerteza quanto à delimitação e definição do termo FP. Entende-se que essa é uma lacuna na literatura atual que é atendida no presente trabalho.

No contexto da revisão integrativa, buscou-se reduzir, expor e comparar os achados. Para simplificar a análise, as publicações foram divididas em subgrupos e classificadas de acordo com uma categorização, conforme proposto por Souza, Dias e Carvalho (2010).

Inicialmente, foram delimitados os contextos em que o FP de transportes é discutido com ênfase em determinar quais são os principais motivadores do FP apresentados pela literatura. Através de uma avaliação qualitativa dos artigos foi possível propor quatro categorias de Motivadores do FP, sendo essas:

- Licitação e Gestão;
- Questão ambiental;
- Tecnologia e Inovação, e
- Políticas sociais.

A análise da literatura que justifica as categorias propostas está apresentada abaixo. O Quadro 3 demonstra a correspondência entre cada artigo e o principal Motivador do FP por trás dele. Ressalta-se que nem sempre há uma única categoria atribuível a um artigo, assim, o Quadro 3 apresenta a categorização mais relevante para o artigo, levando em conta seu conteúdo e sua relação com o restante da literatura. Interpretou-se que um dos artigos selecionados não se encaixa nessa categorização por ser um artigo de revisão sobre FP.

Quadro 3 - Correspondência entre publicações e Motivadores de FP

Título	FP associado com termos	Fator Motivador do FP (principal)
<i>A procurement policy-making pathway to future-proof large-scale transport infrastructure assets</i>	ativos	Licitação e Gestão
<i>Light rail transit cost performance: Opportunities for future-proofing</i>	OPEX; dados	Licitação e Gestão
<i>Managing rail infrastructure for a digital future: Future-proofing of asset information</i>	infraestrutura ferroviária; políticas	Licitação e Gestão
<i>Shared leadership, value and risks in large scale transport projects: Re-calibrating procurement policy for post COVID-19</i>	ativos	Licitação e Gestão
<i>Estimating the resilience of, and targets for, a transport system using expert opinion</i>	resiliência	Licitação e Gestão
<i>Resilient geotechnical infrastructure asset management</i>	infraestrutura; gestão de ativos	Licitação e Gestão
<i>Decarbonizing Industrial Logistics</i>	descarbonização; logística industrial	Questão ambiental
<i>Railway transport systems' contribution to sustainable development</i>	sustentabilidade; meio ambiente	Questão ambiental
<i>Designing national guidelines for automated vehicle trials in Australia</i>	veículos conectados	Tecnologia e Inovação
<i>Embedded Multiphysical Track Diagnostic Systems for Intelligent Transport</i>	tecnologia	Tecnologia e Inovação
<i>Intelligent Charging Infrastructure Design for Connected and Autonomous Electric Vehicles in Smart Cities</i>	operacional; compatível	Tecnologia e Inovação
<i>Mobilicity PPT automated transport system</i>	tecnologia	Tecnologia e Inovação
<i>The future of railway communications</i>	segurança; confiabilidade	Tecnologia e Inovação
<i>Future-proofing Klang Valley's veins with REBET: A framework for directing transportation technologies towards infrastructure resilience</i>	adaptação	Tecnologia e Inovação
<i>Future-proof: Upton upon Severn viaduct, UK</i>	reforço	Políticas sociais
<i>Can we have our cake and still eat it? A review of flexibility in the structural spatial development and passenger transport relation in developing countries</i>	flexibilidade	Políticas sociais
<i>Identification of challenges and opportunities of the transport master plan implementation in the city of Kigali-rwanda</i>	mudanças climáticas; sustentabilidade	Políticas sociais
<i>PROTECTRAIL - The Railway-Industry Partnership for Integrated Security of Rail Transport</i>	segurança	Políticas sociais
<i>The concept of a 'regenerative city': How to turn cities into regenerative systems</i>	modelos	Políticas sociais
<i>The Usage of Association Rule Mining towards Future-Proofed Transportation Infrastructure Planning</i>	planejamento transportes	de Não se aplica (revisão da literatura)

Fonte: elaborado pelo autor

A seguir, é feita uma descrição detalhada dos temas para cada motivador.

## 4.2 LICITAÇÃO E GESTÃO COMO MOTIVADOR DE FP

Uma das principais justificativas da pesquisa em FP nessa categoria é a importância econômica e social do setor de transportes (LOVE *et al.*, 2021a). Pressões de natureza tecnológica e social já geram sobrecarga de sistemas de transportes, que combinadas com a falta de manutenção e atualização inadequada dos ativos de infraestrutura, traz consequências presentes como aumento de congestionamento e acidentes (LOVE *et al.*, 2018).

Há também uma preocupação futura quanto aos impactos econômicos e de bem-estar que isso pode gerar (SHAH *et al.*, 2014), a qual não está sendo tratada adequadamente por governos e organizações (LOVE *et al.*, 2021b). Isso justifica e motiva o estudo de iniciativas de FP sobre os principais sistemas de transportes (LOVE *et al.*, 2017) e a avaliação sistemática de suas vulnerabilidades (MARTANI *et al.*, 2021).

Destaca-se inicialmente que essa categoria conta com 4 artigos do mesmo autor principal Love, Peter E.D., dentro de um total de 6 artigos analisados nessa categoria. Optou-se então por avaliar essas publicações em conjunto, para então partir para outros autores e grupos de pesquisa.

Em Love *et al.* (2017) os autores expõem que é preciso otimizar o capital investido na construção da infraestrutura de transportes, seja por novos modelos de financiamento e licitação ou por integrações tecnológicas que permitirão a melhor governança sobre as atividades. É analisada a implantação de Veículos Leves sobre Trilhos (VLTs) em cidades, em que se sugere a realização de uma avaliação de medidas de FP cabíveis, com o intuito de aumentar a eficiência do capital no longo prazo. Ressalta-se que tanto o CAPEX quanto o *Operational Expenditure* (OPEX) devem ser considerados igualmente. Ainda, Love *et al.* (2017) sugerem que há quatro áreas chave que precisam ser consideradas no FP uma vez que é tomada a decisão de usar o VLT: Financiamento, Entrega, Digitalização e Gestão de Ativos.

Love *et al.* (2018) reforçam o argumento já contido em Love *et al.* (2017) de que alterações de projeto, erros e omissões na documentação que são identificados após a entrega de um empreendimento podem afetar negativamente as despesas operacionais (OPEX). Tais mudanças exigem que os desenhos e especificações *as-built* sejam alterados e atualizados.

Em diversos casos, no entanto, a documentação *as-built* é de baixa qualidade, normalmente em papel, e fornecida quando o ativo já está em uso. Isso contribui para que frequentemente a documentação não seja atualizada. Da mesma forma, informações sobre reparos ou adaptações posteriores são difíceis de localizar e manter, e quanto existem estão armazenadas de formas diversas, por exemplo, desenhos, planilhas de dados e ficheiros.

Além disso, quando a equipe responsável pela gestão do ativo tem sistemas de gerenciamento de manutenção de computadorizados essas informações precisam ser transferidas para os sistemas manualmente, que é uma atividade demorada, custosa e tendenciosa a erros humanos (LOVE *et al.*, 2018).

A pesquisa Love *et al.* (2018) culminou em um estudo de caso de renovação da documentação *as-built* da estação ferroviária Bayswater, em Perth. Foram utilizados 30 desenhos de engenharia *as-built* que documentaram os projetos de sistemas elétricos, controle e monitoramento, além da consulta a funcionários e engenheiros. Em tal caso, os autores apresentam como diferencial uma pesquisa de estudo de caso de gestão de ativos voltada para o FP. Isso difere da tendência mais comum na literatura em FP que é a discussão narrativa de potenciais medidas (GSCHÖSSER *et al.*, 2020) ou aplicações de metodologias em casos fictícios (MARTANI *et al.*, 2021).

Em Love *et al.* (2021a) segue-se uma linha argumentativa semelhante à apresentada por Love *et al.* (2017), de que o FP está intimamente ligado com formas inovadoras de licitação e gestão dos ativos a longo prazo, com grande atenção à interação com novas tecnologias.

Love *et al.* (2021a) reconhecem os esforços recentes de governos em países desenvolvidos para a construção e renovação dos ativos de transportes. Mesmo assim, fazem a crítica de que pouco foi mudado na forma de licitar tais iniciativas e que os formatos normais de licitação não deveriam ser aplicados como primeira opção para empreendimentos de grande escala e alta complexidade. Para os autores, o FP dos sistemas de transportes está intimamente ligado com os esforços públicos para melhorar a licitação, gestão e conservação dos ativos de transportes.

Identificando essa lacuna, Love *et al.* (2021a) realizaram uma revisão narrativa da literatura e propuseram uma estrutura conceitual de políticas públicas para a entrega de projetos de transporte de grande escala. Além de fatores tradicionais da gestão de projetos, como tempo e custos. Também propuseram que

as licitações já incluíssem a previsões para a gestão dos ativos combinada com facilitadores tecnológicos. O artigo então utiliza a literatura para apresentar opções de inovações tecnológicas que poderiam modernizar os processos de licitação, caso seus usos fossem previstos legalmente.

Algumas dessas propostas (LOVE *et al.*, 2021a) envolvem tópicos como o uso de Inteligência Artificial para análise preditiva, conectividade dos ativos e flexibilidade em contratos de Parcerias Público Privadas (PPP). O artigo se limita em apresentar e comentar as referências da literatura, pois não faz um juízo de valor dentre as diversas opções e não apresenta um modelo para a priorização e escolha dentre essas. Isso diverge do argumentado por outros autores que reforçam a necessidade de sistematizar a análise (SHAH *et al.*, 2014) e quantificar os impactos do FP (MARTANI *et al.*, 2021).

Em publicação complementar a Love *et al.* (2021a), Love *et al.* (2021b) retomam o argumento de licitações voltadas ao FP no contexto da emergência de COVID-19 na Austrália. Os autores defendem que os setores público e privado devem modificar coletivamente suas ações pois, como argumentado no artigo (LOVE *et al.*, 2021b), o setor público enfrentará restrições fiscais e não poderá mais absorver os riscos de aumento de custos em seus projetos de transporte em grande escala. Sugeriu-se então um esforço conjunto para a contingência orçamentária do setor público. Ainda, como as organizações dentro do setor de construção tiveram que demitir e/ou licenciar funcionários devido à queda de receitas, considerou-se o risco de que esses não estivessem mais em posição de garantir contratos a preços fixos.

Já os autores de Shah *et al.* (2014) propõem a criação de um modelo de tomada de decisão de FP em transportes contra riscos de natureza geotécnica. A motivação para a pesquisa, segundo os autores, é apoiar nas demandas crescentes de gestão dos ativos dos sistemas de transportes em face a um meio ambiente em mudança, interdependências entre diversos sistemas e a responsabilidade de manter e melhorar uma infraestrutura existente. Em específico tratou-se do FP voltado para a interação entre solo e ativos de transportes, restrito na pesquisa aos sistemas ferroviário e rodoviário.

Ressalta-se no artigo (SHAH *et al.*, 2014) que projetar e construir soluções evitando erros passados não garante necessariamente o FP de longo prazo. Ainda, o FP deve considerar eventos que agem tanto para aumento quanto para a diminuição das solicitações. Por exemplo, uma emigração devido a condições econômicas pode

resultar em superdimensionamento para as necessidades do futuro, sendo algo que os decisores de FP precisam avaliar. Essa visão não é trazida por todos os autores na discussão de FP, já que algumas publicações tratam somente dos eventos com impactos negativos em transportes (MARTANI *et al.*, 2021; SICILIANO *et al.*, 2012)

Os autores (SHAH *et al.*, 2014) ainda propuseram uma lista de fatores motivadores do FP, sendo essa a categorização mais antiga dessa revisão. Esses fatores seriam: Sociais, Demográficos, Ambientais, Políticos, Econômicos, Tecnologia e Inovação e Eventos Drásticos (“*shock events*”). A categorização proposta nessa dissertação, usada conforme o Quadro 3, tem correspondência com a proposta por Shah *et al.* (2014) quando se agrupam algumas categorias do artigo, como Sociais e Políticos (SHAH *et al.*, 2014) em relação à Políticas sociais.

Uma exceção é a categoria Eventos Drásticos (SHAH *et al.*, 2014), que se considera aqui como redundante, já que o FP trata em si de eventos drásticos de baixa previsibilidade e não foram encontradas publicações de FP motivadas por eventos de natureza completamente desconhecidos. Como Shah *et al.* (2014) não apresentaram uma revisão da literatura para propor tais fatores motivadores, a comparação é limitada somente à nomenclatura das categorias.

Para um modelo de tomada de decisão de FP, Shah *et al.* (2014) apresentam os seguintes critérios a serem avaliados:

- a) fatores inerentes ao sistema de transporte, que podem afetar seu desempenho quando ocorrem eventos não previstos. Por exemplo, a facilidade de manutenção dos ativos no sistema;
- b) eventos incertos e plausíveis para o futuro do sistema de transporte e seu contexto;
- c) proposição de soluções de engenharia de FP, com atenção à adequação e propósito à luz de mudanças nas condições futuras, e
- d) decisão baseada em critérios múltiplos. Sugere-se um sistema de pontuação sobre os eventos e condições futuras, podendo-se usar matrizes de risco como apoio.

Shah *et al.* (2014) se limitam a propor o modelo, sem aplicá-lo ou sugerir metodologias de cálculo durante avaliação das propostas.

Por vez, Martani *et al.* (2021) tratam sobre a avaliação quantitativa dos impactos dos eventos não previstos em sistemas de transportes, sendo um artigo

publicado pelo grupo de pesquisadores do FORESEE, acrônimo para Estratégias de *Future-Proofing* para Redes de Transporte Resilientes Contra Eventos Extremos. O artigo fornece um exemplo de como um gestor ou analista pode usar as diretrizes propostas para estimar e definir metas de resiliência para sistemas de transporte contra eventos extremos.

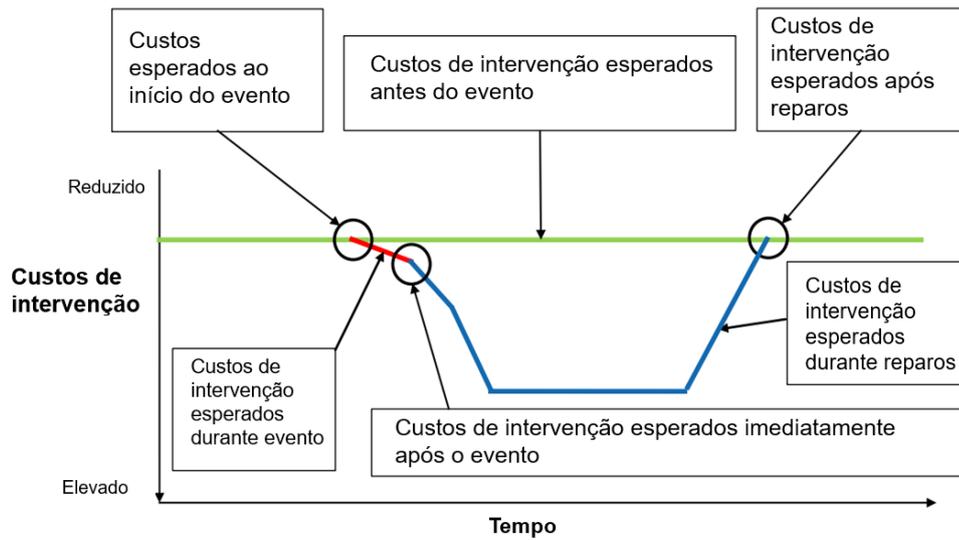
Nesse contexto resiliência é definida como a “habilidade do sistema manter o nível do serviço”, e é medida em valor monetário relativo aos custos associados à resiliência (sinal negativo). Martani *et al.* (2021) argumentam que o FP dos sistemas de transporte depende da medição dessa resiliência e a atribuição de uma meta a ela.

O procedimento de cálculo referenciado por Martani *et al.* (2021) é explicado em mais detalhes em publicações anteriores do mesmo grupo de pesquisas (ADEY *et al.*, 2021, 2019), que não configuraram diretamente dentre os artigos selecionados pela presente revisão. Segundo tal grupo de autores, há dois tipos de custos que compõe a métrica da resiliência:

- a) o custo da intervenção para corrigir um problema (Figura 5), e
- b) o custo da redução do nível de serviço (Figura 6).

A parcela “a” é medida usando as estimativas de custos de intervenção necessários para permitir o transporte de mercadorias e/ou pessoas em um trecho (ADEY *et al.*, 2019). A linha verde indica os custos esperados sem eventos adversos. Na Figura 5 a linha vermelha indica o aumento nos custos desde a ocorrência ao encerramento do evento, com valor de custos crescente para baixo do gráfico. A linha azul continua no tempo até quando essa se encontra com a linha verde, ou seja, o nível de serviço é restaurado (ADEY *et al.*, 2019).

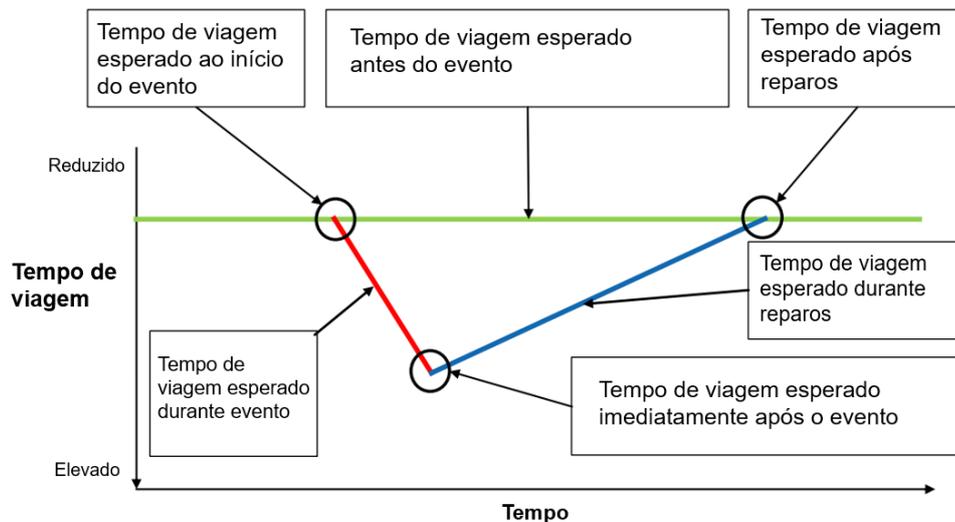
Figura 5 - Custo de intervenção em relação ao tempo após evento adverso



Fonte: adaptado de Adey *et al.* (2019)

A parcela “b” dos custos é avaliada usando a medida cumulativa anual de tempo esperado para viagens, para mercadorias e/ou pessoas em um trecho. Na Figura 6 a linha verde indica o tempo de viagem esperado sem eventos adversos. A linha vermelha indica o aumento no tempo de viagem da ocorrência ao encerramento do evento. A linha azul continua no tempo até quando essa se encontra com a linha verde, ou seja, o nível de serviço é restaurado (ADEY *et al.*, 2019).

Figura 6 - Atraso no tempo de viagem em relação ao tempo após evento adverso



Fonte: adaptado de Adey *et al.* (2019)

Adey *et al.* (2019) esclarecem ainda que o valor das linhas verdes (Figura 5 e Figura 6) não precisa ser constante ao longo do tempo e que as representações gráficas de um cenário geral não implicam que a avaliação seja determinística. Para o caso de vias públicas em que não é feita a cobrança de tarifas e, portanto, não há perda de receita, sugere-se usar os salários como base valor base para estimar o custo da redução de serviço, equivalente a uma perda de eficiência.

Martani *et al.* (2021) descrevem ainda que quando não há dados baseados em simulações para prever e/ou computar os impactos monetários do evento adverso na resiliência do sistema (Figura 5 e Figura 6), sugere-se um método alternativo de cálculo usando indicadores. Nesse sistema dá-se notas de 1 a 5 a até 42 indicadores de qualidade e segurança do serviço de transportes. O artigo demonstra a viabilidade do modelo alternativo em um caso fictício de uma ferrovia italiana, porém, espera-se resultados menos precisos com essa abordagem.

Os eventos adversos tratados em Martani *et al.* (2021) são de natureza ambiental ou questões físicas que geram impactos em um sistema de transportes. Assim, não são tratados por Martani *et al.* (2021) os custos indiretos como, por exemplo, danos à reputação, que podem ter impactos operacionais futuros. Ainda, os autores não comentam quanto ao potencial de uso desse modelo para eventos não previstos, porém com consequências positivas. Como não houve aplicação do modelo em casos reais, foi sugerido pelos autores para testar as premissas do modelo com projetos e países diferentes para validar as premissas do artigo.

#### 4.3 QUESTÃO AMBIENTAL COMO MOTIVADOR DE FP

As publicações categorizadas nesse tópico propõem formas de mitigar os impactos ambientais dos transportes utilizando um conjunto de decisões e/ou tecnologias.

Miklautsch e Woschank (2022) apontam para as mudanças climáticas como grande risco futuro para a economia global e ressaltam a necessidade de mais estudos para mitigação desse evento. No artigo os autores estudaram mecanismos para reduzir a emissão de carbono no transporte de bens industriais. Através de entrevistas com *experts* foi proposto um conjunto de fatores independentes e combinados que podem influenciar positivamente na redução das emissões de carbono.

Para Miklautsch e Woschank (2022), FP refere-se a medidas economicamente viáveis e sustentáveis para a redução dos impactos climáticos causados pelos transportes. Assim, o foco desse artigo foi a mitigação dos riscos climáticos, em contraponto com diversas publicações nas quais o FP é entendido a partir de ações que diminuem o risco dos impactos, mas não dos eventos incertos em si (BOLSIN, 2018; PENNINGS; WIEGMANS; SPIT, 2020; SHAH *et al.*, 2014).

O mesmo ocorre para Gschösser *et al.* (2020), que buscam argumentar com exemplos atuais que o transporte ferroviário pode contribuir para a melhora da manutenção do meio ambiente FP, principalmente através de:

- materiais de construção otimizados, com o exemplo do concreto projetado usado na construção do túnel base de Brenner;
- processos de construção e reforma aprimorados, conforme análise feita pela autoridade governamental de ferrovias na Áustria;
- gestão de manutenção evolutiva, com exemplo de reforço estrutural em ponte da seção ferroviária Bamberg-Rottendorf na Alemanha, e
- benefícios em rede, exemplificado pela redução de emissões nas vias de acesso ao túnel base de Brenner.

#### 4.4 TECNOLOGIA E INOVAÇÃO COMO MOTIVADORES DE FP

Nessas publicações, o tema da incerteza tecnológica é tratado utilizando diversas abordagens, incluindo a atualização da regulamentação para transportes e a previsão de sistemas adaptáveis.

Em Bolsin (2018) o termo FP é utilizado de forma restrita à regulação tecnológica em transportes. Em específico, buscou-se identificar os fatores essenciais para a regulação de veículos autônomos dentro de uma política de governo nacional para a Austrália. Após uma revisão da literatura acadêmica e legal, Bolsin (2018) faz uma série de recomendações regulatórias para os veículos autônomos, as quais se enquadram em direcionamentos legais já existentes na Austrália.

Bolsin (2018) defende que o FP utilizando a regulação possibilite mitigar os riscos e aproveitar as consequências de eventos não previsíveis ligados à tecnologia. Isso o coloca dentro de uma visão bilateral dos riscos futuros (positivos e negativos) adotada por outros autores na literatura (MASOOD *et al.*, 2016; SHAH *et al.*, 2014),

mesmo que o Motivador em Bolsin (2018) seja restrito a questões tecnológicas e que a regulamentação seja a ferramenta adotada para avaliação do FP.

De forma semelhante a Bolsin (2018), Bolshakova *et al.* (2019) abordam o FP ligado ao uso regulado de tecnologia em sistemas de transportes. Em específico, buscou-se entender como realizar o FP de uma rede de sensores inteligentes para uso em transportes ferroviários. Isso pois, como argumentam os autores, pode haver mudanças futuras e não previstas nas características dos veículos da via ou da própria tecnologia de sensores em si, que poderiam inutilizar ou reduzir a eficácia de esforços atuais voltados para adequação da tecnologia. Como limitação, Bolshakova *et al.* (2019) restringiram-se a abordar critérios técnicos, sem trazer as incertezas de natureza social, de gestão de ativos ou fatores ambientais.

Em Ghazy *et al.* (2022) o FP é associado à resiliência dos sistemas de transportes, especificada aqui como a capacidade de um sistema retornar dos efeitos de um evento adverso em pouco tempo, sem caracterização de uma unidade de medida da resiliência como fazem Martani *et al.* (2021). Em revisão narrativa da literatura, Ghazy *et al.* (2022) argumentaram que já há estudos que avaliam a resiliência concentrando-se nos atributos físicos do sistema, bem como probabilidades de ocorrência de um grande evento ou interrupção. No entanto, segundo os autores, apenas alguns estudos tratam da necessidade de FP relacionado a deficiências já existentes no sistema.

Ghazy *et al.* (2022) apresentam então um modelo que tem como objetivo identificar as tecnologias de transporte com o maior potencial de agregar resiliência a um sistema, que é nomeado *REsilience, Brittleness and Emerging Technologies* (REBET), aplicado no contexto do transporte rodoviário em Klang Valley, na Malásia. Seguindo-se o modelo proposto, um comitê se reuniu para identificar qualitativamente as principais fragilidades de transportes na região e propor uma lista das tecnologias com maior relevância para solucioná-las. Apesar do foco ser em soluções de FP tecnológicas, Ghazy *et al.* (2022) ressaltam o possível uso da metodologia para outros contextos.

O modelo REBET primeiro realiza uma fase de *brainstorming* sobre o potencial de tecnologias. Algumas das perguntas utilizadas e sugeridas são, na opinião do entrevistado:

- quais são os problemas/estresses que mais afetam atualmente o sistema de transporte urbano na região?

- quais são as tecnologias que dominam o avanço tecnológico na indústria de transporte na região?
- quais são as principais barreiras que afetam a adoção de uma nova tecnologia de transporte na região?

As opiniões dos participantes são coletadas e utiliza-se o método Delphi<sup>2</sup> para reduzir a quantidade de respostas a um consenso. Após isso, notas são dadas para a combinação de tecnologia x fragilidade/problema. As tecnologias melhor avaliadas são as escolhidas para serem implementadas.

O protocolo sistemático de discussão conjunta para o *brainstorming* de problemas e soluções é um diferencial de Ghazy *et al.* (2022) em relação a outras pesquisas. Em Martani *et al.* (2021) e Shah *et al.* (2014), por exemplo, não é deixado claro de que forma os analistas devem levantar os cenários a serem modeladas ou os trechos de via/local em que devem ser observados.

Ao contrário de Martani *et al.* (2021), Ghazy *et al.* (2022) não liga as pontuações dadas às soluções de FP propostas com métricas de impacto econômico-financeiro, mas somente na análise subjetiva dos entrevistados. Isso parece ir contra ao discutido na literatura sobre tornar as decisões de FP mais assertivas e revisáveis Love *et al.* (2021a).

Quanto ao uso do Delphi, pode ter sido necessário para reduzir o grande volume de possíveis fragilidades e soluções tecnológicas, levantadas simultaneamente já na primeira etapa de seu modelo. Outro aspecto em que o método REBET é contrário a fontes da literatura é relativo à escolha de soluções tecnológicas existentes no presente para uma questão de FP. Enquanto isso, outros autores defendem a criação de facilidades técnicas de implantação e substituição de tecnologias (BOLSHAKOVA *et al.*, 2019), ou ainda a previsão orçamentária para data futura de uma tecnologia ainda não especificada (LOVE *et al.*, 2021a).

Outros artigos que têm a Tecnologia e Inovação como Motivador do FP se limitam a questões técnicas e não abordam os mecanismos de consenso e decisão, seja via regulamentação como proposto por Bolsin (2018) e Bolshakova *et al.* (2019), ou a opinião de especialistas como em Ghazy *et al.* (2022).

---

<sup>2</sup> O método Delphi é uma técnica de pesquisa que envolve a coleta e análise iterativa de opiniões de especialistas para alcançar um consenso. Ele é frequentemente utilizado em previsões futuras, planejamento estratégico e tomada de decisões em diversos setores.

Em Shaikh e Mouftah (2021) é apresentado um projeto de infraestrutura de carregamento para veículos elétricos autônomos e interconectados. O FP é tratado em relação à compatibilidade com outras tecnologias existentes de carregamento assim como um sistema hierárquico para agendamento dinâmico e automático da recarga dos veículos. Os autores tratam de um tópico do FP de transportes com foco específico na inovação tecnológica e seus requisitos técnicos, acompanhando as tendências sociais e econômicas envolvendo os veículos autônomos. Uma limitação do artigo é não levantar a discussão sobre a obsolescência da própria tecnologia apresentada.

Garstenauer e Počuča (2011) abordaram o poder das tecnologias digitais para transformar a comunicação nos sistemas de transportes. Destacou-se o potencial de uma implementação “future-proof” baseado na tecnologia GSM-Railway, um protocolo internacional *wireless* que é hoje padrão para comunicações ferroviárias.

Ponsford e Kunur (2006) tratam da especificação conceitual de um veículo inovador com FP do projeto de acordo com as necessidades de transportes previstas para 2027. Levou-se em consideração tendências do cenário de transportes à época (2006), que incluía particularmente o crescimento populacional e a migração rural para a área urbana.

Dada a idade do artigo (PONSFORD; KUNUR, 2006) e as perspectivas mais recentes para veículos autônomos, elétricos e com integração IoT, o projeto apresentado pelos autores está desatualizado (SHAIKH; MOUFTAH, 2021). Isso exemplifica a preocupação discutida por Krystallis, Locatelli e Murtagh (2022), de que é complexo tomar uma decisão rígida quanto às tecnologias de FP, devido à rápida mutabilidade tanto da tecnologia quanto das condições que a motivaram. Pode-se optar por uma previsão orçamentária destinada a investimentos em tecnologia e inovação em geral (LOVE *et al.*, 2021a) ou prover os mecanismos de substituição e atualização dessas (BOLSHAKOVA *et al.*, 2019).

#### 4.5 POLÍTICAS SOCIAIS COMO MOTIVADORES DE FP

As publicações nesse tópico dão destaque à importância e implementação de flexibilidade nos ativos de transportes, para um FP voltado às pessoas e áreas urbanas. A dificuldade em quantificar o valor do FP, a falta de diretrizes e recursos limitados são vistos como desafios para a implementação de projetos nesse sentido.

Em Sreeves (2007) discute-se o processo de decisão de motivação política e legal para renovação estrutural de uma ponte/viaduto no Reino Unido, com o requisito de que esse pudesse ser elevado em uma data posterior para protegê-lo de enchentes. O autor detalha subsequentemente as especificações técnicas dessa implementação.

A estrutura de ponte sofria extensa corrosão da armadura metálica dos pilares e um reparo não era vantajoso. A construção de uma nova ponte com mudança do traçado da via demoraria pelo menos dois anos incluindo os trâmites legais para as licitações. Então, foi decidido substituir a estrutura no próprio local. A área é conhecidamente sujeita a enchentes esporádicas que sobe acima da via por alguns dias aproximadamente a cada cinco anos (SREEVES, 2007).

Considerou-se então que a solução mais adequada seria construir a ponte em um nível mais elevado. No entanto, os taludes para acesso em cada extremidade exigiriam a desapropriação de imóveis. Com certa urgência, a autoridade local exigiu um projeto de ponte capaz de ser içada e elevada em uma data posterior, para acima dos níveis de inundação mais altos registrados. Inovador à época, o projeto ganhou um prêmio promovido pela *Institution of Civil Engineers* (ICE) de melhor projeto da região de West Midlands na Inglaterra (SREEVES, 2007). Até novembro de 2021, em consulta ao Google Street View, o viaduto permanecia na posição original.

Pennings, Wiegmans e Spit (2020), de maneira semelhante a Love *et al.* (2021a), destacam a grande importância dos sistemas de transportes para a economia e o bem-estar social, assim como as pressões crescentes de fatores não previsíveis sobre esses sistemas. O artigo identifica que há uma lacuna de pesquisa nas incertezas provenientes de tendências sociais, uma vez que esses impactos podem ser difíceis de quantificar ou avaliar, seja por falta de dados, ferramentas de avaliação, tempo ou restrições orçamentárias.

Em específico, Pennings, Wiegmans e Spit (2020) identificaram a “flexibilidade” para modificar facilmente os espaços urbanos como um dos principais fatores para o FP de transportes de pessoas. Através de uma revisão sistemática da literatura buscou-se entender o papel da flexibilidade, como definida no artigo, para regular a interação entre os meios de transportes de passageiros e as políticas de desenvolvimento urbano. Como um dos resultados da revisão sistemática (PENNING; WIEGMANS; SPIT, 2020), foi identificada a falta de publicações tratando sobre a avaliação de FP como forma de dar suporte à tomada de decisão. Em países

em desenvolvimento essa demanda seria maior, devido à velocidade de transformação das áreas urbanas.

Ainda, os autores (PENNING; WIEGMANS; SPIT, 2020) ressaltam a dificuldade em implementar projetos voltados para o FP de áreas urbanas principalmente porque não há métodos amplamente aceitos para quantificar o valor das ações, em específico as que trazem mais flexibilidade ao desenvolvimento urbano. Sugere-se que os modelos baseados em ROT teriam o maior potencial para serem usados no apoio à tomada de decisão de FP especialmente com uma visão de longo prazo, pois eles refletiriam através da métrica “valor da opção” (proveniente da ROT) o quanto um município estaria disposto a pagar para deixar um área ou serviço subutilizado para ter a opção de usá-lo de maneira diversa no futuro.

Nkurunziza, Tafahomi e Faraja (2021) buscaram revisar qualitativamente o planejamento urbano e de transportes para toda a cidade de Kigali, no Ruanda, a fim de entregar uma nova proposta de plano diretor de transportes. Os autores apresentam como a serem considerados no FP: o aumento da posse de automóveis, recursos limitados para investimentos e a inexistência em Ruanda de diretrizes para projeto geométrico de estradas. Ao mesmo tempo, também identificaram oportunidades positivas, como mão de obra local abundante, dependência do transporte público, boa governança e governo pró-sustentabilidade (NKURUNZIZA; TAFAHOMI; FARAJA, 2021).

É notável pelo relato no artigo (NKURUNZIZA; TAFAHOMI; FARAJA, 2021) que os eventos a serem considerados em FP de transportes em Ruanda, um país em desenvolvimento, são diversos dos relatados para países desenvolvidos (CHOWDHURY; ZHU, 2021). Isso ilustra o argumento de que o FP deve ser tratado nos contextos locais e sociais específicos.

Assim como para Bolsin, 2018, a ferramenta usada para o FP de transportes em Nkurunziza, Tafahomi e Faraja (2021) é a análise da codificação/legislação. No entanto, o primeiro tem Tecnologia e Inovação como categoria de motivador da pesquisa. Enquanto isso Nkurunziza, Tafahomi e Faraja (2021) observam questões de organização social e política, com pouca menção a inovações tecnológicas. De fato, reforça-se que em área de conhecimento e objetivos acadêmicos o artigo tem mais relação com o discutido por Pennings, Wiegmans e Spit (2020), que usa métodos diversos para a proposta de FP, mas partilha de uma motivação semelhante, a

proteção dos sistemas de transportes contra eventos incertos de natureza social e cultural.

Em Siciliano *et al.* (2012) discorre-se sobre o processo adotado pelo projeto PROTECRAIL, iniciado em 2010 e patrocinado por um consórcio multidisciplinar do setor de transportes. O objetivo do projeto era construir, a partir de contribuição conjunta dos participantes, um modelo para o desenvolvimento de FP de soluções de segurança para ativos ferroviários, com foco específico no combate às ameaças de terrorismo. Este artigo se destaca por abordar o tema da segurança em um evento de baixa previsibilidade, como um ataque terrorista.

Outro tema social específico foi tratado em Schurig e Turan (2022), em que argumentam que a pandemia de COVID-19 é um exemplo de vulnerabilidade global envolvendo desafios de saúde, poluição, mudanças climáticas, biodiversidade e fornecimento de alimentos e energia.

O artigo tem como propósito incentivar um olhar para o FP e as estratégias de transição das cidades, não só restrito a transportes, mas também dos setores de alimentos, energia e saúde. Os autores defendem o foco nos espaços públicos e ambientes centrados nas pessoas, em contrapartida ao planejamento pensado no uso individual de carros (SCHURIG; TURAN, 2022).

#### 4.6 OUTROS TÓPICOS

Chowdhury e Zhu (2021) é a única revisão da literatura encontrada que trata de forma geral do FP em transportes, independentemente da categoria de Motivador do FP. Traz o diferencial de utilizar um método matemático para encontrar a interrelação entre os termos utilizados nas publicações e descrever os fatores chave para o assunto.

Os autores selecionaram 48 publicações para a revisão, no entanto, o protocolo para essa seleção não é especificado de forma detalhada, já que segundo os autores esses documentos foram coletados por meio de uma pesquisa do Google partindo-se de palavras-chave variadas (CHOWDHURY; ZHU, 2021).

Com as publicações em mãos, foi executada uma análise matemática através do processo de *Topic Modeling*, do qual foi possível extrair os principais termos que representariam os fatores chaves buscados. Posteriormente, um algoritmo de

*Association Rule Mining* foi empregado para encontrar a interrelação entre os termos (CHOWDHURY; ZHU, 2021).

O resultado foi um conjunto de tópicos em estrutura de árvore, do qual o nível 1 corresponderia aos principais fatores na discussão do FP em transportes. Esses seriam:

- Disrupção/Risco;
- Operação;
- *Performance*;
- Financiamento;
- Inovação, e
- Percepção pública.

A estrutura de tópicos não faz distinção se esses são fontes de eventos incertos, medidas cabíveis, soluções ou disciplinas de conhecimento com relacionadas ao FP (CHOWDHURY; ZHU, 2021). Assim, esses tópicos apresentam uma perspectiva diversa e complementar às categorias propostas nessa dissertação para Fatores Motivadores do FP. Há uma correspondência entre Financiamento e Operação (CHOWDHURY; ZHU, 2021) com o fator Licitação e Gestão, já Inovação (CHOWDHURY; ZHU, 2021) corresponde com Tecnologia e Inovação, enquanto Percepção pública (CHOWDHURY; ZHU, 2021) corresponde com Políticas sociais.

Uma diferença notável entre o apontado pela revisão integrativa em relação à análise de Chowdhury; Zhu (2021) é que para esses autores o tópico Ambiental representa somente um tópico de nível 2 e, conseqüentemente, seria menos relevante na literatura. O tópico Ambiental estaria ainda ligado a discussões em relação a “*Performance*” e “Disrupção/Risco” de sistemas de transportes.

O que foi observado na revisão integrativa é que os artigos com Motivação de FP Questão ambiental são minoria, 2 de 20, e que esses tratam do tema sob uma perspectiva de minimização de impactos sobre o meio ambiente em geral, e não tanto da proteção do sistema frente a eventos climáticos.

Outras publicações trazem o foco de mitigação de riscos e avaliação do FP do transporte frente aos eventos incertos ambientais (MARTANI *et al.*, 2021; SHAH *et al.*, 2014), mas com uma visão de análise voltada para o suporte na gestão e tomada de decisão.

Uma possibilidade para não consideração de “Ambiental” como fator de nível 1 (CHOWDHURY; ZHU, 2021) é dos artigos que tratam desse tema estarem ligados à análise de riscos e impacto na *performance* de transportes, devido às catástrofes climáticas. Isso poderia ter enviesado o resultado do modelo matemático para priorizar tais termos como tópicos principais, deixando “Ambiental” como secundário (de nível 2) (CHOWDHURY; ZHU, 2021).

Avalia-se ainda que a elevação de Disrupção/Risco e *Performance* como fatores chaves de FP (CHOWDHURY; ZHU, 2021) não significa que esses sejam o foco ou objetivo real das publicações. Isso porque, como observado na revisão integrativa, análise de riscos e *performance* operacional são algumas das ferramentas utilizadas na análise de FP, independentemente de quais sejam os fatores motivadores por trás.

#### 4.7 CONCLUSÃO DA REVISÃO INTEGRATIVA

No processo de revisão integrativa foram selecionadas 20 publicações com alta relevância ao tema de FP em transportes, a partir das quais se demonstrou que o tema conta com diversas abordagens, motivações e metodologias. Após análise da literatura, foi proposta uma categorização de acordo com Motivadores do FP, dentre uma das quatro opções:

- a. Licitação e Gestão;
- b. Questão ambiental;
- c. Tecnologia e Inovação, e
- d. Políticas sociais.

Cada uma das publicações teve a si uma categoria associada conforme considerado mais adequado. A análise individual e comparativa entre os autores e publicações é apresentada em detalhes.

Uma das lacunas observadas foi a falta de uma definição de FP para transportes. Em geral, as publicações utilizaram o termo como se esse trouxesse uma ideia auto evidente, porém, o conjunto de publicações mostrou que o FP pode ter interpretações diversas e, em casos, conflituosas.

Foi evidenciado pela revisão que há diferentes ferramentas que são utilizadas para se considerar, avaliar e aplicar o FP, independentemente da categoria de Motivador por trás. Essas ferramentas são:

- análise qualitativa e quantitativa de riscos;
- normas e regulamentação legal;
- *performance* operacional;
- demonstrações financeiras e projeções;
- modelagens matemáticas de cenários futuros, e
- flexibilidades e superdimensionamento em soluções de engenharia.

Foi confirmado o pressuposto de que o FP traz de forma intrínseca uma dificuldade de concordância entre partes interessadas dentro de um projeto, principalmente por tratar de temas incertos e atender a interesses específicos, o que torna mais difícil conduzir o FP até a tomada de decisão, questão ainda não bem resolvida ou com procedimentos consolidados na literatura. Confirmou-se que para argumentar o caso a favor do FP deve-se apelar para os interesses de cada parte envolvida, decisores e interessados, e balancear dois lados:

- a) do evento: quanto mais distante o momento que esse evento for ocorrer e quanto menos previsível/provável esse for, pior para o consenso sobre a importância do FP;
- b) quanto maior for a percepção de custo e disputa entre partes envolvidas, pior para a decisão, pois, mesmo que seja reconhecida a necessidade de FP, o consenso sobre a solução é dificultado. Deve-se buscar nesse caso soluções de baixo arrependimento (*no or low regret*)

As implicações disso para a construção do modelo proposto são discutidas em mais detalhes no capítulo seguinte.

Foi confirmado que há propostas de modelos de avaliação de FP na literatura ou, em casos, os fundamentos necessários para se elaborar tal modelo. No entanto, não foi encontrada nenhuma publicação ou documento que trouxesse um método que desse apoio a todas as fases do processo de análise e tomada de decisão, desde a identificação dos eventos incertos até a definição de ações a serem tomadas, com um determinado custo e em um espaço de tempo. Um modelo que visa preencher essa

lacuna é proposto nessa dissertação, considerando-se principalmente as informações e recomendadas obtidas através da revisão integrativa, que se confirmou suficiente para embasar a elaboração do modelo.

A literatura traz abordagens divergentes sobre a melhor metodologia para guiar a criação e uso de tal modelo, pois alguns autores defendem o uso da opinião de especialistas para quantificar a importância de eventos e soluções, com base nas suas opiniões pessoais. Outras publicações restringem o uso da opinião de especialistas e adotam principalmente dados operacionais e de engenharia do sistema de transportes, utilizando modelagens de cenários futuros, que em vezes podem ser complexas e custosas. Emergiu da literatura que resiliência é um termo comum para os modelos estudados, independente da abordagem, que se refere à capacidade do sistema de transportes voltar ao nível normal de serviço após um impacto, podendo ser discutida qualitativamente ou calculada.

A revisão integrativa demonstrou de fato que a falta de resultados assertivos e auditáveis é uma das principais barreiras para o FP. A conclusão apresentada aqui é que, para que um modelo auxilie da melhor forma a tomada de decisão no FP, para quaisquer dos quatro Motivadores do FP, esse deve buscar reduzir as subjetividades e divergências de opinião, baseando-se em alguns poucos cenários e usando dados de consenso. Ainda, uma abordagem mais quantitativa auxiliaria na comunicação e verificação desses resultados.

Alguns resultados da revisão integrativa divergiram das expectativas iniciais. Nas publicações com Motivação de FP Questão ambiental foi visto que o propósito imediato do FP era o de evitar impactos dos sistemas de transportes sobre o meio ambiente, e não o contrário. Isso mostra que o termo FP está sendo usado com conotações diferentes das definições encontradas anteriormente. Ainda, algumas publicações trouxeram a questão do FP para eventos internos ao próprio sistema de transportes, de seus componentes organizacionais e tecnológicos, o que também não está no escopo de definições anteriores. Isso confirmou a expectativa de que seria necessário propor uma definição de FP para sistemas de transportes, em dia com a literatura mais moderna sobre o assunto. Portanto, segue a definição de FP proposta nessa dissertação para sistemas de transportes:

*Future-Proofing é o processo que combina estudos, ações e provisões voltados para elevar a resiliência do sistema a eventos futuros incertos e/ou a mitigar impactos causados pelo sistema sobre seu entorno. É em geral motivado por fatores de licitação e gestão, ambientais, tecnológicos e de políticas sociais.*

Outra lacuna evidenciada é a falta de aplicação e exposição de casos reais na literatura. Isso se nota principalmente para os modelos de avaliação e apoio à tomada de decisão, que, ou se restringem a uma explicação conceitual, ou utilizam exemplos simulados, o que dificulta o reconhecimento dos limites de aplicação do modelo e pontos a serem melhorados. Algumas aplicações fictícias/simuladas foram: a escolha de tecnologias para resolver problemas de natureza diversa em uma rede rodoviária, a proposta de reforços de taludes de uma ferrovia como proteção a eventos climáticos extremos.

## **5 MODELO DE AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO DE FUTURE-PROOFING**

Nesse capítulo é primeiro explicado como as bases da literatura foram utilizadas para propor o modelo. Em seguida, parte-se para a estrutura e explicação detalhada das diversas fases de avaliação do FP, desde o levantamento dos primeiros dados até a tomada de decisão.

### **5.1 BASES DA LITERATURA PARA O MODELO**

Sreeves (2007), para o caso da ponte elevável, exemplifica um cenário particular em que tanto a ocorrência do evento quanto as consequências que esse causa são bem conhecidas e induziram os decisores (políticos locais) a um rápido consenso. Em detalhes, o evento era a ocorrência das enchentes recorrentes a cada cinco anos e o efeito adverso era o bloqueio das estradas por até três dias. A ponte só não foi reformada com pilares mais altos por uma restrição legal, envolvendo a desapropriação das terras para o que seriam as rampas de acesso ao nível do tabuleiro.

Quando os eventos e/ou os benefícios são incertos o consenso é dificultado. Pennings, Wiegmans e Spit (2020) trazem como conclusão que a dificuldade de concordância em um investimento de FP costuma piorar quando esse se baseia em uma opção futura tanto com utilidade e benefícios incertos. Por exemplo, Pennings, Wiegmans e Spit (2020) sugerem a reserva ou desapropriação de áreas urbanas para que sejam futuramente dedicadas a novas vias e meios de transportes, mesmo que hoje não tenham uma finalidade definida. No entanto, esses autores ressaltam que sem ferramentas na literatura dando suporte à essa decisão, dentro de um cenário de recursos limitados, a implementação de tais ações é improvável principalmente por não haver método para valorar tal opção futura.

Shah *et al.* (2014) argumentam que um modelo de apoio à tomada de decisão de FP deve avaliar os riscos e ações necessárias para períodos maiores que 5 anos, pois esse seria o tempo que vai além das análises de risco usuais na construção ou renovação de transportes.

Na opinião de Shah *et al.* (2014) tal modelo, qualquer que seja o cenário, deve entregar:

- apoio à tomada de decisão;
- modelagens com resultados mais apropriados;
- estratégia organizada para execução das decisões;
- aumento de transparência;
- menor risco para a alocação financeira, e
- conexão com as demonstrações financeiras e possibilidade de avaliação externa.

Há também os autores que utilizam documentos técnicos, guias e legislações como ferramenta para análise e recomendação de FP (BOLSIN, 2018; NKURUNZIZA; TAFAHOMI; FARAJA, 2021). Considera-se, a partir da revisão integrativa, que essa é uma maneira eficiente de levantar e contextualizar o FP dentro de um contexto já existente da discussão pública. No entanto, o observado em tais publicações é a não continuidade após as análises e recomendações iniciais, de natureza qualitativa. Nesse caso, o processo de tomada de decisão pode não ser beneficiado por tal abordagem. Considera-se aqui que uma análise mais quantitativa com base em tais documentos poderia deixar as recomendações mais próximas de serem executadas, mesmo que a quantificação seja aproximada.

Em guia técnico, público e oficial, da Comissão da União Europeia (EU, 2021) a análise de FP passa por um processo mais quantitativo e sistemático. Nesse guia é discutida a relevância do FP para novos projetos de infraestrutura em geral, com direcionamento específico para o FP envolvendo questões climáticas, intitulado como *Climate Proofing*. Segundo o guia “*Climate Proofing é o processo que integra medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas no desenvolvimento de projetos de infraestrutura*”. Tal definição se encaixa com a já proposta nessa dissertação, focando especificamente nos eventos de natureza climática.

Dentre outros aspectos, o guia (EU, 2021) define critérios para justificar uma análise de FP para uma infraestrutura (incluindo as de transportes). Para a adaptação da infraestrutura contra potenciais eventos adversos, sugere-se duas etapas sucessivas a primeira sendo a “Triagem” e a segunda a “Análise detalhada”. Desde

2022 os novos projetos de infraestrutura da UE recebem a recomendação de passaram por tal processo de análise e documentação.

O guia define que a escala de tempo a ser usada na análise de FP deve corresponder ao tempo de vida útil desejado para o investimento. Isso porque a vida útil operacional de ativos de infraestrutura costuma ser mais longa do que o período de referência utilizado na análise custo-benefício. Ainda, durante a vida útil podem ocorrer mudanças significativas na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos. Para grandes sistemas de transportes, levar isso em consideração é necessário(EU, 2021).

Para projetos com operação prevista além de 2030, é necessário ainda utilizar projeções climáticas baseadas em cenários. A escolha de qual projeção climática utilizar fica à responsabilidade do financiador do projeto, juntamente com especialistas técnicos e gestores do FP, que devem considerar pelo menos duas projeções, uma mais pessimista e outra mais amena. A localização do projeto pode ter um efeito específico nos eventos considerados, já que as variáveis climáticas locais podem ter comportamento diferente do que a média global.

Como resultado da fase de Triagem busca-se obter uma medida da vulnerabilidade da infraestrutura em relação ao evento climático. A vulnerabilidade é definida como a combinação de dois aspectos que podem ser avaliados separadamente (EU, 2021):

- a) sensibilidade, estima o quão suscetível é o projeto aos riscos climáticos em geral. Busca identificar quais eventos são relevantes para o tipo específico de projeto, independentemente de sua localização. Por exemplo, o aumento do nível do mar é um perigo significativo para a maioria dos projetos portuários, e
- b) exposição: probabilidade desses riscos ocorrerem na localização do projeto. A análise leva em conta os climas atual e futuro. Os dados disponíveis para a localização do projeto devem ser usados, incluindo projeções de modelos climáticos com a frequência e intensidade de eventos extremos. Os riscos podem ser materiais, como os danos físicos por calor extremo, assim como sociais, por danos a patrimônios culturais e o sustento das comunidades locais.

Estimar numericamente esses fatores é uma tarefa difícil e potencialmente custosa. Por isso sugere-se que para a primeira etapa, de Triagem, a sensibilidade e exposição sejam categorizadas qualitativamente entre baixa, média e alta. A

atribuição desse nível de importância deve ser preferivelmente realizada por especialistas técnicos, como engenheiros e outros especialistas com bom conhecimento do projeto.

Para a estimativa da vulnerabilidade, que conclui a etapa de Triagem, recomenda-se dispor em uma matriz 3x3 os eventos de risco identificados de acordo com os eixos Sensibilidade e Exposição (EU, 2021). Os eventos mais relevantes para uma análise aprofundada serão os situados entre sensibilidade média/alta e exposição média/alta. Se a avaliação concluir que todos os eventos são classificados como de baixa/média vulnerabilidade ou não significativos, pode não ser necessária uma avaliação de FP mais aprofundada, encerrando o processo na etapa de Triagem.

A segunda etapa, caso necessária, é a de Análise detalhada e tem o objetivo de quantificar a significância dos riscos atuais e futuros para o projeto. De forma semelhante à primeira etapa, o risco pode ser separado em dois fatores independentes, a probabilidade e o impacto (EU, 2021):

- a) probabilidade: examina a probabilidade de ocorrerem os perigos climáticos identificados dentro de um determinado período de tempo de pelo menos a vida útil do projeto. Para alguns riscos, pode haver considerável incerteza sobre a probabilidade de ocorrência, por isso, o risco pode ser estimado quantitativamente, como um percentual, ou qualitativamente, desde improvável até altamente provável e convertido posteriormente por uma tabela de referência do guia. Preferencialmente, busca-se utilizar o apoio de especialistas e informações de qualidade disponíveis em registros, estatísticas e simulações, e
- b) impacto: refere-se às consequências caso o evento identificado ocorra. Os impactos geralmente se relacionam com ativos e operações físicas, mas também saúde e segurança, impactos ambientais, sociais e econômicos, do sistema em si ou da rede mais ampla e seus possíveis efeitos cascata. Deve ser avaliado em uma escala de gravidade ou magnitude. No guia, sugere-se uma avaliação qualitativa em categorias de insignificante até catastrófico.

Para a avaliação do risco pelo guia, recomenda-se como em Shah *et al.* (2014) que seja feita a avaliação gráfica dos eventos em uma matriz, com os eixos Probabilidade e Impacto.

O documento (EU, 2021) sugere que dada a considerável incerteza nas previsões futuras, é importante tentar identificar soluções de baixo ou nenhum arrependimento, com medidas flexíveis/adaptáveis, o que está de acordo com o que foi avaliado a partir da revisão integrativa. Pode-se ainda optar pela não intervenção, com o monitoramento tecnológico da situação antes que o evento atinja um limite crítico definido, para serem então colocados em prática caminhos de adaptação.

Esse pensamento tem íntima relação com a pesquisa de Love *et al.* (2021a), que sugere a utilização de tecnologias de monitoramento, ou a provisão financeira para tais tecnologias, com o propósito de atrasar a necessidade de decidir sobre investimentos de FP vultuosos e/ou controversos. Uma abordagem possível para avaliar a validade da opção de adiar um investimento seria a Teoria de Opções Reais (ROT), citada anteriormente (PENNING; WIEGMANS; SPIT, 2020). A integração das medidas no projeto deve ter consenso e participação das áreas de planejamento, finanças, segurança, treinamento e de projeto de engenharia (EU, 2021).

Destaca-se que nem todos os componentes de um projeto precisam ser avaliados para o mesmo período de vida útil, pois há casos como os “trilhos ferroviários, que serão substituídos (como parte da manutenção regular) com mais frequência do que os aterros ferroviários.”

A União Europeia promove uma plataforma para a divulgação de casos de FP por motivadores Ambientais, chamada *Climate Adapt* (UE, 2023). Ali podem ser vistos nove casos europeus (até a data de consulta em março de 2023) de projetos de transporte que usaram soluções de FP para a adaptação das estruturas existentes contra os eventos extremos e incertos.

Há uma paridade entre o processo de análise detalhado no guia (EU, 2021) com o que já havia sido defendido antes por Shah *et al.* (2014), utilizando-se de ideias como fatores de exposição, probabilidade, flexibilidade das soluções propostas e uso de matrizes para apoio na tomada de decisão. Ambas as publicações se concentram principalmente em discutir o processo de seleção e priorização dos eventos dentro de um processo de tomada de decisão, apresentando pouca informação nos aspectos de levantamento dos eventos e soluções viáveis, cálculo detalhado dos custos e benefícios associados ao FP, assim como sobre a tomada de decisão em si.

Já Ghazy *et al.* (2022) preenchem a lacuna de levantamento de alternativas de eventos e soluções, que são os dados de entrada em uma análise de FP. No método REBET (GHAZY *et al.*, 2022) um passo a passo deve ser seguido:

1. etapa de *Brainstorming*: entrevistas com profissionais de formações diversas para encontrar as fragilidades do sistema e soluções tecnológicas;
2. etapa de Avaliação: visa reduzir a quantidade de fragilidades a serem consideradas. Sugere o uso do método Delphi para obter-se uma convergência que reduza a quantidade de respostas;
3. etapa de Análise: métodos estatísticos são empregados para selecionar as principais fragilidades e soluções. Para (GHAZY *et al.*, 2022) não são considerados dados externos ou de modelagem operacional com projeções futuras, mas somente a opinião dos especialistas no grupo, e
4. etapa de Relacionamento: busca encontrar a relação entre as principais fragilidades e soluções disponíveis. Sugere-se a disposição matricial dessas duas variáveis e o voto dos participantes, que dão uma pontuação para a combinação (fragilidade x solução) em cada célula.

No entanto, como discutido anteriormente, o método de Ghazy *et al.* (2022) é limitado para levar uma discussão de FP até a tomada de decisão, pois não propõe um detalhamento da análise baseado em cenários do futuro, somente uma avaliação qualitativa entre fragilidades e soluções. O cálculo detalhado dos custos e benefícios associados ao FP com análise baseada em cenários, pode ser vista em alguns dos modelos utilizados na literatura, como em Martani *et al.* (2021), que mensura a resiliência utilizando um valor monetário.

Como já apresentado, para Martani *et al.* (2021), há duas formas de medição de custos provenientes de um evento adverso: custo da intervenção e custo da redução de serviço. Propõe-se nessa dissertação que esses itens têm correspondência próxima com os conceitos de dano emergente e lucros cessantes, respectivamente. Esses são utilizados por seguradoras e contemplados no Código Civil Brasileiro (TJDFT, 2018) e podem fazer parte da avaliação quantitativa da resiliência dos transportes, em complementariedade ao método proposto pelo grupo de estudos do FORESEE (ADEY *et al.*, 2021; MARTANI *et al.*, 2021)

O dano emergente representa efetivamente os custos incorridos após o evento e podem ser, por exemplo, gastos com serviços de reparos, equipamentos, peças e homem-hora. Pode ser avaliado/aproximado por uma empresa a partir do detalhamento relativo a custos variáveis. Já os lucros cessantes representam os valores que a operadora deixou de lucrar enquanto seu serviço não apresenta um

desempenho normal devido ao evento. Pode ser avaliado a partir de métricas operacionais de tempo de atraso/tempo parado (TJDFT, 2018).

Acrescentando mais detalhes, o processo de análise proposto pelo FORESEE (ADEY *et al.*, 2021; MARTANI *et al.*, 2021) visa conduzir o analista por três a quatro passos de avaliação da resiliência de um sistema de transporte.

- Passo 1

Identificar as partes do sistema de transporte que provavelmente tem efeito sobre a resiliência refere-se a levantar os objetos de análise para as próximas etapas. Como ilustrado pelos autores, pode-se observar uma ponte, seu estado de conservação e como foi projetada para resistir a terremotos. Ou ainda, pode-se observar o ambiente onde a ponte está localizada e a probabilidade de um terremoto. Vê-se pelos exemplos dados que os autores recomendam levantar no passo 1 questões ligadas tanto ao sistema de transporte quanto ao ambiente que esse está inserido. O artigo, no entanto, não apresenta uma metodologia ou recomendações para levantar tais opções ou como escolher entre elas.

- Passo 2

O passo 2 corresponde a determinar se a resiliência deve ser medida diretamente ou se devem ser usados indicadores para aproximação. Essa é uma decisão baseada na disponibilidade de informação. Do ponto de vista de um gestor com recursos para a análise, a resiliência deve ser medida diretamente a partir dos valores de custo da intervenção e custo da redução de serviço, baseando-se em dados internos operacionais ou modelagens pré-execução. Isso porque torna o processo mais preciso e auditável, já que retira da estimativa diversos vieses pessoais dos analistas.

Para o caso de analistas externos, que tem restrição de informações disponíveis ou recursos, sugere-se como forma alternativa a mensuração com o uso da metodologia alternativa de indicadores e notas atribuídas a esses. Dessa forma, o processo de avaliação se torna possível, porém com maior subjetividade à análise (ADEY *et al.*, 2021), pois os analistas precisam estimar uma nota para, por exemplo, “a dimensão dos danos passados devido a deslizamentos de terra, que indica a probabilidade de danos futuros” (ADEY *et al.*, 2021). Os passos seguintes, medir a resiliência diretamente (3) ou com indicadores (4), referem-se ao processo de

cálculo da resiliência em si, baseado nos dados e processos apresentados anteriormente.

- Passo 3

Para os autores, o passo 3 requer a construção de uma representação detalhada do sistema de transporte em modelos, simulando condições futuras para diferentes eventos adversos. Ainda, deve-se medir a diferença em relação à quando não ocorreu nenhum evento adverso. Como exemplo, se os custos simulados de intervenção são de R\$ 1.000.000,00 e o total de prejuízo do aumento no tempo de viagens é de R\$ 1.500.000,00, a medida de resiliência é de R\$ 2.500.000,00 (negativos).

- Passos 4 e 5

Caso se opte pelo uso de indicadores, no passo 4, deve-se selecionar os indicadores que possam refletir o custo da intervenção e custo da redução de serviço. O passo 5, estimar o percentual de cumprimento dos indicadores de resiliência, refere-se a estabelecer métricas de limite para o custo associado à resiliência, advindos de determinações legais e expectativas dos *stakeholders*. Isso pode motivar a tomada de decisão quanto ao tipo de equipamentos e materiais que podem ser usados, melhoria de processos de recuperação e acessibilidade após a ocorrência de um evento adverso.

Embora os autores só indiquem o passo 5 como necessário para a avaliação por indicadores, não foi encontrada restrição para utilizá-lo também na análise por medição direta (passo 3). Para essa dissertação, considera-se também que a resiliência poderia ter valor positivo, caso houvesse um ganho de serviço após um evento inesperado.

Nota-se no modelo (MARTANI *et al.*, 2021) que é dada grande ênfase na quantificação da habilidade do sistema de transporte manter o nível do serviço, que quando mensurado em valores monetários reflete os custos associados à resiliência desse sistema. Já o levantamento de possíveis eventos adversos e a identificação dos elementos do sistema mais suscetíveis a esses eventos, são pouco discutidos. Além disso, o que se deve fazer em posse dos valores estimados de resiliência, quais abordagem de FP são viáveis e como ponderar seus riscos e potenciais benefícios, não são indicados.

Martani *et al.* (2021) restringem o uso de dados operacionais de custo e nível de serviço para quanto existem simulações detalhadas de cenários futuros. Isso levaria a um resultado definitivo para a análise de resiliência, que seria dado pelos resultados das simulações de tráfego, um processo que necessita de profissionais qualificados, tempo e ferramentas específicas para ser elaborado.

Propõe-se nessa dissertação, e em conformidade com outros autores (LI; LOVE, 2020), que há formas efetivas e mais simples de se considerar tais valores do que realizar múltiplas simulações de tráfego, mesmo que com alguma perda de confiabilidade. Defende-se aqui que isso possa ser feito baseando-se nos dados financeiros operacionais e de capacidade de serviço de um sistema de transportes. Identifica-se em específico que esses dados simplificados podem ser obtidos de registros operacionais detalhados, divulgação de resultados ao mercado de uma concessionária de capital aberto, ou então da modificação de resultados de uma simulação de tráfego estática (um único cenário), seja para um sistema de transportes existente ou ainda em fase de prospecto.

Martani *et al.* (2021) trazem uma contribuição para a literatura de FP ao buscar retirar parte da subjetividade da análise dos impactos de efeitos adversos. Porém, não chegam a tratar diretamente do processo de apoio à tomada de decisão de FP, pois não endereça a avaliação de soluções (PENNINGGS; WIEGMANS; SPIT, 2020).

Observa-se nessa comparação de modelos propostos que, dentre os métodos de apoio à tomada de decisão em FP, há uma lacuna para um método que conduza o processo de FP desde o início, no levantamento de potenciais eventos incertos, até a decisão, que se materializa na escolha de soluções e ações para assegurar o FP.

Em mais detalhes, Martani *et al.* (2021) recomendam metas de resiliência, mas não auxiliam em como obtê-las. Shah *et al.* (2014) e Ghazy *et al.* (2022) defendem a ponderação da efetividade de soluções utilizando-se matrizes de decisão, que dependem somente da opinião e *experts*, sem apresentar em mais detalhes como decidir um limite de investimento, com que requisitos técnicos mínimos e quando será executado. O principal problema dessa lacuna é que dificulta que uma decisão baseada em seus modelos seja assertiva e auditável, premissas para essa dissertação.

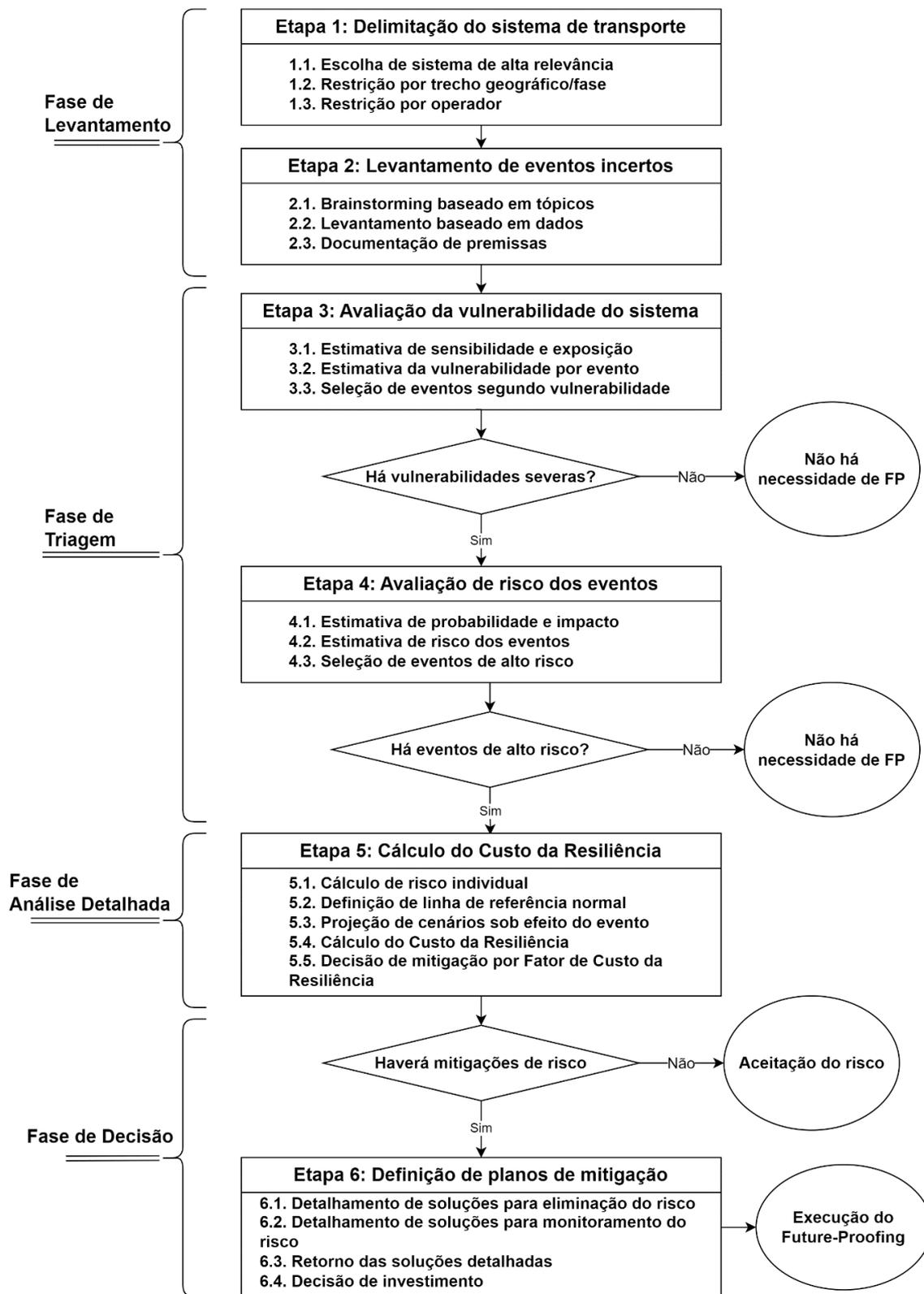
Pennings, Wiegman e Spit (2020) defendem que o uso de soluções analíticas são a forma mais promissora para a avaliação do FP, em específico um método baseado em ROT. Apesar da complexidade envolvida na análise de ROT e a potencial

aversão de decisores aos cenários múltiplos que ela demanda, como já apresentado no capítulo 2, segundo Biesek (2012), considera-se nessa dissertação que, através de um processo sistemático de seleção de eventos potenciais, um processo que projete e combine valores de custos e benefícios de FP com ROT dar assertividade ao processo, ao aproximar a análise de uma efetiva tomada de decisão.

## 5.2 ESTRUTURA DO MODELO

A Figura 7 mostra a estrutura do modelo criado

Figura 7 - Estrutura do modelo de análise e apoio à tomada de decisão de FP



Fonte: autor

As subseções abaixo explicam em detalhes as etapas do modelo proposto na Figura 7.

### **5.2.1 Etapa1: Delimitação do sistema de transporte**

Para se avaliar o FP de um sistema de transporte é importante delimitar inicialmente o que compõe esse sistema, sua infraestrutura e quem o opera. Há casos em que o sistema é mais facilmente delimitado, como em uma linha férrea com um só operador. Já para estradas, a rede de transportes tem influência mais significativa sobre a operação como um todo, incluindo a interação com redes locais e outros operadores.

A relevância do sistema de transportes é o principal critério para a sua escolha e delimitação. Nesse caso, a ideia de relevância é utilizada de maneira ampla e, apesar de se referir principalmente a considerações econômicas, pode ser tratada também sob aspectos sociais, culturais, políticos, militares, dentre outros. Justificar as decisões nessa etapa do processo de FP é essencial, assim como nas subsequentes, para que mesmo as considerações subjetivas possam ser tratadas e avaliadas nas próximas etapas do modelo.

Em termos gerais, os sistemas de transportes aptos à análise de FP e que serão incluídos na atividade “1.1. Escolha de sistema de alta relevância”, serão aqueles que, caso tenham sua operação comprometida totalmente ou parcialmente por eventos de baixa previsibilidade, serão mobilizados esforços urgentes para seu reestabelecimento, além dos compreendidos normalmente nos processos de operação e manutenção. Ainda, no caso que tais esforços não sejam realizados com sucesso, podem ocorrer danos significativos às esferas econômicas e sociais do local.

O sistema de transportes pode ainda ser delimitado de duas formas, geograficamente ou por operador. Há rodovias que se estendem por centenas de quilômetros, ligando cidades e estados com diferentes relevos, ambientes e realidades socioeconômicas. Em casos como esse uma análise de FP não pode compreender toda a extensão da via de uma vez, sendo necessárias análises separadas de acordo com delimitações espaciais.

Para a atividade “1.2. Restrição por trecho geográfico/fase”, a mais clara das delimitações pode ser a geográfica, em que, por exemplo um trecho de via em região litorânea é avaliado separadamente de outro em região de serra. Pode-se ainda generalizar essa delimitação como em “fases”, na qual seriam também separados trechos de acordo com fatores socioeconômicos, como uma parte da via que atende

grandes interesses comerciais. Ou então, por fases de construção e operação de uma via, em que uma parte já recebe tráfego enquanto outras estão em construção ou ainda não iniciaram.

Há sistemas de transportes em que uma delimitação geográfica tem menor relevância. Esse é o caso para os sistemas hidroviário e aeroviário, em que o FP está mais relacionado a fatores operacionais e de manutenção de uma infraestrutura. Aqui a análise deve focar separadamente por operador ou condição de operação, em que uma companhia aérea, por exemplo, está submetida a riscos diferentes dependentes das linhas que opera, a frota que detém e os protocolos de gestão que utiliza. Por isso, caso faça sentido, pode-se efetuar mais uma restrição do sistema na atividade “1.3. Restrição por operador”.

É esperado que uma empresa ou analista externo que pretenda realizar uma análise de FP sobre um sistema já tenha todas essas informações definidas, mesmo que de maneira implícita, e que essa etapa da análise não seja necessária. De maneira diversa, um órgão governamental que deseja encontrar vulnerabilidades em um grupo de sistemas de transportes deve prestar atenção a essa etapa, para garantir a validade das análises em etapas seguintes.

### **5.2.2 Etapa 2: Levantamento de eventos incertos**

Por sua própria natureza, eventos incertos e de baixa previsibilidade são complexos de serem listados. Ataques terroristas físicos e cibernéticos são exemplos de eventos negativos que podem não ser avaliados como grandes preocupações para um sistema de transporte de alta importância, principalmente porque pode não haver um histórico que justifique tal preocupação no dia a dia. No entanto, dentro de uma análise de FP esse tipo de evento hipotético deve ser trazido à tona no processo de avaliação.

Um brainstorming entre um grupo diverso, contendo especialistas multidisciplinares e pessoas/grupos da sociedade interessados é a maneira mais recomendada para assegurar que os tópicos necessários sejam discutidos durante essa Fase de Levantamento (Figura 7), do processo de análise. Assim, a atividade “2.1. Brainstorming baseado em tópicos” busca direcionar para que os interesses diversos estejam considerados. Os tópicos sob os quais a discussão sobre eventos incertos deve tratar são:

- tecnologia e inovação;
- questão ambiental;
- políticas sociais;
- licitação e gestão;
- local geográfico;
- contexto socioeconômico;
- tipo de infraestrutura;
- histórico do sistema em estudo;
- projeto de engenharia, e
- requisitos legais.

O *brainstorming* não deve ficar restrito somente aos tópicos acima. No entanto, esses foram identificados com base na literatura como os essenciais à discussão. O *brainstorming* pode ocorrer de forma livre ou induzido por perguntas feitas individualmente aos participantes, em que as respostas são coletadas e comparadas em grupo na busca de um consenso. As perguntas podem seguir um modelo como:

- Na sua opinião, quais são as questões/estresses mais cruciais que atualmente afetam o sistema em questão?
- Quais eventos emergentes têm a capacidade de mudar as tendências que estão atualmente sendo seguidas nesse tipo de sistema de transporte?

A análise crítica às respostas individuais dessas perguntas pode se dar por uma discussão livre ou aplicar-se o método Delphi para restringir as opções. No caso de um analista externo único, o processo pode ser seguido como acima, com o prejuízo de não existirem pares para complementar a discussão. Após os resultados do *brainstorming*, é necessário confirmar as escolhas.

A atividade “2.2. Levantamento baseado em dados” tem o propósito de relacionar as opiniões diversas com evidências materiais, a fim de garantir a validade do processo. Por exemplo, incluir um evento de migração populacional é viável desde que isso esteja baseado em dados além da opinião pessoal dos envolvidos, mas também em estudos socioeconômicos para a área e outros tipos de evidência.

Os tipos mais comuns de fontes de dados e evidências utilizados em análises de FP, mas não restritos a esses, são:

- modelagens;
- literatura acadêmica;
- casos correlatos;
- relatórios técnicos;
- notícias locais, e
- diretrizes normativas.

Ao lidar-se com a incerteza sempre haverá algum grau de subjetividade envolvido nas escolhas. No entanto, mostra-se que a adoção de etapas de verificação sequenciais tende a reduzir o problema do viés de confirmação. Além da análise em etapas, a atividade “2.3. Documentação de premissas” visa consolidar análise, dando a possibilidade de ser auditada ou repetida por outro grupo posteriormente. Essa informação pode estar em múltiplos formatos, incluindo relatórios textuais, imagens, simulações e modelos BIM. É recomendável que o formato e acesso dos arquivos seja aberto a quem interessar, com o uso de padrões internacionais, como exemplo, o IFC para arquivos BIM. Com as premissas devidamente documentadas, é possível deixar a Fase de Levantamento e passar para a Fase de Triagem.

### **5.2.3 Etapa 3: Avaliação da vulnerabilidade do sistema**

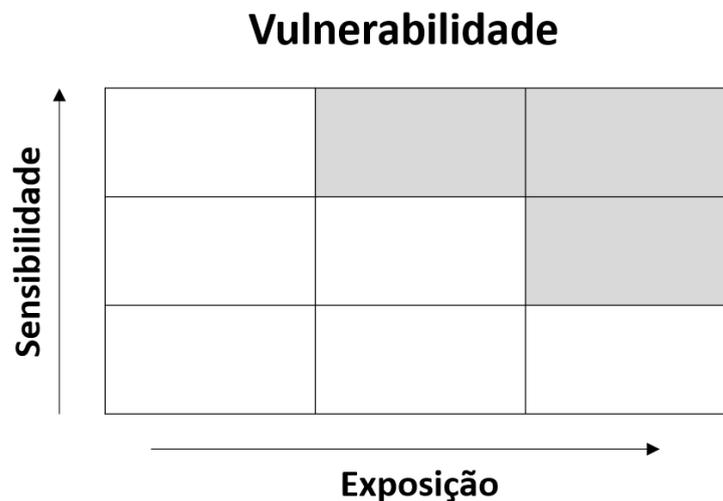
As análises nessa etapa perdem um tanto de sua multidisciplinaridade, focando-se mais na área técnica da análise. A atividade “3.1. Estimativa de sensibilidade e exposição” se concentra em atribuir essas duas características ao sistema sob análise, em relação aos eventos levantados na Fase anterior. Tais parâmetros são definidos da seguinte maneira:

- Sensibilidade, estima o quão suscetível é o tipo de projeto/sistema a riscos provenientes dos eventos levantados. Busca identificar quais eventos são relevantes, independentemente da localização.
- Exposição: probabilidade desses riscos ocorrerem na localização do projeto/sistema. A análise leva em conta cenários atuais e futuros, com foco em dados disponíveis para a localização do sistema.

Mais informações sobre o significado e extensão de tais conceitos podem ser encontradas na seção 5.1, dessa dissertação. Sugere-se uma análise qualitativa da sensibilidade e da exposição do sistema a cada um dos eventos levantados, dando-se uma nota de 1 a 3, para eventos mais ou menos críticos.

A relação multiplicativa entre os dois parâmetros, sensibilidade e exposição, dá a “3.2. Estimativa de vulnerabilidade por evento” em relação ao sistema. Essa relação pode ser disposta em forma de matriz 3x3, classificando-se todos os eventos em uma mesma matriz, conforme modelo (Figura 8).

Figura 8 - Modelo de matriz de vulnerabilidade do sistema aos eventos levantados



Fonte: autor

Após dispostos os dados na matriz de vulnerabilidade, segue-se para um primeiro processo de triagem, com o objetivo de reduzir a quantidade de eventos considerados. É comum que a infraestrutura de um determinado tipo de sistema de transportes apresente elevada sensibilidade a alguns eventos, por exemplo, estradas e terremotos. Porém, essa mesma infraestrutura de estradas pode ter exposição baixa a esses riscos, pois na região que está não há um histórico significativo de eventos sísmicos.

É preciso fazer a “3.3. Seleção de eventos segundo vulnerabilidade” buscando-se graus de sensibilidade e exposição elevados. A avaliação do que é um grau elevado é essencialmente qualitativa e fica a cargo dos avaliadores. Como recomendação geral, os itens que entrarem nos quadrantes mais críticos da matriz de vulnerabilidade, indicados pela cor cinza na Figura 8, são os que devem seguir para

os próximos estágios de análise, como eventos que geram vulnerabilidades severas ao sistema de transporte. Já os outros itens devem ser descartados, que é o objetivo principal na Fase de Triagem.

#### **5.2.4 Etapa 4: Avaliação de risco dos eventos**

Dado que os eventos considerados nessa etapa colocam o sistema sob algum tipo de vulnerabilidade, é indicado realizar a “4.1. Estimativa de probabilidade e impacto”, outros dois fatores que serão posteriormente comparados entre si. Esses são aqui definidos:

- a) Probabilidade: examina a probabilidade de ocorrerem os eventos identificados dentro de um determinado período de tempo de pelo menos a vida útil do projeto.
- b) Impacto: refere-se às consequências caso o evento identificado ocorra. Os impactos geralmente se relacionam com ativos e operações físicas, mas também saúde e segurança, impactos ambientais, sociais e econômicos, do sistema em si ou da rede mais ampla.

As métricas de probabilidade e impacto estão relacionadas com as estimadas na etapa anterior, de exposição e sensibilidade, respectivamente. A diferença entre elas se dá pela especificidade em relação ao projeto/sistema e sua interação direta com o local. Os detalhes de projeto são avaliados de maneira mais aprofundada, incluindo o tempo de serviço do sistema, a probabilidade do evento com o tempo e o impacto específico no sistema e seu entorno.

A atividade “4.2. Estimativa de risco dos eventos” é conduzida de forma semelhante ao visto antes para o parâmetro de vulnerabilidade. Uma equipe predominantemente técnica atribui qualitativamente valores de 1 até 3 para a probabilidade e impacto de cada evento, sendo que o risco é determinado pela multiplicação entre esses dois valores. Os eventos são então dispostos segundo os eixos de probabilidade e impacto em uma matriz 3x3, de forma análoga ao já apresentado na Figura 8. Não é obrigatório que algum risco passe da fase de triagem e seja analisado de forma detalhada em etapas posteriores. Recomenda-se que na atividade “4.3. Seleção de eventos de alto risco”, sejam escolhidos para análise detalhada aqueles dispostos nas áreas mais críticas (em cinza) da matriz Figura 8.

Caso não sejam identificados eventos de alto risco, a análise não precisa continuar, e é tomada a decisão de não se seguir com o FP. É preciso que fique claro que a compreensão das situações de risco muda com o tempo e que podem ser necessárias futuras revisões das etapas transcorridas até aqui.

### **5.2.5 Etapa 5: Cálculo do custo da resiliência**

Nessa etapa os eventos de alto risco são analisados separadamente, com equipes e profissionais alocados especificamente para a atividade de “5.1. Cálculo de risco individual”. Essa é a atividade mais difícil do processo de análise, pois não há uma recomendação geral do método ou significância que esse valor precisa ter. Em vezes, pode haver diversos tipos de abordagens conflituosas, dependendo do tipo do evento analisado.

Como recomendação geral, deve-se buscar a melhor avaliação do risco, que corresponda com a precisão que se deseja obter e com os recursos e prazos disponíveis. Caso o que se deseja seja uma análise definitiva para orientar um investimento, é preciso buscar uma estimativa que utiliza as ferramentas e processos de estado da arte. Já para uma análise rápida, métodos mais simples são recomendados, desde que baseados em princípios científicos sólidos. Como regra geral, o risco deve ser avaliado para o tempo de vida útil de projeto do sistema, independentemente do nível de detalhe da avaliação. Deve ser extraída da análise uma ou mais previsões possíveis e temporais, com uma probabilidade associada ou condicionamento a cenário específico.

Em paralelo à análise do risco deve ser realizada a atividade “5.2. Definição de linha de referência normal”, que visa caracterizar quantitativamente o estado normal de um sistema de transportes. Para isso, a forma mais recomendada é avaliar dois aspectos do sistema: o nível de serviço e os custos variáveis, ambos em unidades monetárias. O valor associado à monetização nível de serviço pode vir do valor de receita operacional, lucro operacional ou ainda o custo de homem-hora para operação, para os casos de serviços públicos em que não há a cobrança de tarifas. Já os custos variáveis podem ser retirados de relatórios internos das empresas, relatórios públicos nos casos de empresas abertas, ou ainda estimados em função de parâmetros de referência do setor, como o custo variável médio por extensão da via.

Em posse dos valores da linha de referência normal e da análise detalhada do risco, é possível realizar a “5.3. Projeção de cenários sob efeito do evento”, em que os riscos agiriam sobre o sistema e interfeririam nos valores base de nível de serviço e custo variável. Aqui, as simulações de tráfego são uma das melhores ferramentas para estimar como os eventos incertos podem interferir nos parâmetros operacionais do sistema. Novamente, a precisão da estimativa deve ser tão boa quanto o resultado que precisa ser gerado.

Em uma análise mais detalhada, as simulações devem ser executadas para cada cenário incerto. Já para uma análise mais rápida, aproximações podem ser feitas com base na modificação de dados operacionais reais, simulações de tráfego do estado normal ou outras formas de modelagem matemática. Em geral, empresas de capital aberto fornecem informações operacionais suficientes em relação às suas principais linhas, a ponto de dar um ponto de referência para uma análise, mesmo que simplificada (Anexo A).

Deve-se então calcular o custo para recuperação do impacto causado pelo evento, fazendo-se o “5.4. Cálculo do Custo da Resiliência”, em cada cenário projetado. Para isso, somam-se duas métricas, dano emergente e lucros cessantes em valor presente (VP), explicados em detalhes na seção 5.1 dessa dissertação. Em resumo, tratam respectivamente dos custos associados à correção dos danos de um sinistro e sobre os lucros perdidos devido ao mesmo dano, respectivamente. Ambas são métricas de uso regular para seguradoras e podem servir de ponto de referência para analistas internos, tanto como base para as estimativas nos cenários futuros quanto para referência dos valores atuais.

Por ser um custo, o sinal do Custo da Resiliência é negativo, o que leva a interpretar que quanto mais resiliente é o sistema, menor o custo associado ao retorno à normalidade.

O Custo da Resiliência é proporcional à relevância econômica do sistema, pois uma grande infraestrutura quando impactada terá um Custo da Resiliência que também é vultuoso. Assim, a análise deve seguir com a comparação do Custo da Resiliência em relação a outro fator, que leve em conta a relevância da operação sob análise.

Na literatura há poucas recomendações de como ponderar o Custo da Resiliência. Sugere-se aqui a comparação com outras métricas operacionais da linha de referência normal, como o custo variável, lucro operacional ou receita operacional.

Essa razão, entre o Custo da Resiliência pela métrica de referência resultará no Fator de Custo da Resiliência, e mostrará percentualmente a relevância do risco associado ao evento. Um valor limite/meta para essa razão deve ser estipulado, e dependerá de fatores que vão além do campo técnico, como questões legais, objetivos de negócio, visão subjetiva dos decisores, opinião dos investidores, padrão operacional mínimo etc.

Qual seja a métrica adotada para o denominador do Fator de Custo da Resiliência, a primeira tomada de decisão de FP será feita com base nele. Em específico, será escolhida ou a mitigação ou a aceitação do risco.

A mitigação do risco envolverá a escolha e posterior execução de ações de FP que buscarão reduzir a probabilidade do risco e seus impactos, quando possível, a fim de diminuir a criticidade do evento. Já a aceitação do risco não significa esquecer dos seus potenciais impactos, mas sim decidir esperar para reavaliação posterior, preferivelmente com maior certeza sobre o evento ou quando esse demandar mais urgência na apreciação.

Caso o Fator de Custo da Resiliência exceda o limite adotado, a mitigação é a opção correta a ser seguida, evoluindo-se para a Fase de Decisão do FP.

### **5.2.6 Etapa 6: Definição de planos de mitigação**

Quando se decide por seguir com a mitigação do risco é importante avaliar se a probabilidade do evento em si pode ser eliminada/reduzida, ou esse ter seu impacto eliminado/reduzido. Isso deriva do fato de que alguns eventos, mesmo que incertos, são controláveis e gerenciáveis, como as evoluções tecnológicas e anseios dos usuários. Já para eventos provenientes de forças da natureza, resta na maioria dos casos buscar a redução dos efeitos que esses causam.

Se após medidas de mitigação um evento que era de risco não causa mais um impacto significativo, a ponto de justificar novas preocupações de FP, pode-se dizer que o risco foi eliminado, mesmo que o evento continue ocorrendo regularmente. Como exemplo, o caso de uma infraestrutura litorânea que é elevada significativamente, para acima do nível das marés. Mesmo que eventos de maré alta continuem a ocorrer, o risco foi eliminado.

Quando não é possível ou viável eliminar os impactos do risco, a mitigação pode buscar reduzir tais impactos através de soluções de caráter específico, com

detalhamento voltado a resolver o problema específico de FP. Alguns exemplos disso podem ser vistos para riscos físicos, no reforço estrutural e superdimensionamento dos ativos, para relações contratuais, com a previsão de reservas de contingência e para inovação tecnológica, com a previsão de facilidades de integração de diferentes padrões e sistemas.

Além das soluções de caráter específico, as soluções de mitigação podem também se materializar pela instituição de planos de monitoramento e adaptação para processos, ativos ou contratos, que visam melhorar a resposta de um sistema frente a um risco e reduzir seus impactos. Tal tipo de solução (de monitoramento) vem se tornando mais comum com a integração de novas tecnologias nos processos de O&M, parte do processo intitulado Indústria 4.0. Como exemplo, dados diversos de uma rodovia podem formar uma Big Data analisável por tecnologias de IA, que encontram padrões lógicos para as ocorrências e farão uso de uma rede de sensores IoT para emitir alertas preditivos sobre as condições da via e de seu entorno. Apesar desse tipo de aplicação ainda ser limitada, já há casos de uso comercial em transportes e que devem se tornar cada vez mais comuns.

Em um processo de tomada de decisão, as soluções de monitoramento podem ser contrapostas às soluções específicas. A primeira tem a vantagem de permitir gastos limitados em aprendizado e treinamento, para que quando um evento ocorra, as ferramentas e equipes possam lidar com o impacto de forma mais eficiente, utilizando menos tempo e menos recursos. Por outro lado, as soluções de monitoramento exigem um esforço contínuo e de duração incerta, sendo que não há garantia de que o monitoramento das condições presentes ajudará na previsibilidade futura. A vantagem de adotar uma solução específica é a proposta de resolução rápida do problema, com maior consenso e que, em tese, poderia dar mais garantias da mitigação do risco, mesmo que com maior custo.

Independentemente do tipo de solução adotada para o FP, há grandes incertezas em ambas as abordagens e compará-las é essencial para escolher onde e como investir os recursos de FP. Esse é o contexto para as duas primeiras atividades dessa etapa, a “6.1. Detalhamento de Soluções específicas” e a “6.2. Detalhamento de soluções para monitoramento do risco”.

As soluções devem ser detalhadas em termos de custo, viabilidade técnica e prazo para execução. Esse é um processo altamente técnico, em que profissionais de engenharia, O&M e administração devem revisar os projetos estáticos e avaliar um

conjunto de medidas possíveis para lidar com o impacto do evento, que tem valor e escopo já estabelecidos pelas etapas anteriores.

No primeiro tipo de solução (específica), o custo pode ser representado simplificadamente por um gasto único que resolveria a questão da mitigação, devido à solução eliminar ou reduzir significativamente o risco. No segundo tipo (monitoramento do risco), o custo seria distribuído no tempo e dependente de um período de observação incerto, que se sugere aqui simplificar para a vida útil do sistema ou da concessão.

Para a atividade “6.3. Retorno das soluções detalhadas” é desejado comparar ambos os custos. Isso pode ser feito pelo método de fluxo de caixa descontado, usado com frequência para avaliar a atratividade de investimentos em geral. Os custos serão trazidos para um valor presente (VP) com base em uma taxa de desconto, usualmente a taxa de custo do capital. O tipo de solução que apresentar o menor custo é a mais atrativa segundo tal método e o VPL (valor presente líquido) do investimento será a diferença entre os custos de ambas as soluções.

De maneira geral, para que o custo da mitigação por solução específica compense, este precisa ser inferior ao Custo da Resiliência. Caso contrário, ações reativas tenderão a ser mais bem avaliadas que ações preventivas. No entanto, durante detalhamento, pode ser averiguado que as soluções de mitigação específica de fato excedem o Custo da Resiliência. Nesse caso, o menor dos dois valores deve ser escolhido para a comparação com as soluções de monitoramento.

A fraqueza desse tipo de avaliação, por fluxo de caixa descontado, é que ela não considera a incerteza quanto ao benefício da solução. O risco é um fator que pode tanto prejudicar quanto beneficiar o sistema, algo que só será descoberto com o passar do tempo. Assim, implementar uma solução de mitigação no momento presente pode ser uma má decisão, pois pode não atender ao FP da maneira esperada ou pode ser que o próprio evento mude suas características no futuro.

Medidas de baixo arrependimento são as melhores para serem avaliadas pelo método do fluxo de caixa descontado, pois geralmente tem custo baixo ou limitado e uma utilidade mais certa e próxima da data presente. Estão incluídas nas soluções de baixo arrependimento, melhorias de processo, documentação, atualização de sistemas, revisão de contratos, pequenas desapropriações, reforços estruturais pontuais etc. São usadas principalmente para endereçar questões de FP dentro das motivações categorizadas como Políticas Sociais ou por Tecnologia e Inovação.

Para fatorar a incerteza do FP, outra forma de avaliação das soluções é via ROT, a teoria/método das opções reais. Segundo a ROT a incerteza associada ao evento aumenta o valor de não se investir agora em FP, mas sim de esperar para um momento mais oportuno, uma “opção de atraso” disponível aos gestores. Esse direito de espera geralmente tem um custo (K), que aqui é associado ao custo de monitoramento e da implementação de soluções de FP derivadas desse monitoramento. O valor ao qual essa opção está associada é o da economia/ganho (S) em relação aos custos de mitigação para eliminação do risco (preventivo), ou o Custo da Resiliência (reativo). No caso, considerar o Custo da Resiliência como ganho esperado (S) é uma proposição específica feita nessa dissertação para o contexto de FP, já que usualmente esse valor (S) está ligado a lucros pela venda de ativos ou serviços.

Essa análise deve levar em conta que os sistemas de transportes têm uma exploração por tempo limitado (t). Esse pode ser adotado como o tempo de serviço antes da obsolescência, ou pelo fim do período de concessão para uma operadora, dependendo de quem esteja interessado na análise. Outras variáveis que entram na análise de ROT são a volatilidade do risco do evento ( $\sigma^2$ ), proveniente das modelagens de risco executadas anteriormente, e a taxa de desconto dos valores financeiros (r), dado geralmente pelo custo de capital multiplicado por um prêmio de risco. Como saída do modelo recebe-se o valor da opção de atraso. Quando essa opção tem um valor maior que o VPL, do método de fluxo de caixa descontado, decide-se esperar para realizar o investimento, reavaliando-o no futuro. Já quando o valor da opção é menor, decide-se realizar o investimento de FP no presente, sem atrasos.

O modelo de ROT permite ainda considerar um custo do atraso (*cost of delay*) para se tomar a decisão (y). Adotar essa variável faz sentido no caso de FP de transportes, pois a cada ano que passa sem obter os benefícios do FP, mais próxima a infraestrutura fica do seu tempo limite de uso (t). Para exemplificar a importância do custo de atraso (y), caso em uma concessão o evento não tenha ocorrido até alguns anos antes do vencimento (t), mesmo que esse venha a ocorrer, o retorno dado pela mitigação por monitoramento (K) será útil para manter só por poucos anos o nível de serviço do transporte, que dará lucros pequenos quando trazidos para o VP. Os valores de cada uma das variáveis desse modelo devem ser definidos caso a caso,

devido à complexidade por trás da ROT. Mais informações sobre ROT são fornecidas no Apêndice A.

A análise por opções pode ser desenvolvida analiticamente e servir como base para um processo de decisão. No entanto, os resultados dessa análise estarão sujeitos a diversos pressupostos questionáveis, o que tende a dificultar a aceitação do resultado. Ou pode-se usar o ROR, conforme descrito no capítulo da literatura, em que um mediador promove a discussão de opções com base nos preceitos da ROT, mas sem desenvolver a solução analiticamente. Para o caso da análise de FP, isso é mais adequado quando a avaliação se dá ao interno de organizações, com processos bem definidos.

No final, a experiência mostra que o mais provável é que um misto de soluções sejam adotadas na “6.4. Decisão de investimento”, envolvendo tanto soluções de caráter específico quanto de monitoramento. Como não há um método consolidado para a avaliação de tais investimentos, deixa-se essa etapa aberta a processos não descritos aqui. Mesmo assim, espera-se que esse modelo possa cumprir seu propósito principal, de facilitar a tomada de decisão de FP em transportes.

## 6 APLICAÇÃO DO MODELO

Este capítulo é dedicado à aplicação do modelo proposto no capítulo anterior e visa primeiramente demonstrar de forma prática o processo já descrito. O objeto de análise para essa demonstração é o projeto da Nova Ferroeste, o qual se encaixava corretamente nos pressupostos do modelo, no contexto e nos objetivos dessa dissertação. Maiores detalhes sobre a ferrovia e o processo de análise encontram-se no decorrer desse capítulo.

Ressalta-se que essa é uma análise externa, sem dados e acesso direto à equipe diretamente envolvida. O modelo permite tal tipo de análise que, se traz benefícios pela agilidade e uso de dados públicos, perde na precisão e não tem poder de acionamento dos resultados e recomendações. Idealmente, uma análise em parceria com a equipe interna seria executada em seguida, porém, decidiu-se não prosseguir nessa linha por limitações de tempo e recursos.

Ao final do capítulo, terá sido percorrido todo o processo de avaliação do FP para um evento adverso em um trecho específico do projeto da Nova Ferroeste, deixando-se claro que a análise pode e deve continuar além do exposto aqui, tanto de forma mais aprofundada quanto mais ampla.

### 6.1 DELIMITAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE

Nessa etapa da análise são delimitados o sistema de transportes, sua estrutura e quem o opera. O primeiro critério para a escolha de um sistema é sua relevância, que deve ser justificada a partir das prioridades do avaliador, seja por argumentos econômicos, sociais, culturais ou outros.

Foi decidido nesse capítulo de análise abordar o modo de transporte ferroviário. Em específico, o projeto para a Nova Ferroeste (1.1. Escolha de sistema de alta relevância). As ferrovias brasileiras têm uma participação importante no transporte de cargas no país, sendo responsáveis por cerca de 20% do total (CNT, 2018). Entre as principais cargas transportadas estão o minério de ferro, soja, milho, açúcar e celulose. Além disso, as ferrovias apresentam menor incidência de acidentes em comparação ao transporte rodoviário, tornando-se uma opção mais segura para o transporte de combustíveis e produtos químicos (CUNHA, 2009).

Entretanto, é consenso que o modo ferroviário se encontra subexplorado no país e precisa de investimentos em infraestrutura, sendo “necessária a realização de concessões de novos trechos [...] com a revisão das responsabilidades das concessionárias no que tange aos investimentos em expansão da malha” (CNT, 2018). Atualmente, a malha ferroviária brasileira soma cerca de 31 mil quilômetros, comparável à estrutura de um século atrás (CUNHA, 2022).

O governo brasileiro tem buscado soluções para essa defasagem através de iniciativas como o Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), que busca “ampliar e fortalecer a interação entre o Estado e a iniciativa privada por meio da celebração de contratos de parceria e de outras medidas de desestatização” (BRASIL, 2023). Assim, é de interesse do governo atrair investimentos privados para a construção, operação, manutenção e modernização das linhas ferroviárias nacionais.

O projeto da Nova Ferroeste é uma das prioridades do PPI e será desenvolvido com recursos da iniciativa privada, desde a construção até a operação. A proposta, apresentada pelo governo do Paraná, consiste na construção de um novo ramal ferroviário que ligará o estado ao Mato Grosso do Sul “segundo maior corredor de transporte de grãos e contêineres do País, perdendo em capacidade apenas para a malha paulista” (PARANÁ, 2023).

Além de atender a demandas econômicas, estima-se que haverá benefícios sociais diretos que são precificados segundo a melhoria de acidentes ferroviários (R\$ 70 bilhões), congestionamentos (R\$ 47 bilhões) e emissões de gases do efeito estufa (R\$ 16 bilhões) (PARANÁ, 2023). Portanto, justifica-se a relevância de uma análise de FP para esse projeto. No mais, a proposta ainda não conta com o projeto executivo, o que tornaria mais fácil alterar e definir novas medidas que aumentem a resiliência do sistema frente a eventos de baixa previsibilidade.

### **6.1.1 Detalhamento do objeto de análise**

A Ferroeste é uma ferrovia brasileira criada em 1988 com o objetivo de transportar a produção do oeste paranaense até o Porto de Paranaguá. Hoje o Governo do Paraná é seu maior acionista e detém a concessão para construir e operar a ferrovia, que busca atender os produtores do Paraná, Mato Grosso do Sul, Paraguai e norte da Argentina.

A via atualmente liga as cidades de Guarapuava e Cascavel e foi construída com recursos do governo estadual em parceria com o Exército Brasileiro, sendo inaugurada em 1996 e privatizada no mesmo ano. Entretanto, o consórcio vencedor do leilão, Ferrovia Paraná S/A - Ferropar, não cumpriu as metas e obrigações previstas, motivando em 2006 o governo do Paraná a retomar o controle da via, que agora é uma sociedade de economia mista.

Motivado pela possibilidade de ampliar a área e volumes atendidos pela ferrovia, está em desenvolvimento o projeto da Nova Ferroeste. Este prevê a revitalização do trecho existente entre Cascavel e Guarapuava, um novo trecho entre Guarapuava e Paranaguá, outro entre Cascavel e Maracaju e um ramal de Foz do Iguaçu a Cascavel, totalizando cerca de 1.291,06 km e interceptando 49 municípios, sendo 8 no Mato Grosso do Sul e 41 no Paraná.

A Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística (SEIL) é a responsável pelo projeto, que integra o Plano Nacional de Logística 2035. Há também a solicitação de autorização para implantar o Ramal Cascavel-Chapecó, que interligará o polo produtor de frangos e suínos no oeste catarinense.

Estima-se que com isso o empreendimento possa beneficiar mais de 400 municípios, reduzir o tráfego de veículos de carga, principalmente na BR-163/MS/PR e BR 277/PR, desenvolver a multimodalidade para o transporte de cargas e contribuir para a competitividade do porto de Paranaguá. A previsão é que a operação da Nova Ferroeste proporcione melhorias para o trecho entre Cascavel e o Porto de Paranaguá de 28% no custo logístico e 80% no tempo de trânsito.

A partir de 2017 o Governo do Estado do Paraná iniciou estudos para ampliar a Ferroeste. Em 2020, foi criado um Grupo de Trabalho para elaborar o Plano Estadual Ferroviário, com o objetivo de dotar o Paraná de infraestrutura de transporte ferroviário adequada.

As informações contidas nessa dissertação são provenientes de dois estudos iniciados em 2020 que estão disponíveis para o público em geral: o Estudo de Viabilidade Técnico-Operacional, Econômico-Financeira, Ambiental e Jurídica (EVTEA-J) e o Estudo de Impacto Ambiental e o Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), que já foram apresentados e passam por revisão (MPF, 2023).

Planeja-se transferir para a iniciativa privada a construção e operação da Nova Ferroeste por um prazo de 60 anos além do tempo de sua construção, totalizando estimados 65 anos. Ainda não há detalhes sobre o ente privado

responsável pela construção e operação da nova ferrovia, pois será designado na próxima fase do licenciamento ambiental. O ente privado também definirá o órgão financiador, que por sua vez fornecerá detalhes do financiamento.

No EVTEA-J estima-se que o valor total do empreendimento da Nova Ferroeste será de R\$ 24,4 bilhões, incluindo o material rodante. Para a construção e reforma completa da ferrovia estima-se um tempo de sete anos após finalização do projeto executivo.

O desenvolvimento ocorrerá de forma faseada, o que torna cabível a “1.2. Restrição por trecho geográfico/fase”, na delimitação do sistema. A Figura 9, retirada do EVTEA-J (TPF-SENER, 2022) demonstra que a primeira fase de construção ocorrerá no trecho entre Paranaguá e Cascavel, com outras fases a serem construídas somente após a finalização da construção e início da operacionalização da Fase 01. Os trechos da Fase 1 estão separados nos seguintes lotes: Lote 01 Balsa Nova – Paranaguá, Lote 02 Guarapuava - Balsa Nova e Lote 03 Cascavel – Guarapuava.

Figura 9 - Planejamento temporal para implementação da Nova Ferroeste nos primeiros 14 anos



Fonte: TPF-SENER (2022)

O Lote 3 corresponde ao trecho já existente da Ferroeste e contará tanto com novas construções quanto reformas que seguirão um traçado semelhante ao original. Este é o trecho de maior extensão da Fase 1 e tem a maior demanda prevista para a primeira década de operação. A operacionalização do Lote 3 é também essencial para a viabilidade do empreendimento, pois dará suporte ao financiamento das fases seguintes.

Dessa forma, decidiu-se restringir a análise desta dissertação ao trecho correspondente ao Lote 3 da Nova Ferroeste, o trecho entre Cascavel e Guarapuava.

Não houve a “1.3 Restrição por operador”, pois a ferrovia será concedida a somente um ente privado.

É importante ressaltar que o Projeto Executivo do empreendimento a ser licenciado ainda não foi finalizado. Assim, dados de projeto, que incluem tais estimativas, também serão aprofundados e refinados na próxima fase do licenciamento ambiental.

## 6.2 LEVANTAMENTO DE EVENTOS INCERTOS

Por se tratar de uma análise individual, a atividade “2.1 *Brainstorming* baseado em tópicos” não é tão abrangente e aprofundada quanto seria em um grupo multidisciplinar com membros internos e externos à organização. Portanto, buscou-se um levantamento rápido dos potenciais eventos incertos.

No caso da Nova Ferroeste, o EVTEA-J já apresenta uma matriz de riscos, elaborada pela equipe de consultores que escreveram o relatório (TPF-SENER, 2022). Optou-se por partir dos eventos listados nessa matriz, selecionando-se aqueles com implicações de longo prazo de acordo com os impactos previstos para cada um. Por exemplo, o risco de “licitação deserta” (nenhum interessado na licitação) pode resultar em custos adicionais para a republicação do edital, mas não afeta a manutenção do serviço a longo prazo e, portanto, não é relevante para a análise de FP.

É preciso levar em conta que a matriz de riscos não foi elaborada originalmente para orientar ações de FP e, por si só, não supre as necessidades dessa análise. Para a análise de FP é necessário associar cada evento a uma probabilidade de ocorrência e quantificar o impacto resultante, além de fornecer recomendações de mitigação/tratamento que estejam relacionados a um plano de ação, com prazos e custos associados.

Figura 10 - Trecho da matriz de riscos da Nova Ferroeste apresentada no EVTEA-J

Grupo	Risco	Causas	Consequências	Mitigação/Tratamento	Alocação
Riscos de Licitação	Licitação deserta	Condições restritivas de participação e de habilitação.	Custos de reelaboração e republicação do Edital.	Condições de participação abertas, com possibilidade de participação de empresas estrangeiras com decreto de autorização, bem como de entidades fechadas ou abertas de previdência complementar, instituições financeiras, fundos de investimentos e as empresas com atividade de investidoras financeiras, desde que reunidas em Consórcio com outras sociedades empresárias, e atendam às condições de habilitação.	Poder Concedente

Fonte: TPF-SENER (2022)

Conhecendo-se as limitações de abrangência e detalhamento dos dados do EVTEA-J, a lista apresentada no Quadro 4 contém uma seleção de eventos de risco a serem considerados na análise. A ideia é que, para uma avaliação rápida, esse tipo de processo seja válido para iniciar a discussão e embasar as etapas seguintes.

Quadro 4 - Eventos levantados com possíveis impactos de longo prazo

<b>Evento</b>	<b>Efeito de longo prazo</b>
Seleção de propostas aventureiras e inexecutáveis	Inexequibilidade do Contrato
Aumento de Custos na execução das obras da ferrovia	Inexequibilidade do Contrato.
Atraso na aceitação das obras de responsabilidade da Concessionária	Atrasos no cronograma.
Problemas construtivos	Depreciação acelerada; Necessidade de reconstrução
Perecimento devido à baixa qualidade dos bens	Investimentos adicionais para a manutenção corretiva e preventiva dos bens
Perecimento devido à obsolescência tecnológica dos ativos da Concessão	Investimentos adicionais para a atualização
Redução/aumento de demanda	Redução/aumento permanente do volume de transportado
Mudanças nos padrões de desempenho	Exigência por parte do Poder Concedente de novos padrões de desempenho no futuro.
Gestão Inadequada do Contrato	Assimetria nos sistemas de informação do Poder Concedente e do Concessionário.
Eventos climáticos	Necessidade de investimentos adicionais; Refazimento dos trabalhos; Sanções dos órgãos competentes; Impacto na operação; Impossibilidade de início da operação; Não atendimento aos indicadores de desempenho; Paralisação temporária ou permanente das atividades
Mudanças tecnológicas com desempenho diferente do esperado	Custos/Despesas adicionais; Refazimento dos trabalhos; Responsabilização por acidentes ou danos a terceiros; Atraso nos cronogramas
Tecnologia empregada na ferrovia e material rodante	Não atendimento aos indicadores de desempenho; Impacto na operação; Queda na qualidade do serviço
Imposição de alterações unilaterais pelo Poder Concedente	Extinção do contrato e instauração de procedimento para a apuração das indenizações devidas à Concessionária; Aumento imprevisto dos custos de projeto/ engenharia e operação da ferrovia
Término antecipado por força maior - eventos da natureza	Extinção do contrato.
Término antecipado por Rescisão contratual consensual	Extinção do Contrato; Custos adicionais
Término antecipado por insuficiência de desempenho da Concessionária	Extinção do Contrato.
Alterações tributárias	Custos adicionais.
Greve no setor de operação	Paralisação temporária ou permanente da operação.
Perecimento ou destruição dos bens da Concessão por manifestações populares	Investimentos adicionais de recomposição dos bens afetados.

Fonte: autor adaptado de TPF-SENER (2022)

Conforme descrito no capítulo 4 (Revisão Integrativa), os eventos motivadores do FP no Quadro 4 serão relacionados a questões de Licitação e Gestão, Questão ambiental, Tecnologia e Inovação e Políticas sociais. Se o brainstorming contasse com a participação de mais integrantes, seria útil o uso de perguntas para instigar a discussão, conforme descrito na seção 5.2.2 desta dissertação. Por exemplo,

questionamentos relacionados ao histórico do sistema poderiam aprofundar a discussão sobre o evento incerto “histórico com problemas contratuais” (Quadro 4), pois a ferrovia já apresentou problemas sérios com o cumprimento de determinações contratuais pela Concessionária. Ainda, durante toda a década de 2010 houve prejuízo, falta de manutenção e um baixo nível de serviço diante de sua capacidade (VALUUP, 2019).

Com a primeira seleção de eventos realizada, pôde-se seguir para a atividade “2.2. Levantamento baseado em dados”, que envolve a discussão e embasamento da relevância dos eventos em dados de fontes diversas.

Alguns cuidados devem ser tomados na forma de descrever os eventos. No caso dos eventos do Quadro 4, alguns estão excessivamente generalizados para uma análise de FP. Um exemplo disso é a descrição genérica de “Eventos climáticos”, com impactos que vão desde “necessidade de investimentos adicionais” a “paralisação permanente das atividades”. O correto para o seguimento da análise é detalhar essa entrada criando-se diversos tipos de eventos climáticos de relevância.

É também preciso considerar os riscos de maneira bilateral, como para o evento “redução/aumento de demanda”, a fim de preparar-se para atender ambas as situações com um nível de serviço adequado. Não é necessário determinar as causas do risco durante a análise, desde que se possa avaliar os impactos e uma probabilidade aproximada para tal ocorrência.

Para esta dissertação, foi tomada a decisão de avaliar o FP relacionado a somente um evento, escolhendo-se para isso o das precipitações extremas, um detalhamento dos “eventos climáticos” já descritos. O trecho existente da Ferroeste já tem um histórico de problemas com as chuvas intensas na região, incluindo alagamentos, deslizamentos e queda de rochas. Em 2014, a ferrovia ficou interrompida por 14 dias devido a deslizamentos resultantes de chuvas intensas (G1-PR, 2014).

O trecho de Nova Ferroeste entre Cascavel e Guarapuava seguirá um traçado semelhante ao atual, em uma região com relevo variável no planalto paranaense e sujeito a pluviometria elevada, acima de 1800mm/ano (TPF-SENER, 2022). Há também a preocupação com as mudanças climáticas durante o período previsto para a concessão, até 2087 (CORTEZ, 2020), nos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul e Santa Catarina.

Assim, compõem a “2.3. Documentação de premissas” as referências já apresentadas para:

- Dados detalhados já documentados no EVTEA-J e EIA/RIMA sobre relevo, pluviometria e fatores de segurança adotados nos projetos de engenharia;
- O histórico de impactos da chuva intensa no nível de serviço da ferrovia atual;
- Estudos científicos atuais que apontam para uma tendência de crescimento da pluviometria na região durante o período da concessão.

Segue-se então para as próximas etapas, que envolvem a avaliação individuada do evento de precipitações extremas.

### 6.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA

Nessa etapa realiza-se a 3.1. Estimativa de sensibilidade e exposição. A conceituação geral desses termos foi realizada na seção 5.2.3 dessa dissertação. Neste caso, o evento das precipitações extremas está contextualizado abaixo.

Parte das informações necessárias para avaliar a sensibilidade e exposição de ferrovias não são públicas, pois dependem de informações confidenciais para os operadores, geralmente por motivos comerciais ou de segurança. Quando o escopo da avaliação vai além de um sistema e compreende todo um modo de transporte ou país, a disponibilidade de informação pode ser ainda pior (PALIN *et al.*, 2021).

Durante a avaliação da sensibilidade do sistema, deve-se buscar padrões para o tipo do sistema de transporte que sejam válidos de forma geral. A literatura tenta especificar casos amplamente aplicáveis para os eventos de maior sensibilidade em ferrovias no mundo, embora isso seja difícil devido à diversidade dos climas regionais e, portanto, às diferentes características de projeto e comportamento da infraestrutura (PALIN *et al.*, 2021).

Dentre os desastres ambientais que ocorrem em ferrovias, os provenientes de eventos de precipitação extrema costumam ser os predominantes (SHAH *et al.*, 2014). Na China, de 2000 a 2016, 72% dos desastres foram causados por algum evento ligado à precipitação (ZHAO; LIU; WANG, 2020). De acordo com a literatura, os

principais danos que podem ser causados em ferrovias por precipitações extremas são (ABREU; RIBEIRO; SANTOS, 2021):

- Inundações e alagamentos de linhas ferroviárias e túneis subterrâneos;
- Inundação ou alagamento de sistemas de passagem subterrânea;
- Transporte de material de aterro (erosão), sobrecarga nos dispositivos de drenagem, e exposição das fundações, que podem levar ao colapso da estrutura e risco de descarrilamento;
- Danos aos equipamentos elétricos;
- Deslocamento de massa de solo e rocha (deslizamentos) e riscos associados que podem causar descarrilamento;
- Danos às camadas do pavimento ferroviário;
- Abrasão da estrutura de pontes;
- Inundações por alagamento e deslizamentos de solo e falhas em encostas;
- Erosão de aterros devido à elevação da lâmina d'água do rio e colapso de dreno longitudinal profundo;

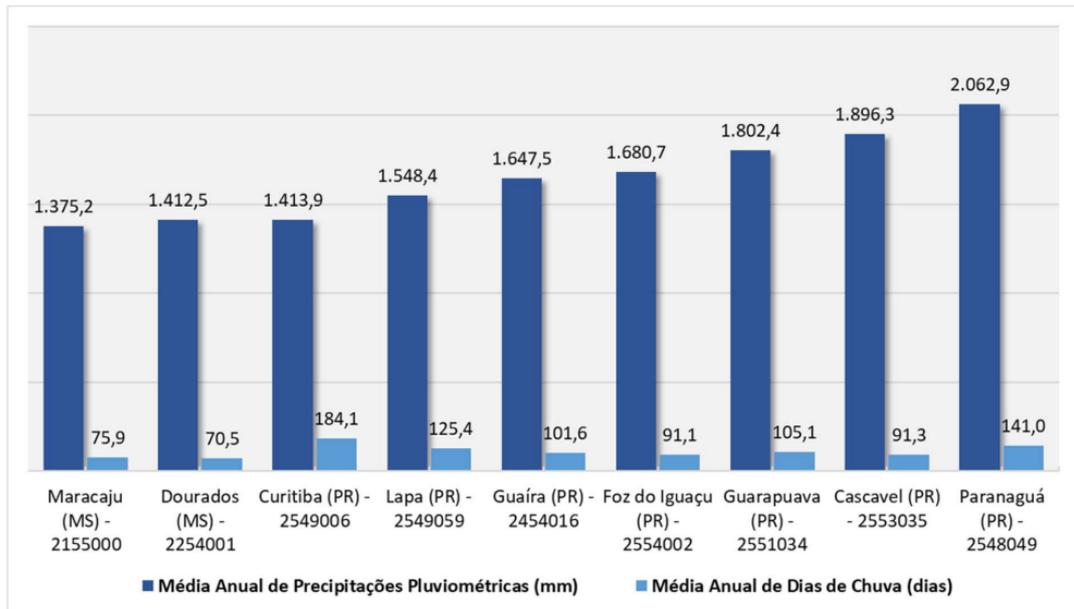
Levando-se em conta a relevância que a precipitação extrema tem como causa de desastres ferroviários e a ampla lista de potenciais complicações, decidiu-se qualificar esse evento como de alta criticidade para ferrovias (sensibilidade com valor 3).

A avaliação da exposição, serve para balancear a relevância global do evento para o tipo de infraestrutura com a incidência desse evento no local. Por exemplo, é importante considerar a flambagem de trilhos em locais com ampla variação térmica. No entanto, isso pode não fazer sentido em uma região que já está submetida a temperaturas elevadas durante todo o ano (ABREU; RIBEIRO; SANTOS, 2021).

A região de análise corresponde ao traçado entre Cascavel e Guarapuava, que pode ser descrito geologicamente como o Terceiro Planalto Paranaense, ou planalto de Guarapuava. É limitado a leste pela Serra Geral e a oeste pelo Rio Paraná, possuindo 300km de extensão no sentido norte/sul e 400km de leste/oeste. O Terceiro Planalto tem altitude variável, com valores acima de 900m no Sudeste e 200m no Sudoeste, indicando o declive acentuado que ocorre na região (ROSA; MARTINS; NERY, 2005).

Dentre as principais cidades cortadas pelo traçado da Nova Ferroeste, os municípios de Cascavel e Guarapuava e ocupam o segundo e terceiro lugares de volume de chuvas anuais, respectivamente (Figura 11). Isso inclui desde municípios na região litorânea até aqueles mais a oeste, no estado do Mato Grosso do Sul.

Figura 11 - Média anual de precipitações dos principais municípios cortados pelo novo traçado

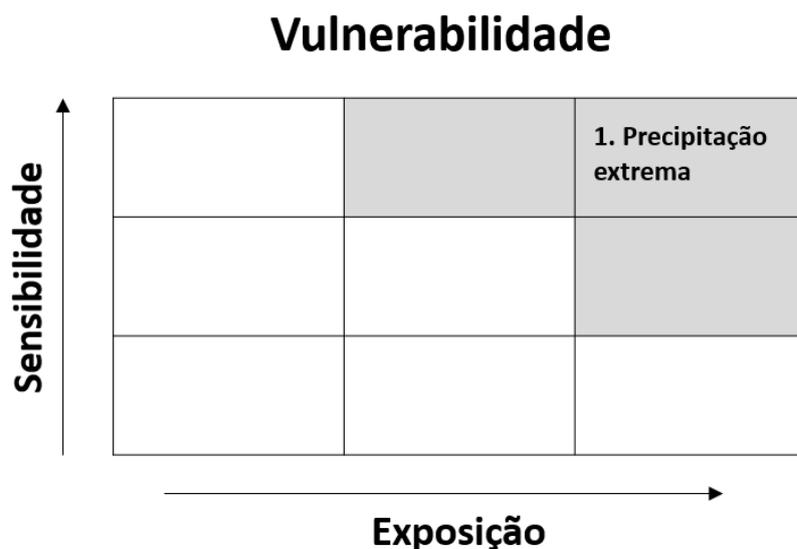


Fonte: TPF-SENER (2022)

A declividade variável e a precipitação elevada para o trecho de interesse justificam a consideração desse evento como de alta criticidade para a região de implantação da ferrovia (exposição com valor 3).

A simples multiplicação entre os valores de sensibilidade e exposição, ambos de valor 3, dão a “3.2. Estimativa de vulnerabilidade por evento” com nota 9 (elevada), conforme processo descrito na seção 5.2.3 dessa dissertação. De forma gráfica, pode-se representar o evento na matriz 3x3 de vulnerabilidade Figura 12, em conjunto com os outros eventos a serem considerados em uma análise mais aprofundada.

Figura 12 - Disposição do evento analisado na matriz de vulnerabilidade



Fonte: Autor

Como conclusão da etapa, para a “3.3. Seleção de eventos segundo vulnerabilidade”, recomenda-se que o evento de precipitações extremas passe para a próxima etapa da análise, por apresentar ambas sensibilidade e exposição elevadas, com nota máxima de 9 (elevada vulnerabilidade).

#### 6.4 AVALIAÇÃO DE RISCO DOS EVENTOS

O evento deve passar por uma etapa de avaliação qualitativa de riscos, que visa filtrar os eventos mais críticos que avançarão para as etapas de análise detalhada. A obtenção da medida de risco passa antes pela “4.1. Estimativa de probabilidade e impacto”.

Quanto à probabilidade de efeitos adversos causados por precipitações extremas, estudos recentes mostram que os padrões de precipitação mudaram ao longo das últimas décadas em escala global, aumentando em intensidade e frequência. É previsto que os climas futuros serão ainda mais quentes, intensificando ainda mais esse processo (PALIN *et al.*, 2021).

CORTEZ (2020) expõe que há estudos que identificam essa mudança em algumas regiões do Brasil e outros que modelam como a precipitação extrema se comportaria em cenários não estacionários no país. É importante analisar a tendência regionalmente, pois nem todos os locais apresentam uma tendência de aumento das

chuvas extremas. No entanto, a indicação estatística é que a maior parte dos locais sofrerá com o aumento das chuvas devido ao aumento da temperatura global.

De forma geral, locais que já apresentaram uma elevação nos índices pluviométricos durante as últimas décadas são os mais propensos a continuarem aumentando. Espera-se que essa tendência continue com base nos modelos de mudança climática mais empregados, que indicam a continuidade do aumento de chuvas pelo menos até o ano de 2099. No Brasil, houve um aumento da intensidade das chuvas de tempo de retorno de 50 e 100 anos em alguns estados como Paraná, Acre, região central da Amazônia e litoral sul do Rio de Janeiro e São Paulo, com lâminas de precipitação acima de 200 mm/dia.

A abordagem mais comum para o projeto de soluções engenharia é utilizar a intensidade de precipitação de projeto segundo os valores de períodos de retorno. Porém, para projetar soluções que atendam aos efeitos das mudanças climáticas os dados, mesmo que mutáveis com o tempo, precisam estar compreensíveis para gestores e engenheiros projetistas. Isso por si só acarreta um problema para o caso de estudo, pois no Brasil as normas e procedimentos não obrigam a consideração de tais mudanças.

Contextualizando-se para a Nova Ferroeste, as cidades com maior variação de precipitação em um mês foram Três Barras do Paraná, com 271,8 mm, e Cascavel com 235,5mm, ambas no mês de junho. As duas cidades pertencem à região de interesse, o Lote 03 (TPF-SENER, 2022).

Segundo os dados do EVTEA-J (TPF-SENER, 2022), os taludes em situação de aterro foram considerados com um fator de segurança (FS) mínimo de 1,3, recomendado atualmente para ferrovias de tráfego moderado e nível baixo de segurança contra danos materiais e ambientais, valor mínimo usado quando o valor das propriedades ao redor e a chance de acidentes ambientais são reduzidos. Os parâmetros geotécnicos usados na análise foram obtidos através da correlação com o número de golpes (NSPT), obtidos nas sondagens de referência.

As análises revelaram que algumas seções de talude de aterro obtiveram FS equivalentes a 1,3, incluindo os subtrechos denominados 1.0.2 e 1.4.1, próximos a Cascavel e Guarapuava. O FS foi igual a 1,4 para as demais seções de taludes de aterro para o trecho em estudo e entre 1,4 e 2,1 para as de corte no mesmo trecho.

Nota-se que o projeto da Nova Ferroeste já prevê redundâncias estruturais para o caso dos taludes. Apesar de esses não serem as únicas estruturas sujeitas a

impactos de precipitações extremas, que incluem também outras questões como a drenagem, pode-se observar em geral que há a preocupação quanto a prever redundâncias visando o aumento da resiliência. No entanto, só com uma análise mais detalhada de FP pode-se avaliar os efeitos do evento na região, mais especificamente durante a segunda metade do século XXI, quando a ferrovia ainda estará funcional e dentro do período de concessão previsto. Assim, considera-se que a probabilidade de o sistema ser afetado pelo efeito adverso no futuro é média (probabilidade com valor 2).

Quanto ao impacto a ser considerado caso o evento venha a afetar o nível de operação da Nova Ferroeste, a resposta pode ser obtida de forma resumida observando-se a quantia de mercadorias a serem transportadas pelo trecho e qual o impacto direto de um interrompimento das operações na linha. A métrica de Toneladas por quilômetro útil (TKU) pode ser usada para essa análise por representar o esforço físico do transporte.

A métrica é obtida pela multiplicação da tonelagem transportada pela distância percorrida. Um interrompimento nos transportes, medido por interrupção de TKU, tem relação direta com a não cobrança de tarifas nos transportes de mercadorias e com os impactos econômicos a nível estadual.

A Figura 13 apresenta o TKU previsto com base em dados de 2020. É importante notar que as cargas originadas em postos de transbordo antes do de Guarapuava só tem destinos após esse mesmo posto. Ou seja, um interrompimento na linha em Guarapuava (final a leste do trecho de estudo) causaria um interrompimento total do transporte ferroviário da Nova Ferroeste em sentido leste.

Figura 13 - TKU para cargas com origem à oeste de Guarapuava segundo dados de 2020

TOTAL		ORIGEM				
		Maracaju	Amambai	Guaíra	Foz do Iguaçu	Cascavel
DESTINO	Maracaju	-	-	-	-	-
	Amambai	-	-	-	-	-
	Guaíra	-	-	-	-	-
	Foz do Iguaçu	-	-	-	-	-
	Cascavel	-	-	-	-	-
	Guarapuava	279.118.100,74	231.405.822,33	-	-	-
	Balsa Nova	308.718.374,28	247.231.674,82	111.669.861,51	53.490.211,69	-
	Curitiba	790.379.423,00	436.875.296,29	174.869.437,25	208.868.547,99	184.730.531,21
	Paranaguá	964.376.124,64	518.873.164,17	226.725.720,06	229.542.836,77	480.854.266,68

Fonte: TPF-SENER (2022)

Nem sempre em uma análise de FP informações como o TKU estarão livremente disponíveis, pois referem-se a dados internos e potencialmente confidenciais das organizações. No caso, os valores ainda são estimativas pré-projeto executivo, o que também impõe limitações aos resultados. Mesmo assim, para fins da avaliação qualitativa já pode bastar. As etapas de análise detalhada devem revelar mais sobre o valor desse impacto, que estará ligado a uma estimativa de tempo de interrupção do serviço dada a ocorrência do evento.

Ressalta-se que, apesar de essa ser uma atividade mais bem realizada por uma equipe de especialistas, é possível afirmar com base na situação descrita que o impacto negativo do evento pode ser de alta criticidade (valor 3 para impacto). Assim, a “4.2 Estimativa de risco dos eventos” atribui a nota 6 para o risco do evento em estudo, pela multiplicação simples entre sua probabilidade e impacto (2x3), conforme processo descrito na seção 5.2.4 dessa dissertação.

Subsequentemente, decidiu-se durante a “4.3. Seleção de eventos de alto risco” por continuar com a análise de FP para o evento de precipitações extremas, pois a nota associada ao risco apresentou valor igual ou superior a 6 (de médio a elevado). Isso significa que é reconhecida a necessidade de FP para esse evento e que a análise detalhada determinará as melhores maneiras de implementar (ou não) iniciativas nesse sentido.

## 6.5 CÁLCULO DO CUSTO DA RESILIÊNCIA

Para o “5.1 Cálculo de risco individual” recomenda-se buscar o melhor procedimento disponível que corresponda com a precisão que se deseja obter e com os recursos e prazos disponíveis. No caso dessa dissertação, não se busca uma análise definitiva que servirá de base para um investimento, mas sim uma análise rápida. Foi então adotada uma estimativa de alto nível baseada em dados científicos.

Em específico, utilizou-se como base para a estimativa de risco um estudo conduzido por Cortez (2020), que avaliou o efeito das mudanças climáticas sobre as lâminas de precipitação utilizadas em projetos de engenharia em todo o território brasileiro, associadas aos períodos de retorno ( $T_r$ ) de 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Tal estudo baseou-se na premissa de que com as mudanças climáticas, os valores utilizados atualmente para dimensionamento de projetos podem não ser válidos no futuro, o que traz consigo riscos associados. As diversas projeções do estudo cobrem um período de hoje até o ano 2099.

Atualmente no Brasil não é usual e não há uma regra que defina que projeções climáticas de longo prazo precisem ser utilizadas no dimensionamento de ativos de transportes. Mesmo assim, um conhecimento de cenários mais prováveis foi considerado suficiente para direcionar a presente análise. Ressalta-se que essa dissertação não busca aprofundar-se especificamente sobre a discussão da análise detalhada dos riscos, climáticos ou não, mas sim demonstrar o uso do processo de avaliação de FP.

Como regra geral, o risco deve ser avaliado para o tempo de vida útil de projeto do sistema ou o período de concessão. Como o risco avaliado é climático, optou-se por seguir a recomendação já feita por UE 2021, de avaliar pelo menos dois cenários climáticos de intensidades diferentes, mais e menos extremos. No entanto, essa decisão é facultada ao analista. Em específicos, os cenários climáticos foram o RCP 4.5 e RCP 8.5. Os RCPs (*Representative Concentration Pathways*) são cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE) usados para prever os impactos das mudanças climáticas no planeta. O RCP 4.5 é um futuro mais sustentável com redução gradual de emissões de GEE, enquanto o RCP 8.5 é um cenário de alto risco com aumento contínuo de emissões e consequências climáticas extremas (HAUSFATHER, 2019). Mais informações sobre essa escolha são dadas no Apêndice B.

Retirando-se os dados já trabalhados para do estudo climático de Cortez (2020), adotou-se como a estimativa mais provável uma média entre os efeitos dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 na região de interesse do estudo, que é uma das regiões com maior potencial de ser afetada no Brasil. Também, decidiu-se utilizar os tempos de retorno de 50 e 100 anos somente, pois esses correspondem ao dimensionamento dos ativos mais importantes, que para a Nova Ferroeste serão as Obras de Arte Correntes (Bueiros) e Obras de Arte Especiais (Pontes), respectivamente (TPF-SENER, 2022). Os dados foram divididos em dois períodos, até o ano 2095 e entre 2060 e 2099.

Essa estimativa, conforme descrita, indicou um aumento de 29% para as lâminas de precipitação de 50 anos e 50% para as de 100 anos até 2059, e um aumento nos anos entre 2060 e 2099 de 131% e 163% para as mesmas lâminas. Esses valores estão refletidos no Quadro 5, com mais informações sobre os cálculos no Apêndice B. É importante ressaltar que o aumento também ocorre em proporção similar para a frequência na ocorrência de precipitação com uma mesma intensidade. Essa foi uma premissa de análise de Cortez (2020) e já verificado historicamente em outros estudos (REN *et al.*, 2019). É preciso atentar-se à possibilidade de que alguns dos fatores de segurança utilizados no dimensionamento possam ser excedidos durante a vida útil da ferrovia.

Quadro 5 - Quadro com os aumentos aproximados das chuvas de projeto para a região de estudo

<b>Aumento médio por Tr</b>		
<b>Período</b>	<b>Tr50</b>	<b>Tr100</b>
<b>até 2059</b>	29%	50%
<b>2060 até 2099</b>	131%	163%

Fonte: autor

Em processo independente à avaliação de risco, parte-se para a “5.2. definição da linha de referência normal”, segundo o nível de serviço e custos variáveis. No caso, optou-se pela utilização dos dados previstos para o fim da concessão, em 2087, trazidos ao VP, por representarem um cenário de estabilidade dentro da projeção, em específico, os dados projetados de custos, receita e lucro com o transporte de mercadorias e a cobrança de tarifas, a operação propriamente dita, para as cargas que passam entre os terminais de Cascavel e Guarapuava.

Segundo projeção de demanda (TPF-SENER, 2022), das cargas que passam nesse trecho as com sentido litoral (exportação) representam 78% da receita total da Nova Ferroeste, enquanto as que vão para o interior (importação) representam adicionais 10%. Assim, o trecho servirá de caminho de passagem e/ou posto de transbordo para 88% do montante de receita da Nova Ferroeste, o que corresponde a uma receita relativa à operacionalização do trecho de R\$ 8,50 bilhões, valores demonstrados no Quadro 6 segundo índices “1” até “5”.

Os valores no Quadro 6 que estão com unidades “Reais” ou “Reais ao ano” referem-se somente aos valores no cenário de estabilidade, em 2087. Os valores trazidos ao presente estão como “Reais ao ano em VP”.

Para a “5.3. Projeção de cenários sob efeito do evento”, foram aplicados dois cenários, um primeiro considerando o clima como estático, já um segundo levando as mudanças climáticas em conta (clima não estacionário). Optou-se para a análise demonstrada aqui utilizar somente o valor de aumento de precipitação com Tr de 50 anos e período de 2060 até 2099, com aumento na intensidade e frequência das chuvas em 131%.

Escolheu-se o Tr de 50 anos por esse tratar mais especificamente do tempo de recorrência utilizado para os sistemas de drenagem e algumas das obras de arte na Nova Ferroeste, além de se enquadrar no período da concessão. Porém, recomenda-se aplicar uma diversidade maior de projeções e cenários caso haja a disponibilidade de tempo. Como não havia a disponibilidade de recursos para criar-se simulações de tráfego adaptadas para essa dissertação, optou-se por alterar os parâmetros já existentes nas simulações publicadas utilizando-se multiplicadores.

Partiu-se então para o “5.4. Cálculo do custo da resiliência”, para cada um dos cenários avaliados. Para as premissas relativas aos Lucros Cessantes, buscou-se estimar em alto nível as perdas associadas à receita e lucros no caso de um impacto severo ocasionado por precipitações extremas.

Não foi possível encontrar uma referência histórica para o impacto atual das precipitações em termos de dias parados da Ferroeste. Assim, para a Nova Ferroeste foi assumido 1,40 dias de parada por ano devido a esse tipo de evento, com base no histórico de 14 dias parados em 2014 pela chuva. Na prática, espera-se que uma chuva de mesma intensidade e duração cause menores danos à Nova Ferroeste, que terá estruturas mais reforçadas que as de atualmente. Para o cenário com mudança climática, considerou-se um aumento de 2,3 vezes na frequência dessa chuva,

associado ao fator de aumento de 131%. Portanto, nesse cenário foram considerados 3,20 dias de parada por ano (Quadro 6, índices “6”, “7” e “8”).

Quadro 6 - Processo de cálculo do Custo da Resiliência para etapa 5 do modelo

<b>Cálculo do Custo da Resiliência</b>					
<b>Índice</b>	<b>Variável</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte e justificativa</b>	<b>Cálculo segundo Índice</b>
<b>1</b>	Total de receita 2087	R\$ 9.663.208.801,25	Reais ao ano	(TPF-SENER, 2022)	-
<b>2</b>	% de receita que passa pelo trecho	88%	-	(TPF-SENER, 2022)	-
<b>3</b>	Receita associada ao trecho	R\$ 8.497.760.553,14	Reais ao ano	Autor, baseado em TPF-SENER (2022)	(1)*(2)
<b>4</b>	Margem de lucro operacional	38,6%	-	(TPF-SENER, 2022)	-
<b>5</b>	Lucro operacional do trecho	R\$ 3.279.639.082,34	Reais ao ano	Autor, baseado em TPF-SENER (2022)	(3)*(4)
<b>Lucros Cessantes</b>					
<b>6</b>	Tempo de parada histórico - clima estacionário	1,40	dias por ano	Arbitrado pelo autor. Considera histórico de 14 dias parados em 2014 (G1-PR, 2014)	-
<b>7</b>	Fator multiplicativo de clima não estacionário	2,31	-	Arbitrado pelo autor. A favor da segurança, por não considerar melhorias na Nova Ferroeste	-
<b>8</b>	Tempo de parada em clima não estacionário	3,20	dias por ano	Autor, baseado em Cortez (2020). Aumentando em 2,31x a frequência do sinistro	(6)*(7)
<b>9</b>	Lucros Cessantes - clima estacionário	-R\$ 12.579.437,58	Reais ao ano	Autor, cálculo segundo modelo proposto, utilizando o impacto nos lucros dos dias parados por um ano (365 dias).	(4)/365 * (8)
<b>10</b>	Lucros Cessantes - clima não estacionário	-R\$ 29.058.500,80	Reais ao ano	Autor, cálculo segundo modelo proposto, utilizando o impacto nos lucros dos dias parados por um ano (365 dias).	(6)/365 * (8)
<b>Dano Emergente</b>					
<b>11</b>	Custos operacionais variáveis de manutenção	-R\$ 2.056,27	milhão de Reais ao ano	(TPF-SENER, 2022)	-
<b>12</b>	Extensão total da via	1.370,00	km	(TPF-SENER, 2022)	-

13	Extensão do trecho de estudo	223,34	km	(TPF-SENER, 2022)	-
14	Custos de manutenção proporcionais à via	- R\$ 335.217.037,81	Reais ao ano	Autor, baseado em TPF-SENER (2022)	(11)*(12)/(13)
15	Custo por km no Brasil com desastres provenientes da precipitação	- R\$ 33.870,97	Reais ao ano	Autor, baseado em Koks <i>et al.</i> (2019) Divisão do custo brasileiro (U\$ 0,3bi) pela extensão da malha (13 mil km), com real a U\$ 0,20.	-
16	Dano emergente - clima estacionário	- R\$ 7.564.741,94	Reais ao ano	Autor, cálculo segundo modelo proposto	(13)*(15)
17	% Manutenção do trecho - clima estacionário	2,3%	-	Autor, cálculo segundo modelo proposto	(16)/(14)
18	Dano emergente - clima não estacionário	- R\$ 17.474.553,87	Reais ao ano	Autor, cálculo segundo modelo proposto	(13)*(15)*(5)
19	% Manutenção do trecho - clima não estacionário	5,2%	-	Autor, cálculo segundo modelo proposto	(18)/(14)
<b>Custo da Resiliência</b>					
20	Custo da Resiliência - clima estacionário	-R\$ 185.431.078,92	Reais em VP	Autor, cálculo segundo modelo proposto. Soma entre Dano emergente e Lucros Cessantes para cada cenário. Trazido para o VP com a taxa de desconto de 10,85% (TPF-SENER, 2022)	(9)+(16) em VP
21	Custo da Resiliência - clima não estacionário	-R\$ 428.345.792,30	Reais em VP	Autor, cálculo segundo modelo proposto. Soma entre Dano emergente e Lucros Cessantes para cada cenário. Trazido para o VP com a taxa de desconto de 10,85% (TPF-SENER, 2022)	(10)+(18) em VP
22	Fator de Custo da Resiliência - clima estacionário	0,61%	-	Autor, cálculo segundo modelo proposto. Custo da Resiliência dividido pelo Lucro operacional do trecho	((9)+(16))/(8)

<b>23</b>	Fator de Custo da Resiliência - clima não estacionário	1,42%	-	Autor, cálculo segundo modelo proposto. Custo da Resiliência dividido pelo Lucro operacional do trecho	$((10)+(18))/(8)$
-----------	--	-------	---	--	-------------------

Fonte: Autor

Os Lucros Cessantes anuais foram calculados a partir da perda de lucros com os dias de inoperatividade do trecho ao ano, dada uma margem de lucro operacional de 38,6% (Quadro 6, índices “8 “9” e “10”).

Para as premissas relativas ao Dano Emergente, buscou-se comparar dados da literatura em relação aos custos variáveis de manutenção a serem gastos no trecho de estudo do sistema. Esses custos referem-se a desembolsos de manutenção de propósito diverso que incluem equipamentos, materiais, pessoas e serviços. No mais, com ou sem mudanças climáticas, foi averiguado que no plano de investimentos delineado para a Nova Ferroeste não são previstos investimentos na correção e/ou prevenção dos efeitos de eventos incertos, como a precipitação extrema.

Os Custos variáveis de manutenção do trecho em análise resultaram em R\$ 335,22 milhões ao ano. Foi calculado a partir da literatura (KOKS *et al.*, 2019) uma estimativa para o custo anual médio por quilômetro relativo a eventos extremos de precipitação, específico para as ferrovias brasileiras, de R\$ 33.870,97/km (Quadro 6, dos índices “11” ao “15”).

Quando esse custo por quilômetro é comparado ao custo de manutenção total para o trecho, observa-se que sem mudanças climáticas as precipitações extremas representariam um acréscimo de 2,3% dos custos variáveis anuais com manutenção (R\$ 7,56 milhões). Já com a consideração da não estacionariedade do clima, esse valor passaria um acréscimo de 5,2% no previsto (R\$ 17,47 milhões), conforme Quadro 6, dos índices “16” ao “19”.

Somando-se Lucros Cessantes e Dano Emergente, obtém-se os valores anuais de R\$ 20,14 milhões e R\$ 46,41 milhões, para os cenários sem e com mudança climática, respectivamente. Esses valores representam em base anual o custo esperado para retornar o sistema para a linha de referência normal de funcionamento. Para o cálculo do Custo da Resiliência, tais valores anuais do futuro devem ser trazidos para o VP, resultando em um Custo da Resiliência de -R\$ 185 milhões e -R\$ 428 milhões para cada cenário (Quadro 6, índices “20” e “21”). É importante ressaltar

que essas são só estimativas de alto nível, e que os valores podem ser alterados substancialmente caso o tempo arbitrado de parada seja diferente do que o adotado, de 1,4 dias ao ano. Esse valor do tempo de parada dependerá principalmente da qualidade e da segurança do novo projeto e da sua execução, que não são aspectos avaliados diretamente nessa dissertação.

Para descrever o Custo da Resiliência de acordo com as proporções do sistema sob análise, é recomendado avaliá-lo segundo um Fator do Custo da Resiliência. Um gestor, tendo em disposição os valores de Fator do Custo da Resiliência, pode comparar o impacto previsto do evento em termos dos resultados operacionais. Então, limites podem ser traçados para decidir ou não pelo investimento em FP. Aqui foi utilizado o lucro operacional do trecho para dividir o Custo da Resiliência, resultando em um fator de 0,61% sem mudança climática e 1,42% com (Quadro 6, índices “22” e “23”).

Ressalta-se que para uma análise de tomada de decisão de investimento, é preciso trazer esses valores para o VP utilizando processos conhecidos de avaliação financeira. Para a determinação da taxa de desconto correta utilizam-se premissas externas à análise proposta aqui, de uma avaliação simplificada por analista externo. Por isso, utilizou-se a taxa de desconto de 10,85% já sugerida para o projeto da Nova Ferroeste. Para a exemplificação, parte-se do pretexto de que o risco calculado de perda de 1,42% do lucro operacional, devido ao evento de chuvas extremas, tenha ultrapassado uma meta pré-definida. Na prática, fatores como a cobertura e o prêmio da seguradora teriam influência nessa meta. O gestor deverá então tomar a decisão de ou aceitar o risco ou buscar sua mitigação.

No caso, aceitar o risco não significa ignorá-lo, mas sim observá-lo atentamente sem implementar ações no momento. Caso a mitigação seja julgada necessária, parte-se para a próxima etapa, em que os detalhes das soluções, custo e implementação no tempo serão definidos.

## 6.6 DEFINIÇÃO DE PLANOS DE MITIGAÇÃO

Inicialmente, para traçar os planos de mitigação é preciso questionar-se se é possível e viável eliminar o risco do evento avaliado. No caso em estudo isso não ocorre, pois a região do Lote 03 é exposta a um nível de precipitação significativa e ferrovias são vulneráveis a esse tipo de evento. No mais, a tendência futura é o

aumento das precipitações na região, o que tende a uma elevação do risco. Portanto, conclui-se a necessidade da mitigação do risco sem sua eliminação completa.

São caracterizadas aqui duas formas de categorizar as soluções de FP para transportes. A primeira é chamada de soluções de caráter específico, que se concentram em ações voltadas para mudar o projeto físico do sistema. Um exemplo disso é o registro e as sugestões feitas por Masood *et al.* (2016), apresentadas na seção 2.4 desta dissertação, para a ferrovia Dawlish, no Reino Unido.

O segundo tipo de solução são as de monitoramento. Achillopoulou *et al.* (2020) reuniram um histórico de diversas aplicações já registradas para o setor ferroviário desse tipo de solução, que costuma combinar tecnologia com introdução e mudança de processos de O&M.

O monitoramento de transportes por meio de tecnologias de sensoriamento tem se tornado uma prática viável e difundida em diversas aplicações. O uso de drones e *light detection and ranging* (LiDAR), por exemplo, permite avaliar condições de locais de difícil acesso, como estradas danificadas e áreas afetadas por desastres naturais (ACHILLOPOULOU *et al.*, 2020). Além disso, outras tecnologias de sensoriamento, como sensores de movimento, radiofrequência, calor e umidade, têm aplicações variadas, desde a verificação da integridade estrutural de peças até o controle do tempo de uso de equipamentos pelos profissionais.

No entanto, é importante destacar que cada tecnologia possui suas próprias vantagens e desvantagens, que incluem fatores como precisão, resistência, segurança física e digital e custo. De fato, o custo das tecnologias pode variar significativamente, desde equipamentos mais acessíveis, como medidores de impedância elétrica, até detectores de movimento de alta precisão por fibra ótica (ACHILLOPOULOU *et al.*, 2020). Nesse sentido, a escolha da tecnologia mais adequada deve estar diretamente relacionada aos objetivos, custos e momento de implementação na infraestrutura.

Não está no escopo dessa dissertação realizar uma recomendação sobre o tipo de solução a ser tomada. Aqui tais referências são apresentadas com a função de informar o que poderia ser projetado nas atividades de “6.1. Detalhamento de Soluções específicas” e “6.2. Detalhamento de soluções para monitoramento do risco”.

É importante ressaltar que essas soluções não são excludentes, e que em geral opta-se por uma mistura entre elas, pois ambos os tipos de soluções têm suas

vantagens e desvantagens e podem ser utilizadas de forma complementar. Por exemplo, soluções de caráter específico podem ser implementadas em áreas onde o risco é maior, enquanto o monitoramento pode ser utilizado para acompanhar o desempenho geral do sistema e detectar problemas antes que eles se tornem críticos.

A seguir, é realizada a atividade de cálculo do "6.3. Retorno das soluções detalhadas", a qual requer a atuação de uma equipe interna e especializada para sua execução com precisão. Para exemplificar um possível processo de avaliação empregado nessa etapa, pode-se supor que, diante de precipitações extremas, os custos relativos à implementação de soluções específicas de reforço foram considerados excessivamente elevados, a ponto de não justificarem o investimento. Esse cenário é passível de ocorrer em situações nas quais a extensão da via e dos sistemas de engenharia inviabilizam os custos de reforços e superdimensionamentos na sua totalidade.

Para exemplificar um possível processo de avaliação foi empregada a ROT, visando comparar os custos de soluções de monitoramento (K) com a economia gerada sobre o valor total do Custo da Resiliência (S). O modelo de Black-Scholes, descrito na seção 5.2.6 da dissertação, foi utilizado para avaliar se as soluções de monitoramento poderiam ser vantajosas do ponto de vista financeiro, para qual a opção de atraso do investimento de reforço teria valor (*Call price* > 0).

O Quadro 7 apresentado fornece as variáveis que devem ser inseridas no modelo de cálculo (DAMODARAN, 2012). A justificativa para o uso desse método de avaliação no caso em estudo pode ser encontrada no Apêndice B.

Quadro 7 - variáveis para a avaliação por ROT para a Nova Ferroeste

Variável	Valor
r	10,85%
y	10,00%
$\sigma$	1,31%
T	40
t	0
S	R\$ 428,00mi

Fonte: autor

Para o desvio padrão ( $\sigma$ ), no Quadro 7, supôs-se uma distribuição normal para uma chance anual de 95% de mudança nas precipitações de até +2,01%, em conformidade com o modelo de referência utilizado (CORTEZ, 2020).

A variável de tempo "t" representa os anos do presente até o início da existência da opção, que, neste caso, é considerada como o projeto executivo da Nova Ferroeste no Lote 03. Para simplificar a análise, o tempo "t" foi definido como 0, devido à proximidade dessa data, prevista para após o licenciamento ambiental. A outra variável de tempo "T" determina o tempo até a ocorrência do evento extremo (vencimento da opção), que, nesse caso, foi estabelecido em um momento fixo após 40 anos da concessão.

A concessionária vencedora da licitação da Nova Ferroeste terá exclusividade de 65 anos para operação e poderá implementar soluções de monitoramento em qualquer momento desse período. No entanto, é possível que haja um custo associado à espera/atraso (y) na implementação das soluções de monitoramento, o que se torna o principal fator na decisão de investimento em modelos de Black-Scholes de longo prazo. Para esse estudo, foi suposto que os investimentos em monitoramento devem iniciar em 8 anos após a licitação para que possam trazer o retorno esperado, e que o custo anual de espera é de 12,5% do valor dessa solução em Valor Presente (VP).

Se o custo de espera/atraso (y) tiver um valor reduzido, o modelo recomendará manter a opção até o fim da concessão (investimento contínuo em monitoramento), mesmo que o custo final do monitoramento seja maior que o Custo da Resiliência causado pelas precipitações. Em caso contrário, se o custo de espera/atraso for elevado, as soluções de monitoramento serão desencorajadas, priorizando investimentos imediatos e de caráter específico (DAMODARAN, 2012). Portanto, um valor impreciso de "y" pode comprometer significativamente a eficácia da avaliação por ROT. Essa característica revela uma limitação da ROT na avaliação do FP, uma vez que o "y" é influenciado por fatores diversos que vão além de considerações técnicas, como previsões contratuais, interesses da concessionária e fiscalização do poder público.

Partindo-se dos dados de entrada explicados acima, pode-se avaliar os custos de monitoramento (K) em função do Custo da Resiliência (S = R\$428 milhões) no Quadro 8, a fim de determinar o valor da opção, chamado como *Call price* ou *Call*

*value* no modelo de Black-Scholes. O valor da opção deve ser maior que zero para recomendar o investimento “K”.

Quadro 8 - Resultados da avaliação de ROT para a Nova Ferroeste

K (% de S)	K (R\$ milhão)	N(d1)	N(d2)	Call price (R\$ milhão)
10%	R\$ 42,80	1	1	R\$ 2,33
20%	R\$ 85,60	1	1	R\$ 1,77
30%	R\$ 128,40	1	1	R\$ 1,21
40%	R\$ 171,20	0,99914	0,998863	R\$ 0,65
50%	R\$ 214,00	0,670576	0,640073	R\$ 0,15
60%	R\$ 256,80	0,039283	0,032743	R\$ 0,00
70%	R\$ 299,60	0,000148	0,000107	R\$ 0,00
80%	R\$ 342,40	8,41E-08	5,36E-08	R\$ 0,00
90%	R\$ 385,20	1,44E-11	8,15E-12	R\$ 0,00
100%	R\$ 428,00	1,14E-15	5,85E-16	R\$ 0,00
110%	R\$ 470,80	5,68E-20	2,65E-20	R\$ 0,00
120%	R\$ 513,60	2,14E-24	9,13E-25	R\$ 0,00

Fonte: autor

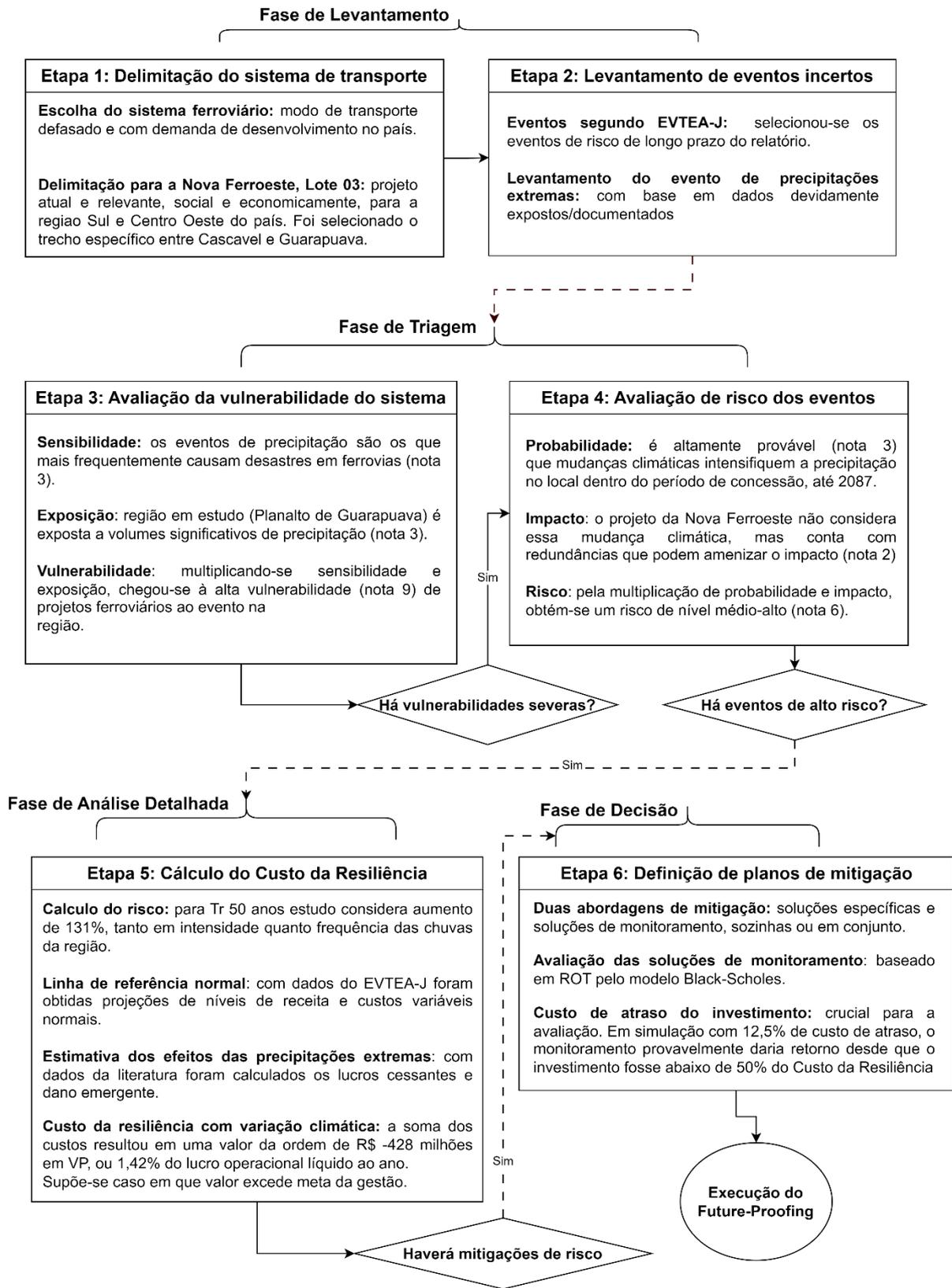
Os fatores  $N(d1)$  e  $N(d2)$  são valores de probabilidade fundamentais dentro do modelo de Black-Scholes. A coluna  $N(d2)$  do quadro 2 mostra a probabilidade ajustada ao risco para o exercício da opção, isto é, a probabilidade de que o custo incorrido nas soluções de monitoramento (K) resulte na melhor decisão (*Call price* > 0). Pode-se observar que para um “K” acima de 50% de “S”, a probabilidade de que isso aconteça cai abaixo de 50%, enquanto “K” menor de 30% de “S” a probabilidade chega a 100%. Já o  $N(d1)$  é um fator dependente da premissa anterior de exercício da opção, e representa a probabilidade de que o VP do benefício exceda o VP atual estimado.

É com base em avaliações similares e complementares a esse que se pode chegar à “6.4. Decisão de investimento”. Reafirma-se aqui o que foi mencionado no capítulo 2, de que a avaliação financeira e o uso de um modelo sistemático não transpõem todas as barreiras para se chegar à implementação do FP. Em vezes, ou primariamente, deve-se buscar o alinhamento das partes e da diversidade de visões, interesses e poderes, atrás de uma proposta conjunta.

## 6.7 DESTAQUES DA APLICAÇÃO DO MODELO

A Figura 14 dispõe os principais destaques da análise de FP da Nova Ferroeste, separando-os pelas etapas em que foram obtidos.

Figura 14 - Destaques da aplicação do modelo por etapa



Fonte: autor

Abaixo, o texto fornece um resumo do que foi executado na aplicação com a finalidade de detalhar as informações contidas na Figura 14.

Etapa 1: Nessa etapa foi justificada a escolha pelo modo de transporte ferroviário, em particular o projeto da Nova Ferroeste, devido à defasagem do desenvolvimento do transporte ferroviário no Brasil. Em específico, a análise de FP foi justificada pela relevância social e econômica esperada da Nova Ferroeste.

Etapa 2: o Estudo de Viabilidade Técnica (EVTEA-J) já apresenta uma matriz de riscos elaborada por equipe de consultores. Partiu-se dessa matriz para selecionar eventos com potenciais implicações de longo prazo. Com base em dados levantados e registrados criou-se uma justificativa técnica e científica para a continuidade da análise de FP especificamente sobre o evento de precipitações extremas.

Etapa 3: Os eventos de precipitação são os que mais frequentemente causam desastres em ferrovias, como inundações, deslizamentos de terra e danos à infraestrutura elétrica, o que confere a alta sensibilidade ao evento (nota 3). Levando em conta que a região em estudo (Planalto de Guarapuava) registra volumes significativos de precipitação, a exposição ao evento foi considerada alta (nota 3). Multiplicando-se sensibilidade e exposição, chegou-se à alta vulnerabilidade (nota 9) de projetos ferroviários ao evento na região.

Etapa 4: Estudos recentes indicam que as mudanças climáticas tendem a intensificar precipitações extremas principalmente em locais com precipitação já elevada, o que torna altamente provável (nota 3) que o evento seja relevante em durante o período de concessão, até 2087. O projeto da Nova Ferroeste não considera essa mudança climática, mas conta com redundâncias dadas pelos fatores de segurança adotados, o que torna os impactos esperados críticos em nível médio (nota 2). Pela multiplicação de probabilidade e impacto, obtém-se um risco de nível médio-alto (nota 6).

Etapa 5: Foi utilizado um estudo climático para prever a mudança nos tempos de retorno das chuvas em diversos cenários na região de estudo, sendo escolhido o Tr de 50 anos para a análise. A previsão é um aumento de 131% na intensidade e frequência das chuvas após 2060. Com dados do EVTEA-J foram obtidas projeções de níveis de receita e custos variáveis normais sem a ocorrência dos eventos incertos.

Os lucros cessantes e dano emergente foram então estimados utilizando dados disponíveis na literatura para os impactos das precipitações extremas em ferrovias e aplicando-os aos dados simulados no EVTEA-J. Ressalta-se que para uma

análise mais aprofundada recomenda-se criar simulações distintas. Com a soma dos dois valores foi possível obter o Custo da Resiliência, que indica o custo para retornar o sistema à linha de referência normal. Com o efeito das mudanças climáticas esse resultou em um custo em VP da ordem de R\$ -428 milhões, restrito ao trecho em estudo. Assumindo que um gestor avaliaria tal resultado como um custo excessivo, dado que representaria anualmente 1,42% do lucro operacional, decide-se por implementar soluções de FP.

Etapa 6: Foram apresentadas duas abordagens para mitigar o risco em sistemas: soluções específicas, que visam modificações primariamente no projeto físico do sistema, e soluções de monitoramento, que se utilizam de tecnologias para monitorar o desempenho do sistema e detectar problemas antes que estes atinjam níveis críticos. Embora não seja fornecida uma recomendação específica sobre qual solução deve ser implementada nem sobre os valores a serem incorridos no caso em estudo, sugere-se que ambas as abordagens podem ser utilizadas em conjunto.

Em seguida, realizou-se uma análise de valor das soluções de monitoramento pela ROT, empregando-se o modelo Black-Scholes para avaliar se elas são vantajosas do ponto de vista financeiro. Os resultados indicam que o custo de atraso de um investimento é um fator crucial para avaliar o valor dessas soluções. No caso da Nova Ferroeste, caso esse custo de atraso seja de 12,5% do benefício ao ano (dado arbitrado), soluções de monitoramento teriam chances predominantes de retorno financeiro desde que custem até 50% do valor esperado com o benefício.

## 7 CONCLUSÃO

### 7.1 CONCLUSÃO DA PESQUISA

Essa dissertação buscou responder o problema da falta de procedimentos reconhecidos para avaliar e direcionar a implementação do *Future-Proofing* em sistemas de transportes. Para isso, foi definido como objetivo geral do estudo propor um modelo de análise e apoio à tomada de decisão de *Future-Proofing* para transportes, o qual foi atendido por essa dissertação.

As seguintes premissas de pesquisa foram estabelecidas na seção 1.3 para direcionar o estudo.

Premissa principal: é viável propor um modelo conceitual sistemático e confiável, voltado para a avaliação e tomada de decisão do *Future-Proofing*.

Premissas secundárias:

- a) O problema da necessidade de um modelo já teria sido abordado por outras publicações, incluindo os requisitos desejáveis para ele;
- b) A discussão sobre *Future-Proofing* seria atual e relevante, envolvendo diversos campos do conhecimento e motivações;
- c) Como os resultados práticos do *Future-Proofing* são vistos em longo prazo, um método de pesquisa baseado em estudos de caso práticos seria uma tarefa pouco viável para o escopo dessa dissertação;
- d) A literatura internacional sobre o *Future-Proofing* em transportes é a fonte de informações mais adequada para a condução da pesquisa, por conter tanto dados históricos de longo prazo quanto recomendações atuais;

Os resultados da pesquisa foram obtidos conforme os objetivos específicos delineados para o trabalho:

- a) apresentar a relevância do *Future-Proofing* para transportes: contextualizou-se que o problema é relevante devido ao desejo e à importância socioeconômica de garantir a longevidade operacional dos sistemas de transportes, satisfazendo a premissa específica “b”;

- b) identificar os fatores que motivam o *Future-Proofing* em transportes: através de uma revisão integrativa sobre a literatura no tópico foi possível identificar quatro principais Motivadores de *Future-Proofing*, Licitação e Gestão, Questão ambiental, Tecnologia e Inovação e Políticas sociais. Os artigos selecionados para a revisão integrativa foram categorizados, analisados e comparados entre si segundo esses motivadores;
- c) propor uma definição para o termo no contexto de transportes: compreendendo a diversidade de abordagens e aplicações na literatura, foi proposto que o *Future-Proofing* em transportes é um processo direcionado a “elevar a resiliência do sistema a eventos futuros incertos e/ou a mitigar impactos causados pelo sistema sobre seu entorno”;
- d) identificar e descrever as principais lacunas da literatura atual: algumas das principais lacunas encontradas foram a falta de uma definição clara e consensual do conceito, a ausência de procedimentos consolidados para tomada de decisões e o conflito de opiniões sobre a melhor abordagem metodológica, se baseada na opinião de especialistas ou dados operacionais e modelagens de cenários futuros. Além disso, há a carência de modelos abrangentes que englobem todas as fases do processo de análise e tomada de decisão;
- e) detalhar o modelo e seu embasamento na literatura: partindo-se dos resultados da revisão integrativa, foi possível obter as bases teóricas para elaborar o modelo proposto, que incluíam desde recomendações específicas a modelos já desenvolvidos, mas que não compreendiam o processo por completo, o que satisfizes as premissas “a)” e “d)”. Optou-se por descrever tal processo segundo quatro fases da análise de *Future-Proofing*: de Levantamento, Triagem, Análise detalhada e Decisão. Seguindo-se tais fases, foi proposto o modelo de avaliação e apoio à tomada de decisão, que é desenvolvido em etapas sucessivas de elevação do conhecimento e especificidade sobre os eventos, seus efeitos e as soluções viáveis, e
- f) aplicar o modelo em um caso real e relevante: após ser descrito em detalhes, o modelo foi subsequentemente aplicado em um importante sistema de transporte, o projeto da Nova Ferroeste, empreendimento ferroviário em processo de licitação e que ligará os estados do Mato Grosso do Sul e de Santa Catarina até o litoral do Paraná.

Partindo-se da perspectiva de um analista externo, com dados limitados, foram avaliados diversos tipos de eventos que poderiam trazer risco ao projeto da Nova Ferroeste em relação a um trecho específico da ferrovia, o que liga Cascavel a Guarapuava, sendo que o evento de precipitações extremas foi considerado o mais relevante. Uma ferrovia na região já é vulnerável a esse tipo de fenômeno, que quando se considera o efeito potencializador das mudanças climáticas, não consideradas no projeto da Nova Ferroeste, o evento das precipitações extremas se torna de alto risco.

Foi determinado o valor de Custo da Resiliência para o projeto analisado, que corresponde ao custo monetário para retornar as operações à uma linha base de nível de serviço normal. Para o caso das precipitações extremas na Nova Ferroeste, esse valor pode representar custos na casa de centena de milhões de reais em valor presente somente no trecho de estudo. Em seguida, foi demonstrado como gestores com poder de decisão podem fazer uso de técnicas de avaliação baseadas em Teoria das Opções Reais (ROT) para ponderar a viabilidade dos investimentos de *Future-Proofing* e o melhor momento para implementá-los, sejam esses investimentos com soluções específicas ao problema ou então voltados para o monitoramento e aprendizado.

O modelo mostrou-se útil para reduzir o problema da complexidade de decisão em *Future-Proofing* porque permitiu direcionar um conceito abstrato por processos bem definidos e auditáveis, a partir dos quais tanto profissionais internos quanto externos à uma organização podem realizar análises válidas que levam desde o reconhecimento básico do evento de risco até a viabilidade do investimento. O modelo permite ainda que a análise seja feita de forma detalhada e precisa, com o propósito de orientar uma decisão, ou então que seja executada uma análise simplificada por um analista externo, para que esse tenha uma visão geral sobre a possível ordem dos impactos de um evento, como é o caso demonstrado nessa dissertação. Isso respondeu à premissa principal da pesquisa de que é viável propor um modelo conceitual sistemático e confiável, voltado para a avaliação e tomada de decisão do *Future-Proofing*.

O modelo foi pensado de forma a poder ser aplicado em projetos/empreendimentos de transportes para a avaliação de diversos tipos de eventos e soluções de *Future-Proofing*. Profissionais e grupos de pesquisas diversos podem aplicá-lo por inteiro ou dividi-lo entre suas etapas. Espera-se que o uso

subsequente do modelo leve a correções que poderão aumentar sua validade e aplicabilidade.

O que o modelo por si só não é capaz de resolver é o problema relacionado à multiplicidade de visões e interesses entre as partes envolvidas no projeto, construção e operação de grandes projetos. Dessa forma, pode não importar o quão precisa e detalhada foi a análise, mas sim que parte teve o maior poder de barganha em uma negociação permeada por interesses.

Concluindo-se, espera-se que a pesquisa apresentada aqui contribua para a longevidade dos sistemas de transportes, tornando-os mais resilientes e preparados para enfrentar os desafios futuros.

## 7.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que pesquisas futuras explorem a utilidade dos modelos de avaliação de *Future-Proofing*, incluindo o modelo proposto por essa dissertação, para apoio à tomada de decisão dependendo de: quem/que área utiliza, que momento do ciclo de vida, com que evento incerto e com qual finalidade. Para responder tais lacunas seria preciso estender a pesquisa além de uma revisão bibliográfica, com uma interação mais próxima dos profissionais e áreas que usarão os processos delineados nesta pesquisa.

Além disso, é recomendado buscar novas aplicações do modelo proposto em diferentes empreendimentos de transportes, novos ou existentes. Isso pode se dar por análises externas, como o executado nessa dissertação, ou dentro de um programa interno a uma organização envolvida com transportes. Nessa dissertação se reconhece a necessidade de aprimorar o cálculo do Custo da Resiliência para dar mais significado e precisão à essa métrica. Além disso, a avaliação entre soluções de caráter específico ou de monitoramento para o *Future-Proofing* ainda é uma área pouco explorada, especialmente no contexto da volatilidade e incerteza dos investimentos, como a Teoria de Opções Reais.

## REFERÊNCIAS

ABIAD, Abdul; ALMANSOUR, Aseel; FURCERI, Davide; GRANADOS, Carlos Mulas; TOPALOVA, Petia. **IS IT TIME FOR AN INFRASTRUCTURE PUSH ? THE MACROECONOMIC EFFECTS OF PUBLIC INVESTMENT**. [s.l: s.n.].

ABILI, Nimi; ONWUZULUIGBO, Raluchukwu; KARA, Fuat. Subsea controls future proofing: A systems strategy embracing obsolescence management. **Underwater Technology**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 187–201, 2013. DOI: 10.3723/ut.31.187.

ABREU, Victor Hugo Souza De; RIBEIRO, Filipe Batista; SANTOS, Andrea Souza. UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO. *Em: ANPET 2021, Anais [...]*. [s.l: s.n.]

ACHILLOPOULOU, Dimitra V.; MITOULIS, Stergios A.; ARGYROUDIS, Sotirios A.; WANG, Ying. Monitoring of transport infrastructure exposed to multiple hazards: a roadmap for building resilience. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 746, 2020. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.141001. Acesso em: 18 set. 2022.

ADEY, Bryan T.; MARTANI, Claudio; KIELHAUSER, Clemens; ROBLES, Ignacio Urquijo; PAPATHANASIOU, Natalia; BURKHALTER, Marcel; BELTRAN-HERNANDO, Iñaki; GARCIA-SANCHEZ, David. Estimating, and setting targets for, the resilience of transport infrastructure. **Infrastructure Asset Management**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 167–190, 2021. DOI: 10.1680/jinam.20.00011.

ADEY, Bryan Tyrone ;,; MARTANI, Claudio ;,; KIELHAUSER, Clemens ;,; ROBLES URQUIJO, Ignacio ;,; PAPATHANASIOU, Natalia ;,; BURKHALTER, Marcel. **Future proofing strategies FOr RESilient transport networks against Extreme Events-Deliverable 1.1-Guideline to measure Levels of Service and resilience in infrastructures**. [s.l: s.n.].

APARICIO, Ángel. Transport adaptation policies in Europe: From incremental actions to long-term visions. **Transportation Research Procedia**, [S. l.], v. 25, p. 3529–3537, 2017. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.277. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.277>.

ASCE. ASSESSMENT OF AMERICA ' S Letter from the President Table of Contents. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://infrastructurereportcard.org/>.

BIESEK, Guilherme. **Infrastructure Design for Evolvability : Theory and Methods A Thesis submitted to the University of Manchester for the degree of PhD in Business Administration in the Faculty of Humanities Guilherme Biesek Faculty of Humanities Contents**. 2012. [S. l.], 2012.

BOLSHAKOVA, Alexandra V.; BORONACHIN, Alexandr M.; LARIONOV, Daniil Yu; PODGORNAYA, Liudmila N.; SHALYMOV, Roman V. Embedded Multiphysical Track Diagnostic Systems for Intelligent Transport. **Proceedings of the 2019 IEEE International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies IT and QM and IS 2019**, [S. l.], p. 171–175, 2019. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928456. Acesso em: 18 set. 2022.

BOLSIN, Natasha. Designing national guidelines for automated vehicle trials in Australia. **International Journal of Transport Development and Integration**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 176–188, 2018. DOI: 10.2495/TDI-V2-N2-176-188. Acesso em: 18 set. 2022.

BORDLEY, Robert; LICALZI, Marco. Decision analysis using targets instead of utility functions. **Decisions in Economics and Finance** , [S. l.], v. 23, p. 53–74, 2000.

BOWE, Michael; LEE, Ding Lun. Project evaluation in the presence of multiple embedded real options: Evidence from the Taiwan High-Speed Rail Project. **Journal of Asian Economics**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 71–98, 2004. DOI: 10.1016/j.asieco.2003.12.001.

BRANDÃO, Luiz E.; BASTIAN-PINTO, Carlos; GOMES, Leonardo Lima; LABES, Marina. Government Supports in Public–Private Partnership Contracts: Metro Line 4 of the São Paulo Subway System. **Journal of Infrastructure Systems**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 218–225, 2012. DOI: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000095.

BRASIL. **O que é o Programa de Parcerias de Investimentos?** 2023.

CALLAWAY, Duncan S.; NEWMAN, M. E. J.; STROGATZ, Steven H.; WATTS, Duncan J. Network robustness and fragility: percolation on random graphs. **Physical**

**Review Letters**, [S. l.], v. 85, n. 25, p. 5468–5471, 2000. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.5468.

CARMICHAEL, David G. **Future-proofing—Valuing Adaptability, Flexibility, Convertibility and Options**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-0723-6>.

CAVDAROGLU, Burak; HAMMEL, Erik; MITCHELL, John E.; SHARKEY, Thomas C.; WALLACE, William A. Integrating restoration and scheduling decisions for disrupted interdependent infrastructure systems. **Annals of Operations Research**, [S. l.], v. 203, n. 1, p. 279–294, 2013. DOI: 10.1007/s10479-011-0959-3.

CHANG, Julius; GARVIN, Michael J. A New Model for Infrastructure Service Life With Applications to Bridge Assessment and Management. **Public Works Management & Policy**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 515–532, 2008. DOI: 10.1177/1087724X07310887.

CHOWDHURY, Sudipta; ZHU, Jin. The Usage of Association Rule Mining towards Future-Proofed Transportation Infrastructure Planning. **Computing in Civil Engineering 2021 - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2021**, [S. l.], p. 753–761, 2021. DOI: 10.1061/9780784483893.093. Acesso em: 18 set. 2022.

CNT. **Iniciativa privada é solução para ampliação da malha ferroviária?** 2018.

CNT. **PEC da Infraestrutura pode reverter queda de investimentos públicos em transporte**. 2022. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pec-da-infraestrutura-pode-reverter-quedas-de-investimentos>.

COLLIS, Lynne; SCHMID, Felix; TOBIAS, Andrew. Managing incidents in a complex system: A railway case study. **Cognition, Technology and Work**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 171–185, 2014. DOI: 10.1007/s10111-013-0255-x.

CORTEZ, Bianca Nespoli. **PRECIPITAÇÕES EXTREMAS EM CONDIÇÕES NÃO ESTACIONÁRIAS PARA CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL**. 2020. [S. l.], 2020.

CRUNDWELL, F. K. **Finance for Engineers**. [s.l: s.n.]. v. 1

ČULÍK, Miroslav. Real options valuation with changing volatility. **Perspectives in Science**, [S. l.], v. 7, p. 10–18, 2016. DOI: 10.1016/j.pisc.2015.11.004.

CUNHA, Claudio Barbieri Da. **Novo Marco Legal promete agilizar a expansão da malha ferroviária brasileira**. 2022.

CUNHA, Wallace Da. **ANÁLISE DO TRANSPORTE DE PRODUTOS PERIGOSOS NO BRASIL**. 2009. [S. l.], 2009.

DAMODARAN, Aswath. **Investment Valuation**. 3rd edition ed. [s.l: s.n.].

DAWSON, Darryl; HOCHMUTH, Jeff; GHALY, Ahmed; POWELL, Jim. Deploying a “smart corridor” today for tomorrow’s needs: Atm and connected vehicles (category 2 - Deployment). **21st World Congress on Intelligent Transport Systems, ITSWC 2014: Reinventing Transportation in Our Connected World**, [S. l.], 2014. . Acesso em: 18 set. 2022.

DAWSON, David; SHAW, Jon; ROLAND GEHRELS, W. Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England. **Journal of Transport Geography**, [S. l.], v. 51, n. February 2014, p. 97–109, 2016. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2015.11.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.11.009>.

DE NEUFVILLE, Richard; HODOTA, Kenichi; SUSSMAN, Joseph; SCHOLTES, Stefan. Real options to increase the value of intelligent transportation systems. **Transportation Research Record**, [S. l.], n. 2086, p. 40–47, 2008. DOI: 10.3141/2086-05.

DEMIREL, Hatice Çiğdem; LEENDERTSE, Wim; VOLKER, Leentje; HERTOOGH, Marcel. Flexibility in PPP contracts—Dealing with potential change in the pre-contract phase of a construction project. **Construction Management and Economics**, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 196–206, 2016. DOI: 10.1080/01446193.2016.1241414. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01446193.2016.1241414>.

EEA. **Climate-ADAPT strategy 2022-2024**. [s.l: s.n.].

EHRBAR, Heinz. PROJECT RISK MANAGEMENT – THE MOST IMPORTANT INSTRUMENT FOR SUCCESSFUL PROJECT CONTROL. *Em*: **Tunneling the**

**Gotthard (pp.636)**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/342083290\\_PROJECT\\_RISK\\_MANAGEMENT\\_-\\_THE\\_MOST\\_IMPORTANT\\_INSTRUMENT\\_FOR\\_SUCCESSFUL\\_PROJECT\\_CONTROL](https://www.researchgate.net/publication/342083290_PROJECT_RISK_MANAGEMENT_-_THE_MOST_IMPORTANT_INSTRUMENT_FOR_SUCCESSFUL_PROJECT_CONTROL).

EHRBAR, Heinz; KELLENBERGER, Jakob. Risk Management During Construction of the Gotthard Base Tunnel. **Gtmm**, [S. l.], n. October, 2003. Disponível em: <papers3://publication/uuid/B4F9CD0D-907A-4863-A267-4D0414BCD18F>.

ENGEL, Eduardo; FISCHER, Ronald; GALETOVIC, Alexander. Dealing with the Obsolescence of Transport Infrastructure in Public- Private Partnerships.

**International Transport Forum**, [S. l.], p. 1–35, 2015. Disponível em: [www.internationaltransportforum.org](http://www.internationaltransportforum.org).

ESMALIAN, Amir *et al.* Operationalizing resilience practices in transportation infrastructure planning and project development. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 104, 2022. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103214.

EU. Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027. **Official Journal of the European Union**, [S. l.], n. June, p. 1–92, 2021.

FABBRI, Davide. The Gotthard Base Tunnel: Project overview. **The 6th annual Tunnelling Conference**, [S. l.], n. August, p. 2–14, 2004. Disponível em: <https://www.lombardi.ch/de-de/SiteAssets/Publications/1214/Pubb-0394-L-The-Gotthard-Base-Tunnel-Project-overview.pdf>.

FANKHAUSER, Samuel; SMITH, Joel B.; TOL, Richard S. J. Weathering climate change: Some simple rules to guide adaptation decisions. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 67–78, 1999. DOI: 10.1016/S0921-8009(98)00117-7.

FLYVBJERG, Bent. What you should know about megaprojects and why: An overview. **Project Management Journal**, [S. l.], v. 45, n. 2, p. 6–19, 2014. DOI: 10.1002/pmj.21409.

FREE BOUNDARIES. **Black Scholes Calculator**. 2009.

G1-PR. **Ferroeste libera linhas interditadas por causa de quedas de barreiras.** 2014.

GARSTENAUER, Johann; POČUČA, Sergej. The future of railway communications. **MIPRO 2011 - 34th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics - Proceedings**, [S. l.], p. 421–423, 2011. . Acesso em: 18 set. 2022.

GATIEN, Seth; GALES, John; KHAN, Ata; YERUSHALAMI, Ariel. The Importance of Human Factors When Designing Airport Terminals Integrating Automated Modes of Transit. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, [S. l.], v. 1212 AISC, p. 597–602, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-50943-9\_76. Acesso em: 18 set. 2022.

GBADAMOSI, Abdul Quayyum; OYEDELE, Lukumon O.; DELGADO, Juan Manuel Davila; KUSIMO, Habeeb; AKANBI, Lukman; OLAWALE, Oladimeji; MUHAMMED-YAKUBU, Naimah. IoT for predictive assets monitoring and maintenance: An implementation strategy for the UK rail industry. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 122, 2021. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2020.103486. Acesso em: 18 set. 2022.

GEORGIADOU, Maria Christina; HACKING, Theophilus; GUTHRIE, Peter. A conceptual framework for future-proofing the energy performance of buildings. **Energy Policy**, [S. l.], v. 47, p. 145–155, 2012. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.039. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.039>.

GHAZY, Shams; TANG, Yu Hoe; MUGUMYA, Kevin Luwemba; WONG, Jing Ying; CHAN, Andy. Future-proofing Klang Valley's veins with REBET: A framework for directing transportation technologies towards infrastructure resilience. **Technological Forecasting and Social Change**, [S. l.], v. 180, 2022. DOI: 10.1016/J.TECHFORE.2022.121666. Acesso em: 18 set. 2022.

GKOUMAS, K.; MARQUES DOS SANTOS, F. L.; VAN BALEN, M.; TSAKALIDIS, A.; ORTEGA HORTELANO, A.; GROSSO, M.; HAQ, G.; PEKÁR, F. **Research and innovation in bridge maintenance, inspection and monitoring - A European perspective based on the Transport Research and Innovation Monitoring and Information System (TRIMIS)**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.2760/719505.

GODFREY, Nick; SAVAGE, Roger. **Future Proofing Cities**. [s.l.: s.n.].

GRANT, Cynthia; OSANLOO, Azadeh. Understanding, Selecting, and Integrating a Theoretical Framework in Dissertation Research: Creating the Blueprint for Your “House”. **Administrative Issues Journal Education Practice and Research**, [S. l.], v. 4, n. 2, 2014. DOI: 10.5929/2014.4.2.9. Disponível em:

<https://aj.scholasticahq.com/article/7-understanding-selecting-and-integrating-a-theoretical-framework-in-dissertation-research-creating-the-blueprint-for-your-house>.

GRANT, Michael. Financing Eurotunnel. **Japan Railway & Transport Review**, [S. l.], v. 11, n. April, p. 46–47, 1997. Disponível em:

[http://www.jrtr.net/jrtr11/pdf/f46\\_gra.pdf](http://www.jrtr.net/jrtr11/pdf/f46_gra.pdf).

GREDEN, Lara; GLICKSMAN, Leon. A real options model for valuing flexible space.

**Journal of Corporate Real Estate**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 34–48, 2005. DOI: 10.1108/14630010510812486.

GREEN, Helen Elise. Use of theoretical and conceptual frameworks in qualitative research. **Nurse Researcher**, [S. l.], v. 21, n. 6, p. 34–38, 2014. DOI:

10.7748/nr.21.6.34.e1252.

GSCHÖSSER, F.; CORDES, T.; LUMETZBERGER, D.; TAUTSCHNIG, A.; BERGMEISTER, K. Railway transport systems’ contribution to sustainable development. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S. l.], v. 588, n. 5, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/588/5/052024. Acesso em: 18 set. 2022.

GUASCH, J. Luis. **Granting and Renegotiating Infrastructure Concessions: Doing it Right**. [s.l.: s.n.].

GUIDOTTI, Roberto; GARDONI, Paolo; ROSENHEIM, Nathanael. Integration of physical infrastructure and social systems in communities’ reliability and resilience analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, [S. l.], v. 185, n. January, p. 476–492, 2019. DOI: 10.1016/j.ress.2019.01.008. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.01.008>.

HAGMANN, Jonas. Fukushima: Probing the analytical and epistemological limits of risk analysis. **Journal of Risk Research**, [S. l.], v. 15, n. 7, p. 801–815, 2012. DOI: 10.1080/13669877.2012.657223.

HALLEGATTE, Stephane; ROZENBERG, Julie; RENTSCHLER, Jun; NICOLAS, Claire; FOX, Charles. Strengthening New Infrastructure Assets: A Cost-Benefit Analysis. **Strengthening New Infrastructure Assets: A Cost-Benefit Analysis**, [S. l.], n. June, 2019. DOI: 10.1596/1813-9450-8896.

HAUSFATHER, Zeke. **Explainer: The high-emissions ‘RCP8.5’ global warming scenario**. 2019.

HEIKKILÄ, Marikka; SAARNI, Jouni; SAURAMA, Antti. Four Scenarios for Future Smart Ports. **SSRN Electronic Journal**, [S. l.], p. 1–26, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4010340.

HOEFT, Madeleine; PIEPER, Marianne; ERIKSSON, Kent; BARGSTÄDT, Hans Joachim. Toward life cycle sustainability in infrastructure: The role of automation and robotics in ppp projects. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 7, 2021. DOI: 10.3390/su13073779.

IVANOV, Oskar Larsson; BJÖRNSSON, Ivar; HONFI, Dániel; LEANDER, John. The practical value of structural health information for time dependence in bridge maintenance. **Structure and Infrastructure Engineering**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 476–491, 2021. DOI: 10.1080/15732479.2021.1890141. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1890141>.

KELLEY, Rick. **Retiring worn-out wind turbines could cost billions that nobody has**. 2017.

KENNY, Shawn. Offshore Pipelines—Elements of Managing Risk. *Em: Offshore Process Safety*. 1. ed. [s.l.] : Elsevier Inc., 2018. v. 2p. 289–325. DOI: 10.1016/bs.mcps.2018.04.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/bs.mcps.2018.04.005>.

KOKS, E. E.; ROZENBERG, J.; ZORN, C.; TARIVERDI, M.; VOUSDOKAS, M.; FRASER, S. A.; HALL, J. W.; HALLEGATTE, S. A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. **Nature Communications**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-10442-3.

KOTHARI, C. R. Research Methodology: Methods and Techniques. [S. l.], v. 2, 2004.

KRYSTALLIS, Ilias; LOCATELLI, Giorgio; MURTAGH, Niamh. Talking about futureproofing: Real options reasoning in complex infrastructure projects. **IEEE Transactions on Engineering Management**, [S. l.], p. 1–14, 2022. DOI: 10.1109/TEM.2020.3026454.

LANGSTON, Craig. Measuring Good Architecture: Long life, loose fit, low energy. **European Journal of Sustainable Development**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 163–174, 2014. DOI: 10.14207/ejsd.2014.v3n4p163.

LECHNER, Johannes; FEIX, Jürgen. ENHANCED SERVICE LIFE OF EXISTING INFRASTRUCTURE POST-INSTALLED SHEAR REINFORCEMENT 2 . Concrete Screw Anchors. [S. l.], p. 322–328, 2022.

LEMER, Andrew C. Infrastructure Obsolescence and Design Service Life. **Journal of Infrastructure Systems**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 153–161, 1996. DOI: 10.1061/(asce)1076-0342(1996)2:4(153).

LI, Da; LIN, Xiaoyan; WU, Xiaofeng. Analysis of the Channel Tunnel Project. [S. l.], v. 376, n. Sschd, p. 464–471, 2019. DOI: 10.2991/sschd-19.2019.81.

LI, Xinjian; LOVE, Peter E. D. State-of-the-Art Review of Urban Rail Transit Public–Private Partnerships. **Journal of Infrastructure Systems**, [S. l.], v. 26, n. 3, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000552. Acesso em: 18 set. 2022.

LI, Xinjian; LOVE, Peter E. D. Procuring urban rail transit infrastructure by integrating land value capture and public-private partnerships: Learning from the cities of Delhi and Hong Kong. **Cities**, [S. l.], v. 122, 2022. DOI: 10.1016/J.CITIES.2021.103545. Acesso em: 18 set. 2022.

LOVE, Peter E. D.; AHIAGA-DAGBUI, Dominic; WELDE, Morten; ODECK, James. Light rail transit cost performance: Opportunities for future-proofing. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S. l.], v. 100, p. 27–39, 2017. DOI: 10.1016/J.TRA.2017.04.002. Acesso em: 18 set. 2022.

LOVE, Peter E. D.; IKA, Lavagnon A.; MATTHEWS, Jane; LI, Xinjian; FANG, Weili. A procurement policy-making pathway to future-proof large-scale transport infrastructure assets. **Research in Transportation Economics**, [S. l.], v. 90, 2021. a. DOI: 10.1016/J.RETREC.2021.101069. Acesso em: 18 set. 2022.

LOVE, Peter E. D.; IKA, Lavagnon; MATTHEWS, Jane; FANG, Weili. Shared leadership, value and risks in large scale transport projects: Re-calibrating procurement policy for post COVID-19. **Research in Transportation Economics**, [S. l.], v. 90, 2021. b. DOI: 10.1016/J.RETREC.2020.100999. Acesso em: 18 set. 2022.

LOVE, Peter E. D.; SING, Michael C. P.; IKA, Lavagnon A.; NEWTON, Sidney. The cost performance of transportation projects: The fallacy of the Planning Fallacy account. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S. l.], v. 122, p. 1–20, 2019. DOI: 10.1016/J.TRA.2019.02.004. Acesso em: 18 set. 2022.

LOVE, Peter E. D.; ZHOU, Jingyang; MATTHEWS, Jane; LAVENDER, Matthew; MORSE, Troy. Managing rail infrastructure for a digital future: Future-proofing of asset information. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S. l.], v. 110, p. 161–176, 2018. DOI: 10.1016/J.TRA.2018.02.014. Acesso em: 18 set. 2022.

LYONS, Glenn; DAVIDSON, Cody. Guidance for transport planning and policymaking in the face of an uncertain future. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S. l.], v. 88, p. 104–116, 2016. DOI: 10.1016/j.tra.2016.03.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2016.03.012>.

MACHIELS, Thomas; COMPERNOLLE, Tine; COPPENS, Tom. Real option applications in megaproject planning: trends, relevance and research gaps. A literature review. **European Planning Studies**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 446–467, 2021. DOI: 10.1080/09654313.2020.1742665. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1742665>.

MANDELBAUM, Marvin; BUZACOTT, John. Flexibility and decision making. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 44, n. 1, p. 17–27, 1990. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90310-8.

MARTANI, Claudio; ADEY, Bryan T.; ROBLES, Ignacio; GENNARO, Federico Di; PARDI, Livia; BELTRAN-HERNANDO, Iñaki; TORIBIO-DIAZ, Concepcion; REDONDO, Noemi Jimenez; DÍAZ, Adrián Antonio Moli. Estimating the resilience of, and targets for, a transport system using expert opinion. **Infrastructure Asset Management**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 191–208, 2021. DOI: 10.1680/JINAM.20.00029. Acesso em: 18 set. 2022.

MARTIN, Leigh. FUTURE-PROOFING THE URBAN LANDSCAPE Green Infrastructure as a Primer for Resilient Urban Development. *[S. l.]*, 2015.

MASOOD, Tariq; MCFARLANE, Duncan; PARLIKAD, Ajith Kumar; DORA, John; ELLIS, Andrew; SCHOOLING, Jennifer. Towards the future-proofing of UK infrastructure. **Infrastructure Asset Management**, *[S. l.]*, v. 3, n. 1, p. 28–41, 2016. DOI: 10.1680/jinam.15.00006.

MAURI, Lee. Framework to assess a facility's ability to accommodate change : application to renovated buildings. *[S. l.]*, 1997.

MIKLAUTSCH, Philipp; WOSCHANK, Manuel. Decarbonizing Industrial Logistics. **IEEE Engineering Management Review**, *[S. l.]*, 2022. DOI: 10.1109/EMR.2022.3186738. Acesso em: 18 set. 2022.

MILLER, Roger; LESSARD, Donald. Understanding and managing risks in large engineering projects. **International Journal of Project Management**, *[S. l.]*, v. 19, n. 8, p. 437–443, 2001. DOI: 10.1016/S0263-7863(01)00045-X.

MPF. **Nova Ferroeste: MPF recomenda outro estudo de impacto ambiental em territórios indígenas no PR e em MS**. 2023.

MULHOLLAND, Kieran M.; PITT, Michael; MCLENNAN, Peter. Development and Testing of a Boolean Obsolescence Assessment Tool for Built Environment Asset System. **Journal of Biogeography**, *[S. l.]*, 2016.

MULHOLLAND, Kieran; MCLENNAN, Peter; PITT, Michael. IDENTIFYING AND MANAGING ASSET OBSOLESCENCE WITHIN THE BUILT ENVIRONMENT. **Rics Cobra Aubea 2015**, *[S. l.]*, n. July, p. 12, 2015.

NIPA, Thahomina Jahan; KERMANSHACHI, Sharareh; KARTHICK, Sanjgna. **Analysis of Investment Decision-Making Factors in Resilience Improvement of Transportation Infrastructure**. [s.l: s.n.].

NKURUNZIZA, David; TAFAHOMI, Rahman; FARAJA, Irumva Augustin. Identification of challenges and opportunities of the transport master plan implementation in the city of Kigali-rwanda. **WIT Transactions on the Built**

**Environment**, [S. l.], v. 204, p. 221–232, 2021. DOI: 10.2495/UT210181. Acesso em: 18 set. 2022.

OLSSON, Nils O. E. Management of flexibility in projects. **International Journal of Project Management**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 66–74, 2006. DOI: 10.1016/j.ijproman.2005.06.010.

PAGE, Jonathan. Flexibility in early stage design of U.S. Navy ships: An analysis of options. **Journal of Ship Production**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 128–133, 2012. DOI: 10.5957/JSPD.28.3.120012.

PALIN, Erika J.; STIPANOVIC OSLAKOVIC, Irina; GAVIN, Kenneth; QUINN, Andrew. Implications of climate change for railway infrastructure. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, [S. l.], v. 12, n. 5, 2021. DOI: 10.1002/wcc.728.

PARANÁ. **Nova Ferroeste**. <https://www.novaferroeste.pr.gov.br/FAQ>, 2023.

PENNINGS, Rogier; WIEGMANS, Bart; SPIT, Tejo. Can we have our cake and still eat it? A review of flexibility in the structural spatial development and passenger transport relation in developing countries. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 12, n. 15, 2020. DOI: 10.3390/SU12156091. Acesso em: 18 set. 2022.

PONSFORD, Alan; KUNUR, Merih. Mobilicity PPT automated transport system. **22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exposition, EVS 2006**, [S. l.], p. 164–171, 2006. . Acesso em: 18 set. 2022.

RANGER, Nicola; REEDER, Tim; LOWE, Jason. Addressing ‘deep’ uncertainty over long-term climate in major infrastructure projects: four innovations of the Thames Estuary 2100 Project. **EURO Journal on Decision Processes**, [S. l.], v. 1, n. 3–4, p. 233–262, 2013. DOI: 10.1007/s40070-013-0014-5.

REALE, Alejandro Sáez. **ASSESSING THE BURDENS OF URBAN HEAT: A DESCRIPTION OF FUNCTIONAL, ECONOMIC AND PUBLIC HEALTH IMPACTS OF INCREASING HEAT IN CITIES**. [s.l: s.n.].

REN, Rui; ZHOU, Hui; HU, Zhao; HE, Siyue; WANG, Xiuling. **Statistical analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels 2000–2016. Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019. DOI: 10.1016/j.tust.2018.10.008.

ROSA, Arildo Pereira Da; MARTINS, Maria de Lourdes Orsini Fernandes; NERY, Jonas Teixeira. VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL DO TERCEIRO PLANALTO NO ESTADO DO PARANÁ. *Em*: 2005, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.]

RUMO. **Apresentação de Resultados 1T23**. 2023.

SAIDEL, Marco A.; PRADO JR, Fernando A. A.; GRUMBACH, Raul J. S.; HEIDEIER, Raphael B.; LUIZ, C. C.; ROSA, José A. O. Ferramenta de Análise de Risco Regulatório em Concessionárias de Geração de Energia Elétrica. **Congresso de inovação tecnológica em energia elétrica (CITENEL)**, [S. l.], 2011.

SANDBORN, Peter. Forecasting technology and part obsolescence. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [S. l.], v. 231, n. 13, p. 2251–2260, 2017. DOI: 10.1177/0954405415598923.

SCHOEMAKER, Paul J. H.; RUSSO, J. Edward. decision-making. *Em*: **The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management**. [s.l.] : Palgrave Macmillan, 2014. DOI: 10.1057/9781137294678.0160. Disponível em: <http://www.palgraveconnect.com/doi/10.1057/9781137294678.0160>.

SCHOLZ, Luiz Fernando de Barros; SANTOS, Fernando de Almeida. ESTUDO DE CASO: ANÁLISE FINANCEIRA DA RENTABILIDADE NO TRANSPORTE AÉREO BASEADO EM INFORMAÇÕES PÚBLICAS E SUA RELAÇÃO COM O CUSTO DO PETROLÉO NO RESULTADO OPERACIONAL DAS CIAS. AÉREAS. **CAFI**, [S. l.], v. 1, n. 69, p. 5–24, 2018.

SCHURIG, Stefan; TURAN, Karina. The concept of a ‘regenerative city’: How to turn cities into regenerative systems. **Journal of Urban Regeneration and Renewal**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 161–175, 2022. . Acesso em: 18 set. 2022.

SHACHTER, Ross D. **Probabilistic Inference and Influence Diagrams Operations Research**. Stanford.

SHAH, Janvi; JEFFERSON, Ian; GHATAORA, Gurmel; HUNT, Dexter. Resilient Geotechnical Infrastructure Asset Management. *[S. l.]*, p. 3769–3778, 2014. DOI: 10.1061/9780784413272.365. Acesso em: 18 set. 2022.

SHAIKH, Palwasha W.; MOUFTAH, Hussein T. Intelligent Charging Infrastructure Design for Connected and Autonomous Electric Vehicles in Smart Cities.

**Proceedings of the IM 2021 - 2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management**, *[S. l.]*, p. 992–997, 2021. . Acesso em: 18 set. 2022.

SICILIANO, Vito; ROCHÉ, Élodie; BUCHHORN, Matthias; CATALDO, Franco. PROTECTRAIL – The Railway-Industry Partnership for Integrated Security of Rail Transport. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, *[S. l.]*, v. 48, p. 1642–1648, 2012. DOI: 10.1016/J.SBSPRO.2012.06.1139. Acesso em: 18 set. 2022.

SILVA, Benedito C. **Chuva de projeto | Canal da Hidrologia**. 2021.

SILVA, Edna Lúcia Da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<http://www.ufsc.br><http://www.ctc.ufsc.br><http://www.eps.ufsc.br><http://www.led.ufsc.br><http://www.feesc.org.br>

SOUZA, Breno Augusto Bormann De; STRUCHINER, Cláudio José. Uma proposta teórico-metodológica para elaboração de modelos teóricos. **Cadernos Saúde Coletiva**, *[S. l.]*, v. 29, n. 1, p. 86–97, 2021. DOI: 10.1590/1414-462x202129010180.

SOUZA, Marcela Tavares De; DIAS, Michelly Da Silva; CARVALHO, Rachel De. **Revisão integrativa: o que é e como fazer Integrative review: what is it? How to do it?** [s.l: s.n.].

SPANG, Konrad; EHRBAR, Heinz; ELBAZ, Ahmed. Looking for project success in infrastructure projects: How can we achieve it? **ISEC 2019 - 10th International Structural Engineering and Construction Conference**, *[S. l.]*, v. 6, n. 1, p. 0–6, 2019. DOI: 10.14455/isec.res.2019.105.

SREEVES, John. Future-proof: Upton upon Severn viaduct, UK. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering**, *[S. l.]*, v. 160, n. 1, p. 33–38, 2007. DOI: 10.1680/CIEN.2007.160.1.33. Acesso em: 18 set. 2022.

TAN, Jiao Hao; MASOOD, Tariq. Adoption of Industry 4.0 Technologies in Airports - A Systematic Literature Review. *[S. l.]*, n. 2021, p. 1–25, 2021.

THOMPSON, Paul D.; FORD, Kevin M.; ARMAN, Mohammad H. R.; LABI, Samuel; SINHA, Kumares C.; SHIROLE, Arun M. **Estimating Life Expectancies of Highway Assets, Volume 1: Guidebook**. [s.l: s.n.]. v. 1 DOI: 10.17226/22782.

TJDFT. **Dano emergente x Lucros cessantes**. 2018.

TPF-SENER. **RELATÓRIO FINAL EVTEA-J VOLUME 4-AVALIAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA E DE RISCOS FASE 4: CONSOLIDAÇÃO DO EVTEA-J**. [s.l: s.n.].

TSAKALIDIS, Anastasios; GKOUMAS, Konstantinos; PEKÁR, Ferenc. Digital transformation supporting transport decarbonisation: Technological developments in EU-funded research and innovation. **Sustainability (Switzerland)**, *[S. l.]*, v. 12, n. 9, 2020. DOI: 10.3390/su12093762.

UE. **Future proofing strategies FOr RESilient transport networks against Extreme Events**. 2022.

UE. **Climate-ADAPT Case study explorer**. 2023.

UNESP. **TIPOS DE REVISÃO DE LITERATURA**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.ip.usp.br/portal/images/biblioteca/revisao.pdf>.

VALUUP. **Artigo Gazeta do Povo: A Ferroeste fora dos trilhos**. 2019.

VANGELI, Teresa; MICHELI, L.; KETABDAR, M.; MCSWEENEY, B. Design of Interconnected Infrastructure Systems for Resilient and Sustainable Communities. **ASCE**, *[S. l.]*, n. Leveraging Sustainable Infrastructure for Resilient Communities, p. 13–21, 2021.

VERWEIJ, Stefan; LOOMANS, Oscar; LEENDERTSE, Wim. The Role of the Public Partner in Innovation in Transport Infrastructure PPPs: A Qualitative Comparative Analysis of Nine Dutch DBFM Projects. **Public Works Management and Policy**, *[S. l.]*, v. 25, n. 1, p. 5–32, 2020. DOI: 10.1177/1087724X19847215.

- XIONG, Wei; ZHANG, Xueqing. The Real Option Value of Renegotiation in Public–Private Partnerships. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. l.], v. 142, n. 8, p. 04016021, 2016. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001130.
- XIONG, Wei; ZHAO, Xianbo; YUAN, Jing Feng; LUO, Sai. Ex Post Risk Management in Public-Private Partnership Infrastructure Projects. **Project Management Journal**, [S. l.], v. 48, n. 3, p. 76–89, 2017. DOI: 10.1177/875697281704800305.
- ZACHARIADIS, Ioannis. Investment in infrastructure in the EU - Gaps, challenges, and opportunities. **European Parliamentary Research Service**, [S. l.], n. October, 2018. Disponível em: [http://www.iberglobal.com/files/2018-2/infrastructure\\_eu.pdf](http://www.iberglobal.com/files/2018-2/infrastructure_eu.pdf).
- ZAHARIA, Sorin Eugen; PIETREANU, Casandra Venera. Challenges in airport digital transformation. **Transportation Research Procedia**, [S. l.], v. 35, p. 90–99, 2018. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.016>.
- ZHAO, Jing; LIU, Kai; WANG, Ming. Exposure analysis of Chinese railways to multihazards based on datasets from 2000 to 2016. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 272–287, 2020. DOI: 10.1080/19475705.2020.1714753.

## APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA E MÉTODO DE AVALIAÇÃO POR ROT

Para avaliação de opções reais (ROT) em infraestruturas os modelos tradicionais para precificação de opções financeiras são empregados. Esses modelos podem ser classificados da seguinte forma:

- a) analíticos (modelo Black-Scholes);
- b) discretos (binomial, trinomial, multinomial);
- c) de simulação (Monte Carlo).

Em opções reais as decisões podem ser tomadas a qualquer momento até que a oportunidade de investimento desapareça, correspondentes às opções americanas para o mercado de capitais. Por isso os modelos discretos são frequentemente aplicados, pois permitem a visualização das opções em estrutura de árvore com tempos discretos (ČULÍK, 2016). Já para o uso de modelos analíticos, que foram originalmente derivados para opções europeias (sem possibilidade de execução adiantada), é recomendado que se associe um custo de atraso no cálculo, que corresponderia no mercado de capitais a um dividendo que não é usufruído até que a opção seja executada (DAMODARAN, 2012).

O modelo Black-Scholes com dividendos ou Black-Scholes-Merton é uma extensão do modelo original de Black-Scholes que leva em conta os dividendos pagos pelo ativo subjacente. A  $C = S e^{(-qT)N(d1)} - K e^{-rT} * N(d2)$  (1), usada para calcular o valor teórico de uma opção de compra (*call option*) em um ativo com pagamento de dividendos é:

$$C = S e^{(-qT)N(d1)} - K e^{-rT} * N(d2) \quad (1)$$

onde:

- C é o preço teórico da opção de compra (*call price*);
- S é o preço atual do ativo;
- K é o preço de exercício da opção;
- T é o tempo até o vencimento em anos;
- r é a taxa de juros livre de risco;
- q é o rendimento anualizado dos dividendos;
- d1 e d2 são variáveis calculadas usando as Equações (2) e (3).

$$d1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r - q + \frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma\sqrt{T}} \quad (4)$$

$$d2 = d1 - \sigma\sqrt{T} \quad (5)$$

onde:

- $\sigma$  é o desvio padrão do retorno do ativo, também conhecido como volatilidade

Para que uma opção real possa ser tratada por ROT utilizando-se um modelo analítico, é preciso que essa opção satisfaça três condições (DAMODARAN, 2012):

- a) A opção fornece ao detentor o direito de comprar ou vender uma quantidade específica de um ativo subjacente a um preço fixo (chamado preço de exercício) na data de vencimento da opção ou antes dela;
- b) Deve haver um ativo subjacente claramente definido cujo valor muda ao longo do tempo de maneiras imprevisíveis;
- c) Os pagamentos sobre esse ativo (opção real) devem ser contingentes à ocorrência de um evento especificado dentro de um período finito.

É raro que os ativos avaliados via opções reais apresentem todas essas condições (DAMODARAN, 2012). Para o caso de estudo, da Nova Ferroeste, essa correspondência é satisfatória, porém não é perfeita. Para a condição “a)”, existe um ativo subjacente e esse poderá ser comercializado livremente via bolsa de valores com um preço fixo (o de mercado), no entanto, o Custo da Resiliência refere-se somente a uma parte do valor do ativo e não sua totalidade. A condição “b)” é satisfeita, pois o valor do Custo da Resiliência no caso de análise é dependente de um fenômeno externo incerto e estocástico. A condição “c)” também é satisfeita, pois o custo da resiliência só será incorrido caso ocorra o evento.

Partindo-se dessas premissas e equações, foram utilizados os dados de entrada apresentados na seção 6.6 dessa dissertação para o cálculo do valor da opção de investimentos em monitoramento. O processo foi feito utilizando o Microsoft Excel e os resultados demonstrados na seção 6.6 foram validados utilizando calculadoras disponíveis na *web* (FREE BOUNDARIES, 2009).

## APÊNDICE B – PREMISSAS E MEMÓRIA DE CÁLCULO DE PRECIPITAÇÕES VARIÁVEIS

Como base para a discussão dos efeitos das mudanças climáticas, é padrão utilizar os RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que são cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE) que são usados para modelar as consequências climáticas futuras e seus impactos no planeta.

O RCP 4.5 representa um cenário em que as emissões de GEE atingem o pico em meados do século XXI e, em seguida, começam a diminuir gradualmente, alcançando uma redução significativa no final do século. Esse cenário é considerado um futuro mais sustentável, em que as mudanças climáticas podem ser gerenciáveis e os efeitos podem ser mitigados.

Já o RCP 8.5 é um cenário de "negócios como de costume", onde as emissões de GEE continuam a aumentar ao longo do século XXI, resultando em um aumento significativo da temperatura global e outros efeitos climáticos extremos. Este cenário é considerado o pior caso possível, com um aumento de temperatura média global de até 4°C até o final do século, o que pode levar a desastres ambientais e sociais generalizados. Há também outros cenários RCP que não foram abordados nessa dissertação.

Para obter os valores de chuvas de projeto para a análise, optou-se por simplificarmente realizar uma média entre ambos os RCPs, ressaltando que em uma análise detalhada, a avaliação de ambos os cenários separadamente seria recomendada.

No estudo de referência para precipitações (CORTEZ, 2020) o valor máximo estimado da série temporal foi adotado como valor exclusivo para a lâmina futura de projeto em cada região delimitada. Essa decisão foi tomada levando em consideração a segurança, uma vez que é esperado que esse evento de grande magnitude ocorra pelo menos uma vez durante o período de análise. No entanto, os resultados podem estar superestimados devido a tal decisão. A análise do incremento nas chuvas de projeto se deu por um acréscimo ou decréscimo para cada cenário em relação aos dados atuais, com as informações dispostas em mapas.

Tais valores foram comparados com os dados atuais de precipitação da região de estudo na Nova Ferroeste, entre Cascavel e Guarapuava. Esses dados foram

obtidos dos estudos de viabilidade (TPF-SENER, 2022), onde estão disponibilizadas curvas de precipitação IDF para consulta. As fórmulas disponíveis na documentação dos estudos foram utilizadas para obter as chuvas de projeto para os tempos de retorno (Tr) de 50 e 100 anos.

Foi feita uma média entre os dados obtidos das curvas IDF de precipitação para as cidades na região de estudo. O tempo de duração da chuva adotado foi de uma hora, no entanto, em uma análise mais precisa isso deve ser determinado segundo o tempo de concentração da bacia (SILVA, 2021).

O Quadro 9 apresenta a intensidade das chuvas de projeto com dados atuais para os dois tempos de retorno, incluindo a média da região.

Quadro 9 - Intensidade de chuvas atuais (mm) por tempo de retorno (Tr)

<b>Tr (anos)</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
	72,32	79,74
	72,40	79,83
	73,95	81,54
	77,06	85,03
	84,63	93,64
	64,37	71,32
	64,36	71,32
	69,57	76,13
	64,40	71,36
	70,49	77,35
	64,45	71,41
	68,11	76,68
<b>Média</b>	<b>68,93</b>	<b>79,64</b>

Fonte: autor

Já o Quadro 10 demonstra o acréscimo esperado de precipitação de projeto segundo os modelos climáticos, em relação aos valores atuais do Quadro 9.

Quadro 10 - Memória de cálculo de acréscimos de precipitação considerados

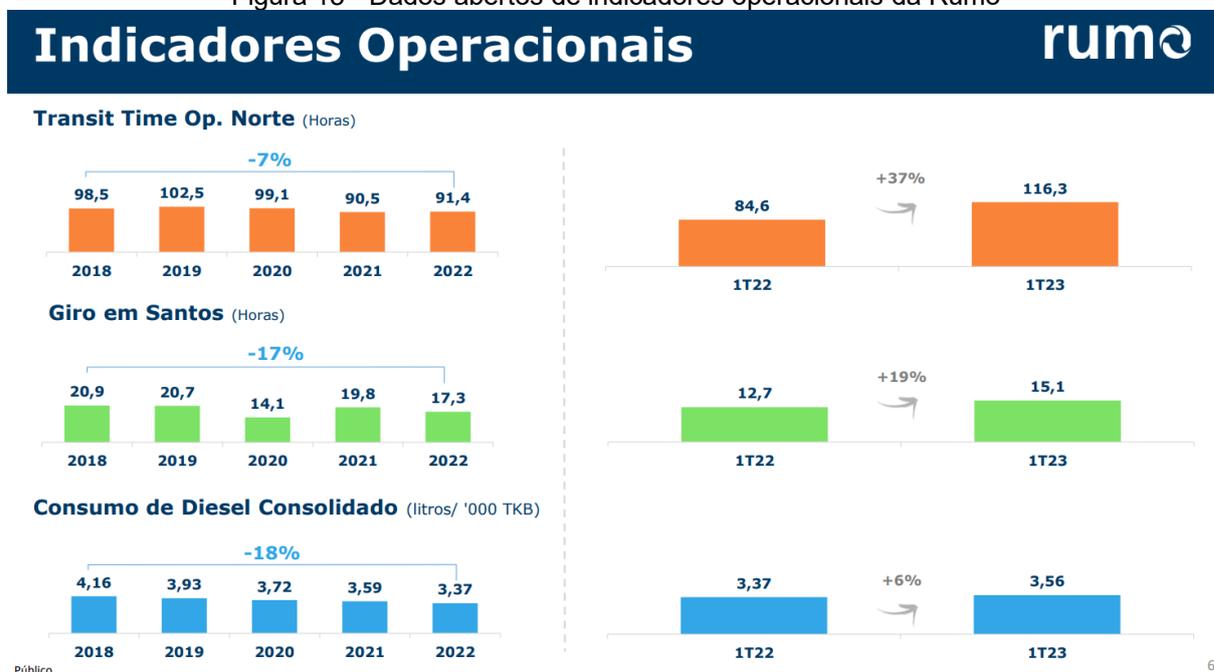
<b>Até 2060</b>					
<b>Cenário</b>	<b>Acréscimo de precipitação (mm)</b>	<b>Precipitação Total (mm)</b>		<b>Acréscimo Percentual</b>	
<b>RCP 4.5, Tr 50</b>	20	88,93	0,00	29%	0%
<b>RCP 8.5, Tr 50</b>	20	88,93	0,00	29%	0%
<b>RCP 4.5, Tr 100</b>	40	0,00	119,64	0%	50%
<b>RCP 8.5, Tr 100</b>	40	0,00	119,64	0%	50%
<b>2060-2099</b>					
<b>RCP 4.5, Tr 50</b>	80	148,9	0,0	116%	0%
<b>RCP 8.5, Tr 50</b>	100	168,9	0,0	145%	0%
<b>RCP 4.5, Tr 100</b>	120	0,0	199,6	0%	151%
<b>RCP 8.5, Tr 100</b>	140	0,0	219,6	0%	176%

Fonte: autor

## ANEXO A – EXEMPLO DE DADOS OPERACIONAIS ABERTOS

Os dados abaixo (Figura 15, Figura 16 e Figura 17) foram retiradas do site de relações com investidores da Rumo, uma das principais empresas operadora logística no Brasil. Em específico, os dados referem-se aos resultados operacionais do primeiro trimestre de 2023 (RUMO, 2023). Esses incluem as informações para a linha Norte, que é uma das principais linhas ferroviárias do Brasil. Ela se estende por cerca de 4.900 km, passando pelos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Figura 15 - Dados abertos de indicadores operacionais da Rumo



Fonte: Rumo (2023)

Figura 16 - Dados abertos de resultado operacional da Rumo

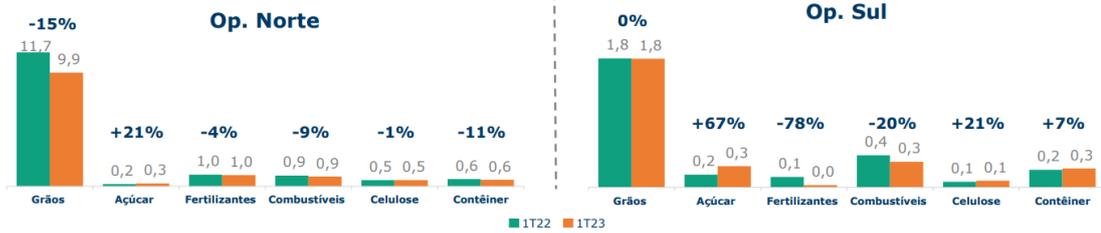
# Resultado Operacional rumo



## Volumes (TKU Bi)



## Performance por segmento (TKU bi)



Público

7

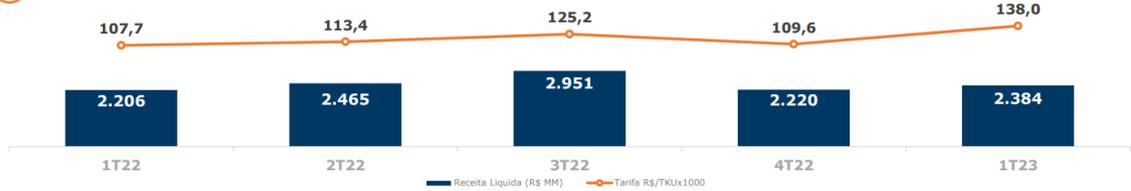
Fonte: Rumo (2023)

Figura 17 - Dados abertos de receitas e tarifas da Rumo

# Receita e Tarifas rumo



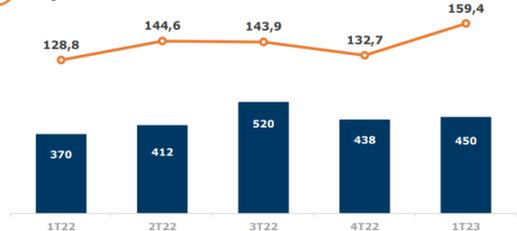
## Consolidado



## Op. Norte



## Op. Sul



Público

8

Fonte: Rumo (2023)