



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAMON SWELL GOMES RODRIGUES CASADO

**MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO EM PORTFÓLIO PARA APOIO A  
GESTÃO DE RISCOS EM GASODUTOS DE GÁS NATURAL**

Recife

2023

RAMON SWELL GOMES RODRIGUES CASADO

**MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO EM PORTFÓLIO PARA APOIO A  
GESTÃO DE RISCOS EM GASODUTOS DE GÁS NATURAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa operacional.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar

Recife

2023

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

C335m	<p>Casado, Ramon Swell Gomes Rodrigues. Modelo multicritério baseado em portfólio para apoio a gestão de riscos em gasodutos de gás natural / Ramon Swell Gomes Rodrigues Casado. – 2023. 125 f.: il., fig., tab. e siglas.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida. Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2023. Inclui Referências e Apêndices.</p> <p>1. Engenharia de Produção. 2. Gasoduto de gás natural. 3. Avaliação de risco multidimensional. 4. Seleção de portfólio. 5. Enumeração implícita. 6. Análise de sensibilidade. I. Almeida, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Alencar, Marcelo Hazin (Coorientador). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">UFPE</p> <p>658.5 CDD (22. ed.)</p> <p style="text-align: right;">BCTG/2023-162</p>
-------	--

RAMON SWELL GOMES RODRIGUES CASADO

**MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO EM PORTFÓLIO PARA APOIO A  
GESTÃO DE RISCOS EM GASODUTOS DE GÁS NATURAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências e Tecnologia, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção. Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovado em: 19 / 07 / 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Profa. Dra. Caroline Maria de Miranda Mota (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Profa. Dra. Danielle Costa Morais (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Prof. Dr. Helder Gomes Costa (Examinador Externo)  
Universidade Federal Fluminense – UFF

---

Prof. Dr. André Luís Policani Freitas (Examinador Externo)  
Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, o centro e o fundamento de tudo em minha vida, por renovar a cada momento a minha força e disposição, pelo discernimento concedido ao longo dessa jornada e por ter me iluminado nas decisões mais difíceis.

De uma forma especial, a pessoa com quem amo partilhar a vida, a minha esposa Lorena, que vem me acompanhando desde a época da graduação e com quem tenho compartilhado sonhos e conquistas. Agradeço por todo amor, companheirismo, carinho, por toda colaboração, paciência e compreensão para me ajudar a achar soluções quando elas pareciam não existir, além de sua capacidade de me trazer paz. Assim como agradeço aos meus sogros, Liana e Gilmar, pela confiança, apoio e o carinho em todos os momentos durante esta importante etapa.

Aos meus pais, Marly e Valdir, pelo incentivo constante ao meu desenvolvimento profissional, pela força e compreensão em todos os momentos da minha vida, e pelo amor incondicional que têm por mim. E em especial, à memória de meu querido avô, Seu Chico, jamais vou esquecer o seu carinho por mim.

Aos meus orientadores, professor Adiel Teixeira de Almeida e professor Marcelo Hazin Alencar, pelo apoio e confiança a mim depositados, além da dedicada, competente e paciente atenção com este trabalho, sempre de maneira muito receptiva e aberta. Vocês realmente inspiraram minha trajetória como docente e pesquisador. Meu respeito e gratidão.

A todos os docentes do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) pelo aprendizado obtido, em especial ao professor Rodrigo Ferreira e a professora Eduarda Asfora. Seus ensinamentos certamente contribuíram positivamente para a minha formação durante a realização deste doutorado. Bem como a todos os funcionários que contribuíram de alguma forma, em especial a Tereza e Lucas Antunes pelo grande apoio.

A meus amigos do REASON – Lucas Borges, Francisco Filipe, Gilvando Henrique e Nicolas Lennick – por todas as trocas de experiências, parceria e companhia ao longo desses anos. Também agradeço aos colegas do CDSID – Yara, Manoel e Pedro – pela colaboração.

Aos professores membros da banca pelos pertinentes apontamentos que engradeceram esse estudo.

Agradeço também a CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento das minhas pesquisas ao longo do doutorado.

A todos que fizeram parte na minha formação, meus sinceros agradecimentos!

“A maior recompensa para o trabalho de uma pessoa não é o que ela ganha, mas o que ela se torna com isso” (RUSKIN, 2018, p. 156).

## RESUMO

O gás natural desempenha um papel importante como uma fonte de transição energética. Associado ao uso do gás natural, evidencia-se o cuidado com o desenvolvimento dos sistemas de transporte dessa substância, principalmente os gasodutos. A respeito disso, as transportadoras enfrentam desafios significativos em termos de infraestrutura, gestão de riscos e eficiência operacional. Portanto, esse trabalho pretende contribuir no processo de decisão quanto ao gerenciamento de riscos para gasodutos de gás natural, tornando-o mais explícito, racional e estruturado. Em outras palavras, é oportuno considerar uma avaliação envolvendo múltiplas dimensões de consequência pelas quais os gasodutos estão sujeitos. Para tanto, a tese explora uma avaliação de risco multidimensional (baseada na Teoria da Utilidade e na Teoria da Decisão) capaz de agregar as probabilidades, os valores das consequências e as preferências do gestor da transportadora de gás, diante desse cenário de múltiplas dimensões. Além disso, esse trabalho direciona de forma eficiente o foco de mitigação dos riscos. Para tanto utiliza-se de uma abordagem de portfólio, para apoiar a seleção estratégica de trechos mais críticos do gasoduto. Nesse sentido, o novo modelo permite que as transportadoras lidem com o dilema de investir na mitigação dos riscos ao longo do gasoduto sem exceder os recursos organizacionais, garantindo a continuidade do fornecimento do gás natural e a segurança de suas operações. Alguns estudos recomendam o uso de modelos aditivos e programação matemática (considerando a transformação da escala intervalar), para resolução de problemas desse gênero (portfólio). No entanto, tal abordagem é inadequada quando a modelagem se baseia na Teoria da Utilidade (devido a estrutura axiomática). Em decorrência desse impasse, esta tese introduz um algoritmo de enumeração implícita para lidar com a seleção de portfólio quando a escala intervalar é a única forma de mensuração. Uma aplicação numérica foi realizada para validar o modelo proposto, bem como uma investigação sólida e abrangente da sensibilidade do modelo. Os resultados mostram a credibilidade do modelo proposto na identificação dos trechos mais críticos do gasoduto. Consequentemente, os gestores podem se beneficiar das informações do modelo para orientar a tomada de decisões estratégicas, contribuindo para a redução de custos, aumento da segurança, melhoria da eficiência operacional, minimização de impactos sociais e ambientais, e fortalecimento da reputação da empresa.

**Palavras-Chave:** Gasoduto de gás natural; Avaliação de risco multidimensional; Seleção de portfólio; Enumeração implícita; Análise de sensibilidade.

## **ABSTRACT**

Natural gas plays an essential role as a source of the energy transition. The development of natural gas transportation systems, particularly pipelines, is associated with the use of natural gas. In this regard, carriers face significant infrastructure, risk management, and operational efficiency challenges. Therefore, this paper intends to contribute to the decision-making process regarding risk management for natural gas pipelines, making it more explicit, rational, and structured. In other words, it is appropriate to consider an evaluation involving multiple dimensions of consequence to which pipelines are subjected. To this end, the thesis explores a multidimensional risk assessment (based on Utility Theory and Decision Theory) capable of aggregating the probabilities, consequence values, and preferences of the gas carrier manager in the face of this multiple-dimension scenario. In addition, this work efficiently directs the focus of risk mitigation. A portfolio approach is used to support the strategic selection of the most critical sections of the pipeline. In this sense, the new model allows carriers to deal with the dilemma of investing in risk mitigation along the pipeline without exceeding organizational resources, ensuring the continuity of natural gas supply and the safety of their operations. In this regard, some studies recommend using additive models and mathematical programming (considering interval scale transformation) to solve such problems (portfolio). However, such an approach is inadequate when the modeling is based on Utility Theory (due to the axiomatic structure). As a result of this impasse, this thesis introduces an implicit enumeration algorithm to deal with portfolio selection when the interval scale is the only form of measurement. A numerical application was performed to validate the proposed model and a robust and comprehensive investigation of the model's sensitivity. The results show the proposed model's credibility in identifying the pipeline's most critical sections. Consequently, managers can benefit from the model's information to guide strategic decision-making, contributing to cost reduction, increased safety, improved operational efficiency, minimized social and environmental impacts, and strengthened company reputation.

**Keywords:** Natural gas pipeline; Multidimensional risk assessment; Portfolio selection; Implicit enumeration; Sensitivity analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Escopo da tese e seus produtos/publicações.....	25
Figura 2 –	Estrutura do modelo proposto.....	45
Figura 3 –	Etapas do modelo de avaliação de risco multidimensional.....	47
Figura 4 –	Representação da busca pela enumeração implícita.....	52
Figura 5 –	Mapeamento de portfólios de fronteira.....	59
Figura 6 –	Razão de incremento do risco agregado entre os portfólios.....	61
Figura 7 –	Análise de desagregação de risco dos portfólios.....	63
Figura 8 –	Protocolo da análise de sensibilidade global.....	73
Figura 9 –	Percepção do nível de sensibilidade através do valor de referência.....	77
Figura 10 –	Resultados da SMC para os portfólios de referência em cada padrão.....	79
Figura 11 –	Apresentação do nível de sensibilidade das seções-chave.....	80
Figura 12 –	Ilustração da comparação dos resultados entre os modelos.....	85
Figura 13 –	Frequências dos portfólios obtidos na SMC para o modelo PSIE.....	87
Figura 14 –	Interface inicial do SAD criado com base no modelo proposto.....	92
Figura 15 –	Arquitetura do SAD em função das camadas.....	92
Figura 16 –	Estrutura do banco de dados relacional.....	94
Figura 17 –	Estrutura das etapas de execução do SAD.....	95
Figura 18 –	Interface do ajuste de curva para uma das funções utilidade.....	97
Figura 19 –	Interface de uma parte da elicitação das constantes de escala.....	98
Figura 20 –	Interface do módulo de avaliação dos riscos.....	99
Figura 21 –	Interface do módulo de seleção dos portfólios.....	100
Figura 22 –	Interface das análises de visualização gráfica.....	101
Figura 23 –	Interface do módulo de análise de sensibilidade.....	102
Figura 24 –	Interface das análises estatísticas associadas as simulações efetuadas.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resumo dos dados numéricos da aplicação.....	56
Tabela 2 –	Conjunto de portfólios de fronteira obtidos com o modelo proposto.....	57
Tabela 3 –	Principais características dos componentes da análise de sensibilidade global.....	78
Tabela 4 –	Frequência dos portfólios de referência originais e não padronizados.....	86
Tabela 5 –	Frequência de seções incluídas no portfólio de referência.....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALL	Variação de todos os grupos de parâmetros analisados
CDZ	Zona Crítica de Perigo ( <i>Critical Danger Zone</i> )
CDSID	Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DM	Decisor ( <i>Decision Maker</i> )
BD	Banco de Dados
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
E	Nível de variação extrema ( <i>extreme</i> )
EGIG	<i>European Gas pipeline Incident data Group</i>
H	Nível de variação alta ( <i>high</i> )
HR	Radiação de Calor ( <i>Heat Radiation</i> )
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado próprio ( <i>Integrated Development Environment</i> )
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
0-1 KP	Problema da Mochila Binária ( <i>Binary Knapsack Problem</i> )
L	Nível de variação baixa ( <i>Low</i> )
PL	Programação Linear
M	Nível de variação média ( <i>Medium</i> )
MAUT	Teoria da Utilidade Multiatributo ( <i>Multi-Attribute Utility Theory</i> )
MCDM/A	Tomada/Auxílio de Decisão Multicritério ( <i>Multi-Criteria Decision Making/Aid</i> )
SMC	Simulação de Monte Carlo
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
GGN	Gasodutos de Gás Natural
OPEX	Custos Operacionais ( <i>Operating Expense</i> )
PDF	Função Densidade de Probabilidade ( <i>Probability Density Function</i> )
PHMSA	<i>Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration</i>
PSIE	Seleção de Portfólio baseada na Enumeração Implícita ( <i>Portfolio Selection based on Implicit Enumeration</i> )
REASON	Grupo de Pesquisa em Análise de Risco e Modelagem em Meio-ambiente, Ativos, Segurança, Operações e Natureza
RR	Razão de Risco

SCEN	Variação por Cenário
SEC	Variação por Seção
T	Distribuição Triangular
U	Distribuição Uniforme

## LISTA DE SÍMBOLOS

$S$	conjunto de seções candidatas
$s_i$	i-ésima seção do gasoduto
$i$	índice das seções
$C$	conjunto de atributos
$c_j$	j-ésimo atributo
$j$	índice dos atributos/critérios
$n$	total de seções
$m$	total de atributos
$Z$	solução viável de (M)
$x_i$	variável binária
$v(s_i)$	valor da seção obtido na avaliação multiatributo
$v_j$	função de valor marginal
$\varepsilon_{ij}$	resultado i-ésima seção de acordo com o j-ésimo atributo
$k_j$	constante de escala do j-ésimo atributo
$b_i$	consumo de recursos da i-ésima seção
$B$	limite de recursos
$F_j$	função de utilidade unidimensional do j-ésimo atributo
$u(c_1, c_2, \dots, c_j)$	função de utilidade multiatributo
$\beta, \gamma$	coeficientes (linear e angular) usados na formulação das independências da Teoria da Utilidade
$e$	dimensão ambiental
$f$	dimensão financeira
$h$	dimensão humana
$\Theta$	conjunto dos cenários de perigo
$\theta$	cenário acidental
$\theta_N$	cenário de normalidade
$\pi_i(\theta)$	probabilidade de ocorrência de cenário acidental na i-ésima seção
$\pi_i(\theta_N)$	probabilidade de cenário de normalidade na i-ésima seção
$u(e, f, h)$	função de utilidade aditiva
$u(e), u(f)$ e $u(h)$	utilidades unidimensionais para as dimensões de risco

$k_e, k_f$ e $k_h$	constantes de escala
$P(e, f, h   \theta, s_i)$	distribuição de probabilidade para cada par de seção e cenário
$F(e, f, h   \theta, s_i)$	função densidade de probabilidade
$r_{s_i}$	risco multidimensional da $i$ -ésima seção
$p_{raiz}$	portfólio inviável formado pela combinação de todas as seções
$p$	conjunto completo de soluções ótimas (portfólios ótimos)
$p_a$	$a$ -ésimo portfólio do conjunto de soluções ótimas
$a$	índice dos portfólios ótimos
$A$	total de portfólios ótimos
$X^t$	vetor de variáveis binárias alocadas no portfólio no nível $t$
$Y_t$	conjunto de seções alocadas no portfólio no nível $t$
$t$	nível de viabilidade da árvore de busca
$O^t$	conjunto de todos os portfólios ótimos no nível $t$
$V$	conjunto de todos os portfólios viáveis
$q$	nível inferior da árvore de busca
$\lambda$	índice da variável que assumirá o valor zero no conjunto $Y_*$
$\bar{z}$	solução viável parcial de (M)
$r_{p_a}$	valor de risco agregado do $a$ -ésimo portfólio
$\mathbb{W}$	espaço de entrada (parâmetros) do modelo proposto
$W$	conjunto de parâmetros de entrada
$w_d$	$d$ -ésimo parâmetro do modelo
$d$	total de parâmetros de entrada
$G$	número total de repetições
$g$	$g$ -ésima replicação da simulação
$p^*$	portfólio ótimo de referência
$p_0^*$	portfólio ótimo de referência original
$p_g^*$	portfólio ótimo de referência atribuído a $g$ -ésima replicação
$\delta^g$	índice da modificação do portfólio ótimo na $g$ -ésima replicação
$\hat{\varphi}_{s_i}$	variável construída associada a proporção das seções distintas
$\varphi_0$	valor de referência da proporção esperada de modificações
$z$	estatística de teste de proporção para uma amostra
$\alpha$	nível de significância

$\phi$  incremento no valor de referência da proporção esperada  
 $C_{n,t}$  complexidade do algoritmo proposto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	Justificativa e relevância.....	22
1.2	Objetivos.....	23
1.2.1	<i>Geral.....</i>	23
1.2.2	<i>Específicos.....</i>	24
1.3	Estrutura da tese.....	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>28</b>
2.1	Gerenciamento de riscos aplicado à gasodutos.....	28
2.2	Modelagem de seleção de portfólio.....	32
2.2.1	<i>Inconsistência da abordagem multicritério para seleção de portfólio.....</i>	35
2.3	Um enfoque multicritério da seleção de portfólio para GGN.....	36
2.3.1	<i>Limitação na transformação de escala na abordagem multidimensional.....</i>	38
2.4	Algoritmos de resolução para problemas de portfólio.....	40
2.5	Síntese e posicionamento da tese.....	42
<b>3</b>	<b>MODELO DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO EM GGN..</b>	<b>44</b>
3.1	A estrutura do modelo proposto.....	44
3.2	Modelo de avaliação de risco multidimensional.....	45
3.3	Descrição do algoritmo de enumeração implícita.....	50
3.3.1	<i>Notações e definições.....</i>	52
3.4	Aplicação numérica.....	54
3.4.1	<i>Descrição dos dados e organização da análise.....</i>	54
3.4.2	<i>Resultados e discussão.....</i>	57
3.5	Síntese do capítulo.....	63
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO MODELO.....</b>	<b>65</b>
4.1	Contextualização sobre a investigação das incertezas.....	65
4.1.1	<i>Aspectos direcionadores da análise.....</i>	67
4.1.2	<i>Insights para a análise de sensibilidade.....</i>	68
4.2	Análise dos parâmetros do modelo de seleção de portfólio.....	69
4.2.1	<i>Zona Crítica de Perigo (CDZ).....</i>	70
4.2.2	<i>Fluxo de Radiação de Calor.....</i>	71
4.2.3	<i>Parâmetros relacionados ao gás.....</i>	71

4.2.4	<i>Todos os parâmetros de risco.....</i>	72
4.3	Estrutura da análise de sensibilidade global.....	72
4.4	Simulação: resultados e discussão.....	77
4.4.1	<i>Explorando a análise de sensibilidade global.....</i>	77
4.4.2	<i>Resumo das descobertas da análise de sensibilidade global.....</i>	83
4.5	Análise complementar: sensibilidade em relação a restrição.....	84
4.5.1	<i>Resultados da análise de sensibilidade quanto aos custos.....</i>	85
4.6	Síntese do capítulo.....	89
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA GERENCIAMENTO ESTRATÉGICO DE RISCOS EM GGN.....</b>	<b>91</b>
5.1	Descrição do sistema.....	91
5.2	Arquitetura do software.....	92
5.3	Modularização do SAD.....	94
5.3.1	<i>Inicialização do SAD.....</i>	95
5.3.2	<i>Módulo de eliciação das preferências.....</i>	96
5.3.3	<i>Módulo de avaliação dos riscos.....</i>	98
5.3.4	<i>Módulo de seleção dos portfólios.....</i>	99
5.3.5	<i>Módulo de análise de sensibilidade.....</i>	101
5.4	Síntese do capítulo.....	103
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>104</b>
6.1	Considerações finais.....	104
6.2	Limitações e desafios da pesquisa.....	106
6.3	Implicações práticas.....	107
6.4	Direcionamentos para trabalhos futuros.....	108
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>109</b>
	<b>Apêndice A – Pseudocódigo da enumeração implícita.....</b>	<b>120</b>
	<b>Apêndice B – Resultados dos testes de proporção.....</b>	<b>122</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O gás natural é o combustível fóssil de queima mais limpa, e sua importância também pode ser explicada por sua versatilidade em diversos segmentos, como nos setores siderúrgico, químico e petroquímico. Assim, confirmando essa relevância, o gás natural é atualmente considerado a terceira energia mais utilizada globalmente, contribuindo com uma participação recorde de 24,42% do consumo global de energia primária (BRITISH PETROLEUM, 2022).

Dentre os sistemas mais adequados para o transporte de gás natural, conectando áreas de produção à pontos finais de demanda, tem-se que os sistemas de gasodutos são os mecanismos mais eficientes, principalmente em termos econômicos e de segurança (MUGGLETON *et al.*, 2020; SU *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2021). Portanto, para melhor atender o consumo dessa energia primária é fundamental garantir que a rede formada pelos gasodutos permaneça robusta e operacional (CHEN; XIE; TIAN, 2022).

Embora o gasoduto seja o modal mais adequado de transporte em longas distâncias (XIE; TIAN, 2018), uma preocupação recorrente dos gestores está relacionada a vazamentos (LI *et al.*, 2019; MOHAMMED *et al.*, 2019). Vazamentos podem ocorrer devido a diversas causas de falhas nas operações de dutos, como corrosão, proteção inadequada da tubulação, falhas de solda e vandalismo (BOLOTINA *et al.*, 2018; IDACHABA; RABIEI, 2021). Portanto, riscos potenciais como explosões, incêndios, poluição ambiental e dispersão tóxica podem ser desencadeados (HASSAN *et al.*, 2022; SÝKORA; MARKOVÁ; DIAMANTIDIS, 2018; VAIRO; PONTIGGIA; FABIANO, 2021).

Além disso, a gravidade das consequências pode ser intensificada quando se considera a combinação de diferentes fatores (LAM; CRUZ, 2019). Assim, a criticidade e vulnerabilidade dos Gasodutos de Gás Natural (GGN) são evidenciadas devido aos eventos catastróficos que as falhas podem provocar. Além do mais, a experiência de acidentes anteriores em gasodutos reforça a gravidade e a importância de garantir a segurança desses sistemas (BIEZMA *et al.*, 2020).

Ratifica-se essa relevância, principalmente, quando se leva em consideração que os acidentes nessas infraestruturas podem ter diferentes consequências, seja em termos ambientais, econômicos, ou mesmo resultar na perda de vidas (RAMÍREZ-CAMACHO *et al.*, 2017).

Tendo isso em mente, a gestão adequada e eficiente dos sistemas de gasodutos continua sendo uma tarefa crucial para os gestores das empresas de transporte de gás natural. Manter as operações desse tipo de empresa confiáveis e produtivas é um processo de gestão complexo.

Por esse motivo, alguns códigos e normas técnicas, como ASME B31.4, BS EN 14161 ou ISO 13623 (ASME, 2019; BS EN 14161:2011+A1:2015, 2015; ISO 13623, 2017), estabelecem requisitos regulatórios em diferentes áreas (como operações, inspeção e manutenção) para obter benefícios operacionais, de custo e de segurança para o sistema de transporte de gás natural.

No entanto, embora esses controles obrigatórios reduzam consideravelmente os riscos de um evento não planejado, é essencial considerar estudos complementares com ênfase na melhoria contínua do processo de gestão de riscos, fator que é especialmente significativo para o cenário da indústria de gás natural.

Como as taxas de falhas e, conseqüentemente, os riscos de acidentes em gasodutos não são constantes ao longo de seu trajeto, é promissor dividi-los em trechos com características homogêneas, ou seja, realizar segmentação à medida que as condições mudam durante o percurso do gasoduto (JO; AHN, 2005). Nesse contexto, é possível estabelecer estratégias de mitigação mais eficientes, analisando os riscos em cada segmento de gasoduto

Entretanto, além de considerar a percepção dos riscos em relação ao gasoduto, deve-se examinar também as restrições organizacionais. Nesse sentido, torna-se um desafio para os operadores de gasodutos garantir a mitigação simultânea dos riscos em toda a rede de dutos devido à disponibilidade limitada de recursos (sejam recursos humanos, materiais, equipamentos ou financeiros).

Assim, com vista à melhoria da gestão de risco e alocação de recursos, uma questão relevante para o gestor de uma empresa que transporta gás natural é lidar com o dilema de investir então na melhoria de um conjunto dos trechos mais críticos, com base em um índice de risco, sem exceder os recursos disponíveis.

Logo, há a necessidade de tomar decisões estratégicas envolvendo a escolha desse subconjunto de trechos do gasoduto, que requeiram ações adicionais (por exemplo, de operação e manutenção) para alcançar os objetivos organizacionais e de segurança operacional.

De fato, o esforço para priorizar e reduzir o risco é uma premissa básica, pois há uma tendência natural do nível de risco aumentar ao longo do tempo se nenhuma ação for realizada. Nesse sentido, a seleção de portfólio pode desempenhar um papel essencial no sucesso do processo de gestão de riscos. Assim, ao invés de atuar de forma ampla em todo o gasoduto, a gestão de riscos na perspectiva da seleção de portfólio permite a concentração das ações de mitigação em uma combinação de áreas específicas (seções), analisando a individualização do gasoduto.

Considerando isso, pode-se investir recursos estrategicamente no subconjunto mais crítico de um grande grupo de seções candidatas sem violar restrições indispensáveis. Como resultado, os riscos podem ser melhor mitigados, garantindo assim o máximo benefício em segurança, operação e viabilidade econômica.

O problema de seleção de portfólio envolve a escolha de um subconjunto de itens que otimize o valor global do portfólio, considerando diferentes aspectos e algumas restrições (ŞAHIN ZORLUOĞLU; KABAK, 2021). Diante desse cenário, percebe-se que a estratégia de seleção das áreas específicas do gasoduto dificilmente será resumida em um atributo (ou critério). Inerente a esse contexto, espera-se estimar parâmetros e realizar análises entre objetivos múltiplos e possivelmente conflitantes, como questões humanas, financeiras e ambientais.

Isso leva à necessidade de usar abordagens de Tomada/Auxílio de Decisão Multicritério (MCDM/A – *Multi-Criteria Decision Making/Aid*) para lidar com a seleção de portfólio. Ratificando essa observação, uma revisão da literatura sobre métodos de otimização de portfólio, apresentada por Saiz *et al.* (2021), forneceu tendências, abordagens e alguns insights sobre este tema. Dentre as descobertas, esses autores destacam que o grupo de estudos mais diversos metodologicamente e o segundo mais encontrado na literatura envolve abordagens MCDM/A combinadas com o uso de Programação Linear (PL).

As abordagens MCDM/A contribuem na estruturação do problema e proporcionam condições para lidar com objetivos conflitantes, comumente presentes em situações práticas de tomada de decisão (KEENEY; RAIFFA, 1976; VINCKE, 1992). Nessa perspectiva, de Almeida *et al.* (2017) destacam que uma análise adequada e alinhada com a realidade prática do gerenciamento de riscos deve considerar uma abordagem multidimensional, incorporando os diferentes aspectos das consequências, visto que acidentes em um sistema de dutos podem causar diversos tipos de danos, conforme mencionado anteriormente.

Para os GGN, por exemplo, esse tipo de avaliação de risco multidimensional tem sido abordado na literatura, em muitos estudos, considerando elementos probabilísticos, devido ao desafio de mensurar níveis precisos de consequências (BRITO; DE ALMEIDA, 2009; BRITO; DE ALMEIDA; MOTA, 2010; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017; VIANA *et al.*, 2021). Esse tipo de abordagem multicritério utiliza os conceitos de Análise de Decisão e Teoria da Utilidade para medir riscos considerando três consequências probabilísticas principais: consequências humanas, ambientais e financeiras.

Vale destacar que há pontos significativos que são considerados nesses estudos quanto ao processo de decisão, a saber: a racionalidade e o comportamento do Decisor (DM – *Decision*

*Maker*) em relação aos riscos; o aspecto multidimensional da avaliação de riscos; e as incertezas inerentes ao contexto de risco (DE ALMEIDA *et al.*, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2021).

Portanto, com base na revisão integrativa utilizada para estabelecer a síntese de conhecimento desta tese, é plausível supor que uma limitação possa ser observada nos estudos quanto ao cumprimento dessas questões decisórias (mencionadas anteriormente) em uma abordagem conjunta (MCDM/A combinado com PL) envolvendo a seleção de portfólio para um Gasoduto de Gás Natural (GGN): pesquisas envolvendo múltiplos aspectos (multidimensional) ainda não foram desenvolvidas de forma significativa.

Então pode-se estabelecer um insight valioso para esse processo de decisão: utilizar a avaliação de risco multidimensional para GGN, relatada anteriormente, para lidar com o risco na seleção dos trechos mais críticos (considerando restrições específicas) através da seleção de portfólio. Entretanto, percebe-se um entrave no que diz respeito ao contexto de modelagem desse insight: a avaliação de risco multidimensional possui uma série de características que impõem o uso da escala intervalar.

Nessa perspectiva, vale ressaltar que estudos relacionados à análise de portfólio, no contexto das abordagens MDCM/A sob diferentes perspectivas (natureza compensatória e não compensatória), apontam vieses na construção de portfólios que estão relacionados ao uso de uma escala intervalar (DE ALMEIDA; VETSCHERA, 2012; DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014; MARTINS *et al.*, 2016; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2012). Segue abaixo o exemplo de alguns desses vieses:

- efeito do tamanho do portfólio, no qual a avaliação pode ser enviesada de acordo com o número de itens incluídos em um portfólio. Por exemplo: a escala intervalar pode favorecer a indicação de um portfólio composto por cinco itens, enquanto que existe no espaço de soluções um portfólio com melhor desempenho composto de seis itens;
- problema da consistência das agregações, em que uma sequência diferente de agregações entre itens e atributos pode levar a resultados diferentes.

Esses estudos comprovam a necessidade de conversão para uma escala de razão, para evitar resultados possivelmente enganosos quanto a recomendação final do modelo de seleção de portfólio.

Assim, evidencia-se a dificuldade de garantir uma melhor solução (portfólio) usando a abordagem conjunta (MCDM/A combinado com PL) devido aos vieses causados pela escala intervalar (em especial, o efeito do tamanho do portfólio). Então, embora na literatura, como discutido anteriormente, existam mecanismos para corrigir os problemas existentes com seleção

de portfólio, o que fica claro é o surgimento de uma situação específica em que a transformação para uma escala de razão pode ser inviável.

Portanto, no que diz respeito à otimização de portfólio para um GGN baseado na abordagem multidimensional supracitada, este estudo se concentra na seguinte questão: como realizar a seleção de portfólio baseada em modelos aditivos quando a escala intervalar é a única forma de mensuração? Assim, esta tese responde a essa pergunta apresentando uma abordagem para selecionar um conjunto das seções mais inseguras de um GGN. Ou seja, obtêm-se de forma eficiente um portfólio das seções do gasoduto que necessitam de melhorias para tratar o risco. Sendo que esse risco é avaliado por múltiplas dimensões com base em um modelo fundamentado na Teoria da Utilidade, na qual uma série de propriedades devem ser consideradas, entre elas o uso da escala intervalar.

Logo, a inovação do modelo proposto reside no fato dele adotar uma abordagem distinta para tratar os *gaps* observados: i) carência de estudos de seleção de portfólio envolvendo aspectos multidimensionais quanto a avaliação de riscos para GGN; ii) modelo eficiente de seleção de portfólio que supera o viés do efeito do tamanho do portfólio, mesmo considerando a mensuração a partir da escala intervalar.

Neste caso, considerou-se uma nova contribuição dentro dos modelos aditivos para o problema de portfólio (contribuição ao estado da arte), onde uma abordagem multicritério em um contexto probabilístico e uma estrutura de ramificação e busca aprimorada (enumeração implícita) são utilizados.

Nenhum estudo anteriormente revisado da literatura é composto pelas mesmas características da abordagem proposta neste trabalho. A respeito disso, foram utilizadas informações acessadas em duas bases de dados abertas – *Scopus (Elsevier)* e *Web of Science (Clarivate Analytics)* – que são cientificamente relevantes e abrangem diversos campos de conhecimento, possibilitando a realização de estudos consistentes dentro do escopo analisado.

Em geral, a lógica apresentada nesse trabalho compreende características essenciais que são discutidas ao longo da sequência de trabalhos anteriores (como no caso da avaliação de risco multidimensional) e sugere novos insights para lidar com a construção dos portfólios (através do algoritmo desenvolvido).

Adicionalmente é fornecido ao gestor (DM) uma maior compreensão do comportamento do modelo, considerando uma análise de sensibilidade global. Em outras palavras, esclarece-se como as várias fontes de incerteza e suas extensões afetam a confiança no resultado do portfólio recomendado, melhorando assim as informações fornecidas para o apoio à decisão quanto ao processo de gestão de riscos.

## 1.1 Justificativa e relevância

Uma fonte valiosa de informações sobre incidentes em gasodutos europeus é mantida pelo *European Gas pipeline Incident data Group* (EGIG), o qual é uma cooperação entre um grupo de dezessete grandes operadores de sistemas de transporte de gás na Europa. O último relatório do EGIG (o balanço de 1970 a 2019) aponta o registro de 1.411 incidentes (EGIG, 2020).

Outra base de dados importante, que abrange tendências para incidentes em gasoduto é a mantida pelo *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration* (PHMSA), do departamento de transporte dos Estados Unidos (PHMSA, 2023). As estatísticas resumidas das consequências de incidentes significativos nos Estados Unidos (desde 2005), apontam cerca de 197 mortes e 899 feridos, totalizando um custo em torno de US\$ 4.892.630.083,00 (o qual envolve danos ao sistema de dutos, resposta de emergência, custo do produto perdido, e danos a propriedades não pertencentes ao operador do duto) (PHMSA, 2023).

Diante dessas informações, percebe-se que o gerenciamento de riscos em GGN é extremamente importante devido ao potencial impacto negativo que acidentes nesses sistemas podem causar. É importante lembrar que os efeitos de um acidente em um gasoduto podem variar dependendo da gravidade do acidente, do local afetado e das medidas tomadas para lidar com a situação.

De modo geral, observa-se que em caso de acidente, os efeitos podem envolver: i) a perda de vidas ou feridos; ii) danos significativos ao meio ambiente, incluindo a liberação de substâncias tóxicas e poluentes na atmosfera, bem como a contaminação do solo e da água; iii) grandes prejuízos financeiros.

Nesse sentido, por meio do gerenciamento eficaz de riscos, é possível promover a segurança das pessoas, a saúde pública, o meio ambiente e a economia, garantindo que os gasodutos sejam operados de maneira segura e confiável. Portanto, a justificativa desta tese baseia-se na contribuição para melhoria contínua das práticas de gerenciamento de riscos em gasodutos, permitindo que empresas que operam esses sistemas direcionem esforços para prevenir acidentes e minimizar os impactos negativos em caso de ocorrência de eventos adversos em áreas problemáticas.

A respeito disso, a implicação da formulação da seleção de portfólio quanto à abordagem multidimensional é o ponto de partida para justificar o uso dessa estrutura de pesquisa aprimorada (baseada em um algoritmo de enumeração implícita), para superar o efeito da escala intervalar, quando não for possível alterar essa escala.

Portanto, esta abordagem de pesquisa permite que o espaço de solução seja explorado de forma eficiente, oferecendo ao DM tanto uma recomendação mais confiável quanto uma ampla gama de informações sobre o contexto de decisão. Essas informações permitem que o DM entenda melhor como o risco do gasoduto deve ser melhor gerenciado na formação de portfólios. Assim, contribui para uma decisão mais consistente que atenda principalmente as necessidades da organização.

Consequentemente, esta tese pode proporcionar várias contribuições significativas na área de estudo, bem como na sociedade como um todo. Deste modo, algumas possíveis contribuições que reforçam a relevância desta tese são:

- Impacto na sociedade: Identificar os trechos mais críticos do gasoduto pode ajudar a prevenir acidentes graves e proteger a população. Isso pode incluir a prevenção de explosões, incêndios e outros tipos de acidentes que possam ocorrer como resultado de falhas no sistema;
- Contribuição à transparência e prestação de contas: As informações estratégicas repassadas com esse trabalho podem ser incorporadas às políticas e práticas da empresa, demonstrando sua prontidão para lidar com a gestão de riscos e sua preocupação com a segurança e o bem-estar das comunidades. Isso pode ajudar a aumentar a transparência e a prestação de contas para as autoridades reguladoras e o público em geral;
- Melhoria da proteção do meio ambiente: Pode-se implementar medidas preventivas de forma estratégica para reduzir o risco de vazamentos de gás. Dessa forma, a tese pode ser usada como uma abordagem proativa, permitindo minimizar o impacto que eventuais acidentes podem causar na fauna e flora nas áreas circunvizinhas ao gasoduto;
- Redução de custos: Com as informações obtidas nessa tese pode-se priorizar ações preventivas mais eficazes, reduzindo o risco de falhas no sistema e minimizando o tempo de inatividade. Isso pode ter um impacto positivo no desempenho financeiro da organização envolvida na operação do gasoduto.

## 1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os específicos da tese.

### 1.2.1 Geral

O objetivo geral é propor um modelo de decisão multicritério que auxilie no gerenciamento de riscos dos trechos mais críticos em gasodutos de gás natural, com base na integração de uma avaliação de risco multidimensional com uma abordagem de portfólio.

### 1.2.2 *Específicos*

Para se alcançar o objetivo geral, foi estabelecido os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma abordagem de enumeração implícita que atenda a análise combinatória da formulação dos portfólios e evite os vieses causados pela escala intervalar;
- Estruturar a integração da modelagem de risco multidimensional com uma abordagem de portfólio mediante a enumeração implícita;
- Realizar aplicação numérica do modelo proposto, visando ilustrar o apoio no gerenciamento de riscos em gasodutos de transporte de gás natural;
- Realizar uma análise de incertezas e de sensibilidade sobre os parâmetros do modelo proposto para verificar a robustez e a credibilidade das recomendações;
- Desenvolver um sistema de apoio à decisão com o intuito de fortalecer a aplicação do modelo proposto para a gestão de riscos no ambiente organizacional das transportadoras de gás natural.

### 1.3 Estrutura da tese

A tese está estruturada em 6 capítulos. O escopo pode ser observado de forma resumida conforme a Figura 1.

O Capítulo I, a Introdução, apresenta a contextualização do tema da pesquisa, com o intuito de permitir a melhor compreensão e entendimento do assunto. Diante disso, é exposto as motivações e justificativas para o desenvolvimento desse trabalho, bem como os objetivos (geral e específicos).

O Capítulo II, Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica, apresenta a base conceitual sobre o gerenciamento de riscos em gasodutos e os avanços metodológicos para o contexto multidimensional.

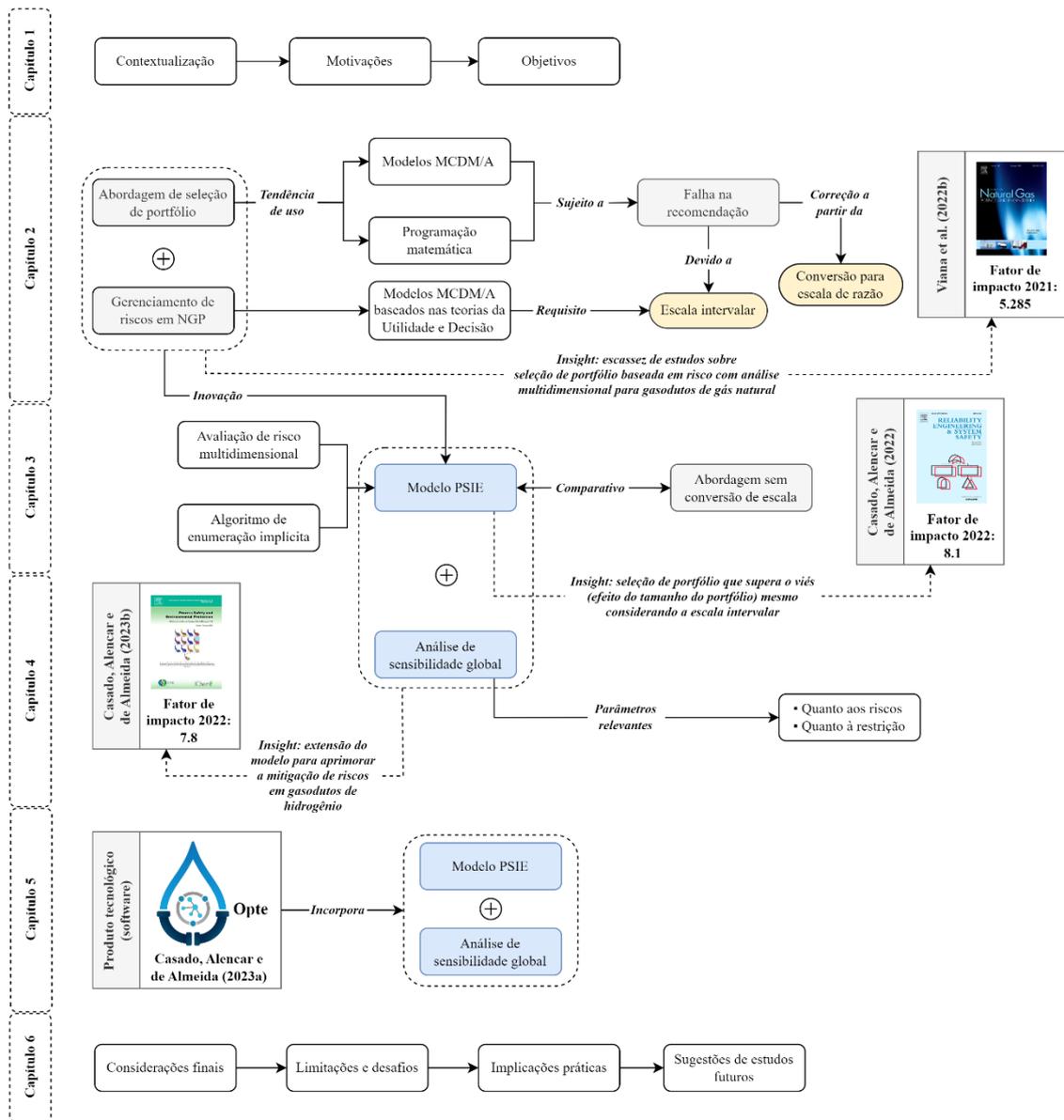
Ainda no Capítulo II, uma contextualização sobre a modelagem de seleção de portfólio sob o enfoque multicritério é apresentada. A respeito disso, é abordado também o principal problema observado na literatura para a formulação de portfólios (decorrente do uso da escala intervalar), bem como a indicação da correção sugerida pelas pesquisas anteriores (alteração da escala).

Neste ponto, vale ressaltar que diante das pesquisas realizadas, percebeu-se a escassez de estudos que abordem a avaliação multicritério de portfólios no que diz respeito às ações voltadas para GGN, especificamente sob o contexto multidimensional de riscos. Diante dessa

lacuna inicial, foi desenvolvido um subproduto deste trabalho (VIANA *et al.*, 2022b), o qual envolve um modelo decisão multicritério para selecionar um portfólio de ações de manutenção para GGN, baseado na avaliação multidimensional de riscos.

Esse primeiro subproduto serviu como suporte no mapeamento dos pontos relevantes desse estudo, possibilitando estabelecer um novo insight a ser explorado na literatura: a ausência de uma abordagem para lidar com a seleção de portfólio em contextos de GGN quando a referida correção mediante a transformação de escala não é possível.

Figura 1 – Escopo da tese e seus produtos/publicações



Fonte: O Autor (2023).

Diante dessa percepção, o Capítulo III, Modelo de Decisão para Seleção de Portfólios em GGN, apresenta em detalhes uma abordagem para seleção de portfólio que supera a lacuna mencionada anteriormente. A partir da integração de um modelo multicritério para a avaliação

de riscos multidimensionais com uma abordagem híbrida de enumeração implícita, consegue-se lidar com a análise combinatória das seções do gasoduto e formular o portfólio sem alterar a escala.

Uma aplicação numérica também pode ser verificada no Capítulo III, a qual serve para comprovar o caráter inovador abrangido pela tese e suas contribuições potenciais para a literatura vigente. A respeito disso, destaca-se a comparação entre os resultados do modelo proposto com a abordagem tradicionalmente empregada para a seleção de portfólios: PL (sem a conversão de escala e sujeita ao viés). A partir das contribuições diretas do modelo proposto neste capítulo, um outro subproduto foi publicado em um periódico internacional dedicado ao desenvolvimento e aplicação de métodos para a melhoria da segurança e confiabilidade de sistemas tecnológicos complexos (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022).

O Capítulo IV, Análise de Sensibilidade do Modelo, apresenta uma imersão sobre a análise das incertezas em relação as avaliações dos riscos multidimensionais e a restrição financeira, e o efeito disso sobre o modelo proposto. Além disso, esse capítulo também analisa a sensibilidade da recomendação do modelo de seleção de portfólio, revelando o grau de robustez. Deste modo, com base nas informações estabelecidas no capítulo anterior, é conduzida uma simulação para investigar essa abordagem.

Considerando as contribuições do Capítulo III e IV, é possível estender a avaliação dos riscos multidimensionais originalmente desenvolvida para gasodutos de gás natural para o uso em dutos de hidrogênio devido às características compartilhadas entre esses dois gases. Em outras palavras, ambos são gases inflamáveis e, portanto, apresentam riscos potenciais associados a vazamentos. Além do mais, esses gases são transportados por meio de gasodutos, o que implica em considerações semelhantes em relação à integridade do sistema, monitoramento e gerenciamento de acidentes.

Dessa forma, embora existam diferenças em relação às suas propriedades físico-químicas, como inflamabilidade e densidade, muitos dos princípios e metodologias utilizados na avaliação de riscos podem ser aplicados de maneira semelhante para esses dois gases. Por exemplo, a modelagem de cenários de vazamento, a análise de zonas de risco e a avaliação quantitativa de riscos podem ser adaptadas para abranger as características específicas do hidrogênio.

Portanto, com a devida consideração às diferenças específicas a extensão do modelo de seleção de portfólio baseado em riscos multidimensionais (e considerando a análise de sensibilidade) para gasodutos de hidrogênio pode ser facilitada pelo conhecimento e

experiência adquiridos no gerenciamento de riscos de gás natural (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2023b).

Por sua vez, no Capítulo V são apresentadas as características gerais, funcionalidades e arquitetura do software (produto tecnológico), desenvolvido para melhorar a eficiência do processo de decisão quanto ao gerenciamento de riscos em GGN (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2023a). Em outras palavras, diante do modelo proposto nesta tese, foi elaborada uma sequência de instruções codificadas que servem como interface entre a modelagem do problema e o usuário. O registro deste produto tecnológico está sendo processado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI).

Finalmente, no Capítulo VI, são descritas as considerações finais e limitações sobre o trabalho, bem como as implicações práticas e alguns direcionamentos para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a base conceitual que norteia esta tese. A seção 2.1 trata dos fundamentos do gerenciamento de riscos, com foco para Gasodutos de Gás Natural (GGN). Nesse sentido, apresenta-se a contextualização para a importância de estudos envolvendo o caráter multidimensional.

Em seguida, na seção 2.2, são apresentadas as principais características e aspectos das abordagens de seleção de portfólio. Além disso, tem-se a discussão sobre o viés observado na literatura para a formulação de portfólios sob o contexto multicritério.

Por meio de uma revisão integrativa, a seção 2.3 fornece informações mais abrangentes sobre o tema de seleção de portfólio direcionado para gasodutos, permitindo com isso a identificação de lacunas e oportunidades para a área de pesquisa envolvendo MCDM/A, seleção de portfólio e Gasodutos de Gás Natural (GGN). Por sua vez, na seção 2.4 serão explorados algoritmos específicos que visam solucionar problemas relacionados à gestão de portfólio. Finalmente, a seção 2.5 reúne os principais insights evidenciados com esse estudo, reforçando as contribuições potenciais.

### 2.1 Gerenciamento de riscos aplicado à gasodutos

O sucesso a longo prazo de uma organização depende de muitos fatores, como por exemplo a otimização de seus processos. No caso das empresas que transportam gás natural, elas também precisam levar em conta o desafio da gestão de riscos.

A respeito disso, em sistemas como os gasodutos, considerando o contexto de perdas, os impactos causados pela ocorrência de um cenário acidental afetam negativamente diferentes perspectivas, a exemplo da população, do meio ambiente e da própria organização (DE ALMEIDA *et al.*, 2017). Além disso, pode levar anos para ser restabelecido o *status quo* de cada contexto impactado.

Diante dessa perspectiva quanto ao potencial impacto de acidentes e considerando a tendência crescente de armazenamento subterrâneo em locais de produção de gás natural, percebe-se o aumento do interesse científico mundial no desenvolvimento de abordagens para gestão de riscos voltadas para gás natural (VAIRO; PONTIGGIA; FABIANO, 2021). Em outras palavras, o contexto dos GGN representa um tema de pesquisa emergente.

Em relação ao gerenciamento de riscos, quando ele é devidamente estruturado, permite um melhor nível de controle do duto (MUHLBAUER, 2015), contribuindo assim para um contexto de mitigação de perdas e integridade operacional.

A respeito disso, tem-se que a norma ISO 31000 (ISO 31000, 2018) fornece diretrizes para gerenciar riscos enfrentados pelas organizações por meio de uma linguagem e abordagem comuns, para qualquer tipo de risco. Em outras palavras, ela aborda a continuidade operacional, bem como fornece um nível de garantia em termos de resiliência econômica, resultados ambientais e de segurança para organizações de todos os tipos e tamanhos. Assim, considerando os princípios dessa norma, dentro da estrutura de gerenciamento de riscos, a condução do processo de avaliação de riscos é considerada a etapa mais vital.

Nesse aspecto, é possível observar claramente que a avaliação de risco tem sido amplamente discutida em diferentes circunstâncias para gasodutos. Para ilustrar, um estudo recente aborda a evolução dos métodos baseados em risco na gestão da integridade de gasodutos (KHAN; YARVEISY; ABBASSI, 2021). Por sua vez, levando em consideração os perigos e as dificuldades na detecção de vazamentos, um outro estudo desenvolve uma matriz de risco conectada a um modelo *bow-tie* para avaliar o risco do GGN (LU *et al.*, 2015).

A medida que o gerenciamento de riscos se torna mais importante, também aumenta o uso de procedimentos estruturados para identificar, avaliar e mitigar riscos (DE ALMEIDA *et al.*, 2022). Assim, vale ressaltar que outros estudos em relação a avaliação de riscos têm sido realizados incluindo as abordagens MCDM/A.

A importância da inclusão desse tipo de abordagem deriva da capacidade de lidar com as incertezas bem como compreender os conflitos envolvendo múltiplos objetivos (MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017). Além do mais, pode-se destacar que essas abordagens permitem uma melhor condução quanto à recomendação de solução, consistente com o sistema de valores do DM (ROY, 1996).

Por exemplo, o estudo de Balali *et al.* (2021) utiliza o método COPRAS (*Complex Proportional Assessment*) para realizar uma avaliação de risco em projetos urbanos de gás natural e o ANP (*Analytic Network Process*) para obter pesos para cada critério de avaliação. Da mesma forma, um modelo abrangente de avaliação de risco para oleodutos e gasodutos foi desenvolvido com base no método AHP aprimorado (*Analytic Hierarchy Process*) e TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*) no estudo de Wang e Duan (2019).

Além disso, foi desenvolvido um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para avaliação de risco ocupacional em um projeto de construção de GGN. Neste SAD o método VIKOR (em sérvio, *Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) foi estendido com conjuntos *fuzzy* pitagóricos (METE *et al.*, 2019). Finalmente, o trabalho de Yu *et al.* (2018) fornece um

insight para lidar com a avaliação de risco do processo de manutenção de dutos terrestres a partir de uma estrutura quantitativa com base no AHP.

No entanto, percebe-se que, dependendo do contexto do problema, o risco pode impactar em múltiplas dimensões, como aspectos ambientais, sociais, financeiros e técnicos (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014). Portanto, uma conduta mais abrangente e integrada da gestão de riscos não deve considerar apenas objetivos isolados (unidimensionais), como aspectos financeiros ou humanos (DE ALMEIDA *et al.*, 2017).

Vários episódios nas últimas décadas confirmam que a avaliação de risco considerando as perspectivas de múltiplas dimensões de consequência tem se tornado cada vez mais importante. Em 2009, ocorreu uma explosão do GGN em Moscou, causando a destruição de carros e instalações, além disso pessoas sofreram queimaduras (HAN; WENG, 2011).

No ano seguinte, nos EUA, houve a ruptura e liberação de grandes quantidades de gás natural (WU *et al.*, 2017). O vazamento do gás, neste caso, provocou incêndios estruturais na comunidade ao redor do gasoduto. As consequências da ruptura e do incêndio foram devastadoras: perda de vidas, vários feridos e destruição de casas.

Em 2014, na Índia, ocorreu outra explosão em um gasoduto subterrâneo que transportava gás natural, que resultou em morte de pessoas, destruição de propriedades e grandes danos ao meio ambiente (MISHRA; WEHRSTEDT, 2015).

Portanto, de acordo com os eventos listados acima, reforça-se que as consequências de um cenário acidental em um gasoduto afetam diversos aspectos (dimensões) (DE ALMEIDA *et al.*, 2017). Assim, é necessária uma avaliação de riscos em uma perspectiva multidimensional para que os riscos sejam melhor gerenciados. Em outras palavras, a relevância de ter uma visão sobre múltiplas perspectivas é consistente com as questões de risco do mundo real, uma vez que os objetivos formulados para a prática nunca levam a conclusões isoladas (DE ALMEIDA *et al.*, 2022).

A compreensão desse multidimensionalidade, aplicada na matemática, representa a noção de espaço com várias dimensões, ou ainda de um vetor usado para representar múltiplos fatores simultâneos. Com relação à abordagem multicritério, essa multidimensionalidade representa a incorporação de vários objetivos em um processo de tomada de decisão.

Neste contexto, You *et al.* (2014) apresentam um modelo de decisão para a gravidade das consequências na avaliação de risco para GGN. Esse modelo utiliza um método de análise multiatributo, que auxilia na tomada de decisão racional para promover avaliações de risco multidimensionais.

Enquanto isso, Wang, Wang e Ding (2021) desenvolvem uma abordagem de avaliação de risco multiatributo voltada para acidentes de produção envolvendo dutos, que não considera a ponderação dos diversos critérios utilizados. Fatalidades, ferimentos graves, perdas econômicas e poluição ambiental podem ser listados entre esses critérios.

No entanto, uma condição particular nesse contexto de estudo multidimensional é que as taxas de falhas e, conseqüentemente, os riscos de acidentes em gasodutos não são constantes ao longo de seu trajeto devido a mudanças em fatores operacionais, estruturais ou ambientais (JO; AHN, 2005). Por esta razão, é benéfico segmentar o duto em seções menores com características uniformes (ou seja, individualização do duto conforme as mudanças nas condições ao longo da rota do duto) (JO; AHN, 2005). Nesse contexto, é possível estabelecer estratégias de mitigação mais eficientes, analisando e avaliando os riscos multidimensionais em cada trecho do gasoduto.

Nesse perspectiva, um modelo de avaliação e priorização de riscos em gasodutos, abrangendo esse contexto de segmentação e abordagem multidimensional foi aplicado no estudo de Brito e de Almeida (2009). Este modelo emprega conceitos de Análise de Decisão (BERGER, 1985) juntamente com o uso da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory*) (KEENEY; RAIFFA, 1976) para avaliar riscos, considerando conseqüências ambientais, financeiras e humanas. Ou seja, ele evidencia a possibilidade de estimar riscos utilizando múltiplas dimensões a partir de uma abordagem bem estruturada de tomada de decisão.

Outros estudos também procuram utilizar dessa perspectiva de multidimensionalidade para estimar o risco, a exemplo de Medeiros, Alencar e de Almeida (2017), Viana *et al.* (2021), Wang, Wang e Ding (2021) e You *et al.* (2014) que investigam outros tipos de problemática em GGN e Casado, Alencar e de Almeida (2023b), Kang *et al.* (2023), Russo, de Marco e Parisi (2020) e Viana *et al.* (2022b) que desenvolvem estudos em contextos diferentes, adaptando a abordagem para dutos de hidrogênio.

Diante desse panorama, explorar questões relacionadas à gestão de riscos em uma perspectiva multidimensional para gasodutos revela-se fundamental, pois a superação desses problemas suporta os benefícios do uso do gás.

Contudo, considerando a densa rede de gasodutos, torna-se um desafio garantir uma gestão de risco eficiente (uniforme). Em outras palavras, o número de áreas que compõe essa rede (processo de individualização) e as várias combinações evidenciam a dificuldade de gerir esses sistemas, principalmente porque os recursos são limitados.

Então, assim como os riscos devem ser minimizados, o DM deve considerar também a priorização de trechos do gasoduto, embora as regulamentações imponham muitas ações e normas sobre o gerenciamento de riscos desse tipo de sistema (ASME, 2019; ISO 13623, 2017).

Nesse sentido, quando um gestor se depara com um problema dessa natureza, o suporte de um modelo voltado para a seleção de portfólio pode contribuir de forma significativa para aplicação em um contexto onde há risco.

Dessa forma, na próxima seção é apresentada uma visão geral dos estudos que abordam a problemática da seleção de portfólio. Ressalta-se que este trabalho se concentra no processo de gerenciamento de riscos de um duto que é usado para transportar gás natural. Nesse sentido, também é discutido a abordagem de seleção de portfólio para trechos estratégicos no enfrentamento de riscos multidimensionais em GGN.

## 2.2 Modelagem de seleção de portfólio

Pode-se compreender que, dado um conjunto de itens, o problema de seleção de portfólio envolve a escolha de um subconjunto desses itens, levando em consideração a restrição de recursos e o melhor desempenho relacionado (TLILI *et al.*, 2022).

Na literatura, pode-se encontrar uma variedade de abordagens propostas para lidar com o problema de seleção de portfólio em diferentes contextos. No entanto, para realizar a distinção entre eles, geralmente, duas perspectivas se destacam: i) a abordagem que avalia os itens individualmente; ii) a abordagem que realiza a avaliação de portfólios (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014; TLILI *et al.*, 2022; URLI; TERRIEN, 2010).

O termo “item” pode denotar diferentes contextos (projetos, aplicações financeiras, entre outros) a partir dos quais será composto um portfólio. Neste estudo, o termo está associado à seção do gasoduto.

Na primeira abordagem (orientada aos itens), os itens são avaliados individualmente e, em seguida, são compilados os portfólios. Ou seja, a reunião dos itens pertencentes aos portfólios é então feita agregando o valor do benefício bem como o consumo de recurso de cada item. Esta formulação simplifica a tarefa do DM, pois é mais fácil avaliar as consequências de itens individuais (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014). Em outras palavras, permite colocar os itens em uma escala comparativa e, conseqüentemente, ganhar a confiança do DM quanto à qualidade dos itens que compõem o portfólio (TLILI *et al.*, 2022).

Na segunda forma de abordagem (orientada ao portfólio), todos os portfólios viáveis são determinados e então esse espaço de solução é explorado para selecionar os melhores

portfólios (URLI; TERRIEN, 2010). Em outras palavras, o conceito é avaliar portfólios sem passar pela qualidade individual dos itens (TLILI *et al.*, 2022).

Nesse segundo caso, há uma questão particular quanto ao tamanho do problema em avaliação. Isto é, devido à natureza combinatória do problema, existe uma dificuldade de explorar todo o espaço de soluções, uma vez que se torna progressivamente complexo à medida que o número de itens aumenta (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014; URLI; TERRIEN, 2010). Assim, como o tamanho da amostra (número de itens) pode gerar um grande número de portfólios (devido as combinações possíveis), esse tipo de abordagem pode tornar o processo de resolução difícil e demorado (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014).

Portanto, neste trabalho, será dada ênfase à primeira abordagem de seleção, que se concentra na unidade de decisão, ou seja, as seções do gasoduto. Outro ponto relevante, no que tange a abordagem orientada aos itens, diz respeito à quantificação dos resultados da seleção dos mesmos quanto aos seus atributos. Conseqüentemente, antes de realizar a agregação entre as seções para formar um portfólio viável, vários atributos para avaliar essas seções devem ser agregados (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014). Assim, objetivos múltiplos e conflitantes estão inerentemente envolvidos.

Deste modo, para satisfazer essas condições e incluir as preferências do DM no processo decisório, as abordagens MCDM/A fornecem suporte adequado para lidar com problemas complexos, como o seleção de portfólio, auxiliando assim a tomada de decisões mais consistentes (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Em relação aos métodos multicritérios utilizados para seleção de portfólio, a literatura já propôs o uso de vários tipos, como métodos de sobreclassificação (DE ALMEIDA; VETSCHERA, 2012; DE ALMEIDA; DE ALMEIDA; COSTA, 2014; MAVROTAS; DIAKOULAKI; CALOGHIROU, 2006; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2012), e métodos aditivos (LOPES; DE ALMEIDA, 2015; MARTINS *et al.*, 2017; SOLA; MOTA, 2012). A abordagem que utiliza os métodos aditivos é o foco deste trabalho.

Retomando a perspectiva orientada à seleção de itens para formar um portfólio, a maioria das abordagens nesse contexto precisa ser combinada com modelos matemáticos para lidar com as questões complexas da formulação dos portfólios (MAVROTAS; DIAKOULAKI; CALOGHIROU, 2006; MAVROTAS; DIAKOULAKI; CAPROS, 2003).

De fato, quando o DM tem que cumprir certas limitações além dos múltiplos critérios de avaliação, o uso de um método MCDM/A por si só não é adequado para fornecer a assistência necessária (MAVROTAS; DIAKOULAKI; KOURENTZIS, 2008). Além disso,

neste caso, os requisitos de recursos não são considerados como atributos de avaliação pelo DM, mas como restrições.

De forma resumida, costuma-se adotar essa abordagem orientada aos itens dividida em duas fases:

- i) na primeira parte, como resultado da utilização de algum método MCDM/A, uma avaliação dos itens individuais é obtida;
- ii) então, a partir das avaliações obtidas, um modelo matemático é utilizado para otimizar o portfólio, considerando o desempenho agregado de uma combinação de itens e incorporando restrições de recursos na análise.

A respeito disso, considerando o uso de modelos matemáticos, a Programação Linear (PL) é uma abordagem amplamente utilizada para o contexto seleção de portfólio. Mais precisamente, por padrão os métodos propostos na literatura formulam o problema de seleção de portfólio como um modelo da mochila (TLILI *et al.*, 2022).

Esta formulação da mochila analisa um modelo de otimização combinatória para alcançar o melhor resultado do valor global do portfólio sujeito a restrição, e assim enfatiza que os melhores itens individuais não necessariamente formam o melhor portfólio (KELLERER; PFERSCHY; PISINGER, 2004).

Neste estudo, será considerada a versão do Problema da Mochila Binária (0-1 KP – *Binary Knapsack Problem*), pois é um dos problemas de otimização combinatória amplamente investigado tanto do ponto de vista teórico quanto prático na indústria e na gestão financeira (DELLA CROCE; SALASSA; SCATAMACCHIA, 2017).

Nessa perspectiva, uma vez que uma avaliação é estabelecida por meio de um método multicritério, essa informação é utilizada como entrada na função objetivo do modelo de programação 0-1 KP. A formulação matemática (M) é dada por:

$$(M): Z = \max \sum_{i=1}^n x_i v(s_i) \quad \because \quad v(s_i) = \left( \sum_{j=1}^m v_j(\varepsilon_{ij}) k_j \right) \quad (1)$$

$$\text{sujeito a } \begin{cases} \sum_{i=1}^n b_i x_i \leq B \\ x_i \in \{0, 1\} \\ i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

Para esta formulação, tem-se que  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$  representa o conjunto de seções candidatas do gasoduto e  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j\}$  o conjunto de atributos (ou critérios) utilizados para avaliar o desempenho das seções.

Como observado na equação 1,  $v(s_i)$  representa o valor da seção  $i$  obtido na avaliação multiatributo, enquanto a variável de decisão  $x_i$  é do tipo binária, ou seja, se a seção  $i$  é alocada ao portfólio, então  $x_i = 1$ , caso contrário, então  $x_i = 0$ . Entre parênteses,  $\varepsilon_{ij}$  representa o resultado da  $i$ -ésima seção de  $S$  de acordo com o  $j$ -ésimo atributo de  $C$ , enquanto  $v_j$  representa a função valor marginal do atributo  $j$ .

Por sua vez,  $k_j$  é a constante de escala (ou peso) para o atributo  $j$ , sendo seus valores não negativos e normalizados ( $k_j > 0$  para todo  $j$  e  $\sum k_j = 1$ ). A equação 2 apresenta a restrição do problema, onde  $b_i$  representa o consumo de recursos da seção  $i$  e  $B$  representa o limite de recursos. Neste trabalho, assume-se que não existem sinergias entre as seções do gasoduto.

### 2.2.1 Inconsistência da abordagem multicritério para seleção de portfólio

Quando a PL é aplicada com MCDM/A para problemas de portfólio baseados em modelos aditivos, surgem vieses que impactam diretamente no resultado, a exemplo do efeito do tamanho do portfólio, do efeito da linha de base e da consistência entre diferentes sequências de agregação (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014; LIESIÖ; PUNKKA, 2014; MAVROTAS; DIAKOULAKI; KOURENTZIS, 2008).

Dentre eles, chama-se a atenção para o viés causado pelo efeito tamanho do portfólio, o qual está relacionado aos diferentes resultados obtidos ao avaliar portfólios. Ou seja, esse efeito pode fazer com que um portfólio com desempenho inferior e menos itens alocados do que a solução correta seja selecionado (DE ALMEIDA *et al.*, 2015; DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014).

Ressalta-se que esse efeito não ocorre sempre na análise multicritério para portfólio com agregação aditiva. Isto é, o viés relacionado ao tamanho do portfólio está sujeito a combinação de valores e restrições considerados pelo problema em análise (MARTINS *et al.*, 2016).

A respeito desse viés, alguns estudos anteriores, relacionados à análise de portfólio no contexto aditivo de MDCM/A para diferentes perspectivas, mostram que o efeito do tamanho do portfólio está relacionado a um problema típico de escala (escala intervalar) (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014; MARTINS *et al.*, 2016, 2017).

Por esse motivo, realizar uma transformação para uma escala de razão é a opção mais adequada para esse tipo de problema, pois evita que haja resultados enganosos (DE ALMEIDA; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2014).

Existe ainda estudos diretamente relacionadas à seleção de portfólio com base em métodos de sobreclassificação (considerando sua natureza não compensatória), os quais

ressaltam também a sensibilidade às transformações de escala (DE ALMEIDA; VETSCHERA, 2012; VETSCHERA; DE ALMEIDA, 2012). Esses estudos utilizam de abordagens baseadas nos conceitos de portfólios de fronteira e portfólios c-ótimos (quando o número de itens nos portfólios em consideração permaneça o mesmo) para superar o efeito do tamanho do portfólio.

### 2.3 Um enfoque multicritério da seleção de portfólio para GGN

Borgonovo e Plischke (2016) apontam que a criação de modelos especializados de apoio à decisão revela-se como uma forma de resolver muitos problemas gerenciais, como o caso do problema do portfólio.

Conforme já discutido, estudos baseados em uma abordagem orientada aos itens (relacionada ao uso da MCDM/A combinada com PL) foram desenvolvidos para facilitar o processo de seleção de portfólio. No entanto, quando se trata dessa abordagem ter sido aplicada em GGN, os estudos na literatura são escassos, percebendo-se que a maioria deles, quando ocorrem, analisam os itens que compõem o portfólio, como projetos, em diferentes cenários.

Por exemplo, em Lopes e de Almeida (2013), é proposto um modelo de decisão para selecionar um portfólio de projetos de exploração de petróleo e gás. Neste caso, o valor aditivo multiatributo baseado em um procedimento determinístico é construído para cada projeto (baseado na abordagem SMARTER – *Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings*). Além disso, um modelo de otimização de mochila é estruturado usando valores multiatributo e condições específicas na escolha de projetos para o portfólio.

Esses mesmos autores desenvolvem outro modelo de decisão multicritério para selecionar projetos de desenvolvimento de petróleo e gás (LOPES; DE ALMEIDA, 2015). No entanto, neste outro estudo, questões relacionadas à avaliação da incerteza e à consideração de múltiplos objetivos são abordadas dentro da estrutura axiomática do MAUT. O objetivo é encontrar o conjunto de projetos que maximiza a utilidade esperada do portfólio. A avaliação de sinergias entre projetos é particularizada neste caso. Além do mais, a etapa de otimização também é realizada de acordo com o problema da mochila.

Em Delouyi, Ghodsypour e Ashrafi (2021), uma abordagem híbrida envolvendo a abordagem de decisão MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) e programação inteira é usada para resolver um problema de seleção de portfólio de projetos GGN. O objetivo deste estudo é estabelecer uma estrutura integrada que incorpore alinhamento estratégico sustentável, interdependências dinâmicas de projetos e projetos em andamento para determinar o portfólio de projetos mais apropriado.

Sob outra perspectiva, Sacco *et al.* (2019) propõem um modelo para apoiar a seleção de planos de manutenção ótimos para reduzir a gravidade e a probabilidade de falhas no GGN. Nesse caso, uma abordagem que abrange a imprecisão nas declarações de preferência considera as sinergias entre os projetos e lida com informações incompletas dos parâmetros. Além disso, este estudo usa algoritmos de otimização para identificar portfólios de projetos não dominados.

Adicionalmente, com base nas pesquisas realizadas, percebe-se a baixa atenção quanto à estudos envolvendo o problema de seleção de portfólio baseado em riscos. Em Nowrouzi *et al.* (2019), é fornecido uma estrutura para otimizar o portfólio de exportação de gás natural com base no desenvolvimento do conceito de risco não sistemático. No trabalho proposto por Sacco *et al.* (2019) observa-se uma análise de decisão de portfólio para manutenção baseada em risco de redes de gás.

Portanto, desenvolver a seleção de portfólio para gasodutos evita as expectativas irreais de que toda iniciativa de gerenciamento de risco será realizada nas organizações. Em outras palavras, na prática, a gestão de portfólio funciona como um filtro, onde a condição de escolha não se restringe à iniciativa melhor avaliada, mas inclui também a mais relevante para a natureza do problema.

Diante da evidência quanto a carência de estudos voltados para a seleção de portfólio baseada em riscos, como desdobramento preliminar, observa-se oportunidades de desenvolvimento de pesquisas complementares. Neste contexto, como contribuição adicional deste trabalho, foi desenvolvido um modelo de decisão para selecionar um portfólio de ações de manutenção baseadas em risco em dutos de gás natural, sob considerações ambientais, financeiras e humanas (VIANA *et al.*, 2022b).

Esse estudo comprova que é possível fornecer um suporte adequado às recomendações feitas ao DM com relação a seleção de portfólio no contexto de GGN, considerando para isso a utilização da estimativa de riscos em múltiplas dimensões.

A diferença neste estudo complementar está na perspectiva tratada para modelagem dos riscos: o modelo multidimensional de classificação de riscos desenvolvido por Brito, de Almeida e Mota (2010) – o qual integra a teoria da utilidade e o método ELECTRE TRI, da família de métodos ELECTRE (do francês, *Élimination Et Choix Traduisant la Réalité*) – é adotado para avaliar e classificar alternativas (ações de manutenção).

### 2.3.1 Limitação na transformação de escala na abordagem multidimensional

Conforme exposto na subseção 2.2.1, revela-se fundamental dentro do contexto da problemática de portfólio, sob o aspecto multicritério, realizar as devidas alterações da escala (de intervalar para razão) para adequar a modelagem.

Entretanto, mesmo considerando a importância da transformação da escala e explorando oportunidades de pesquisa que empreguem a avaliação de riscos multidimensionais com relação a seleção de portfólio no contexto de GGN (conforme abordado na seção 2.3), foi possível apontar limitações/desafios nessa linha de pesquisa.

Um dos modelos que avalia os riscos das seções do gasoduto de gás natural (BRITO; DE ALMEIDA, 2009), conforme abordado na seção 2.1, utiliza como base o MAUT. Esse método apresenta um protocolo bem estruturado e consistente para decisões, que são orientados a maximizar a utilidade esperada para as consequências em consideração (KEENEY; RAIFFA, 1976). Dessa forma, o MAUT impõe requisitos específicos que não podem ser ignorados, incluindo o uso da escala intervalar para medir a utilidade.

Portanto, corrigir o viés na seleção de portfólio (conforme exposto na subseção 2.2.1) por meio da transformação para uma escala de razão é inviável se o MAUT for usado como uma abordagem multicritério. Para fundamentar melhor a compreensão sobre a inviabilidade da transformação de escala quando o MAUT é utilizado na problemática de portfólio, será apresentado algumas premissas desse método.

Primeiramente, deve-se compreender que o MAUT surgiu como derivação natural da Teoria da Utilidade, mantendo toda a estrutura axiomática, incorporando elementos necessários para resolver problemas com múltiplos atributos (DE ALMEIDA *et al.*, 2022; KEENEY; RAIFFA, 1976).

Nesse sentido, as atitudes de preferência do DM são exploradas através da especificação de uma função utilidade. Essencialmente, a aplicação do MAUT requer a obtenção de uma função utilidade multiatributo, a qual agrega a função utilidade unidimensional obtida inicialmente para cada atributo (KEENEY; RAIFFA, 1976), conforme representação genérica da equação 3.

$$u(c_1, c_2, \dots, c_j) = F[F_1(c_1), F_2(c_2), \dots, F_j(c_j)] \quad (3)$$

Onde  $F_j$  é uma função apenas do atributo  $c_j$ , e que possui geralmente uma forma simples, aditiva. Para a determinação dessa função, deve-se verificar e explorar algumas propriedades que podem existir entre as preferências do DM (KEENEY; RAIFFA, 1976).

A respeito disso, pode-se destacar duas premissas necessárias de independência para que seja possível aplicar o modelo aditivo: independência em utilidade e a independência aditiva entre os atributos (DE ALMEIDA *et al.*, 2022).

Considerando a ênfase na primeira condição fundamental da Teoria da Utilidade (a independência em utilidade), e simplificando a explicação para um caso de dois atributos: para que o atributo  $c_1$  seja independente em utilidade de  $c_2$ , todas as funções utilidade da forma  $u(-, c_2)$  devem ser estrategicamente equivalentes (KEENEY; RAIFFA, 1976). De forma análoga, pode-se observar essa mesma interpretação para o atributo  $c_2$  em termos de independência em utilidade para  $c_1$ .

Isso significa que todas as utilidades condicionais seriam transformações lineares positivas umas das outras, conforme apresentado na equação 4, a qual representa o caso em que  $c_1$  é independente em utilidade de  $c_2$ . Em outras palavras, quando  $c_1$  é independente em utilidade de  $c_2$ , a função de utilidade condicional sobre  $c_1$ , dado  $c_2$ , não depende estrategicamente do nível particular de  $c_2$ .

$$u(c_1, c_2) = \beta + \gamma(u(c_1, c'_2)); \text{ com } \beta \text{ e } \gamma > 0 \quad (4)$$

Diante disso, como a utilidade é medida em uma escala intervalar, esse tipo de transformação apresentada na equação 4 é a única forma admissível, pois ela mantém as propriedades da escala (em termos de cardinalidade) (DE ALMEIDA *et al.*, 2015). Além disso, este tipo de transformação não afetará as propriedades da Teoria da Utilidade (BRIGGS, 2019).

Por sua vez, considerando a segunda premissa (independência aditiva), segundo Keeney e Raiffa (1976), a função aditiva de utilidade implica que  $c_1$  e  $c_2$  devem ser mutuamente independentes em utilidade. Dessa forma, de acordo com o que foi elucidado anteriormente, percebe-se novamente, como requisito básico, a necessidade de uso de transformações lineares positivas para atender a comprovação das premissas e concepções da Teoria da Utilidade. Conforme Keeney e Raiffa (1976) ratificam,  $c_1$  é independente em utilidade de  $c_2$  (e vice-versa) se e somente se a equação 4 for satisfeita.

Contudo, deve-se ressaltar que mesmo considerando a mútua independência em utilidade, faz-se necessário a comprovação do conceito de independência aditiva. Em outras palavras, é preciso averiguar se a comparação de preferências emparelhadas de duas loterias, definida por duas distribuições de probabilidade conjunta em  $c_1 \times c_2$ , depende apenas de suas distribuições de probabilidade marginal (KEENEY; RAIFFA, 1976).

Em contrapartida, para a escala de razão, a qual possui o maior grau de informação, sua cardinalidade está na razão entre dois números. Desse modo, sem perda de generalidade, a

transformação permitida para que as propriedades dessa escala sejam mantidas é do tipo  $u(c_1, c_2) = \gamma(u(c_1, c_2'))$ , com  $\gamma > 0$ . Diante dessa configuração, não é possível comprovar a validade das premissas-chave da Teoria da Utilidade.

Assim, dentre as escalas de medição e suas propriedades, ratifica-se que a transformação linear positiva está vinculada ao uso da escala intervalar. Por isso, considera-se a escala intervalar a única alternativa para medir a utilidade e construir tal escala.

Portanto, diante desse contexto, percebe-se o obstáculo teórico para efetuar a transformação para a escala de razão quando o MAUT é empregado dentro da modelagem para a problemática de portfólio.

#### 2.4 Algoritmos de resolução para problemas de portfólio

Devido à natureza da escolha de combinações entre itens, considerando restrições e objetivos específicos, o problema de seleção de portfólio pode ser abordado utilizando técnicas e modelos envolvendo otimização matemática (SAIZ *et al.*, 2021).

Existem diferentes tipos de formas para solução de problemas de otimização, cada uma com suas próprias características e aplicabilidades. Neste contexto, duas classes principais são comumente utilizadas: métodos exatos e métodos heurísticos (LIESIÖ *et al.*, 2021).

Com relação ao primeiro grupo (os métodos exatos), tem-se que eles constituem algoritmos capazes de fornecer uma solução ótima, ou seja, uma solução viável que otimiza (minimiza ou maximiza) o valor da função objetivo do problema (MARTÍ; REINELT, 2011). Dentre esses métodos, pode-se listar aqueles relacionados com enumerações, programação inteira, entre outros.

Por exemplo, no estudo de Mancuso *et al.* (2017), foi proposto uma metodologia de apoio à decisão baseada em uma avaliação probabilística de riscos para identificar o portfólio ótimo de medidas de segurança que minimiza o risco residual de um sistema nuclear, enquanto leva em conta a viabilidade e as restrições orçamentárias. Neste estudo, os autores desenvolveram um algoritmo de enumeração computacionalmente eficiente para identificar quais combinações (portfólios) de medidas de segurança minimizam o risco de falha.

Já o trabalho de Song, Yang e Xia (2019) propôs uma abordagem para gerenciar efetivamente o problema de seleção e cronograma de portfólio de projetos multicritério. Para tanto, eles desenvolveram um algoritmo de *backtracking* para encontrar todos os portfólios satisfatórios, o qual é baseado em uma busca em profundidade.

Por sua vez, um algoritmo aprimorado baseado em pesquisa em largura foi utilizado no estudo de Gu *et al.* (2022). Esse algoritmo foi empregado no desenvolvimento de um modelo de previsão de risco baseado em rede, o qual serviu para investigar o caminho de propagação do risco potencial e reduzir o risco de falhas em cascata na operação de tráfego ferroviário.

Todavia, os métodos exatos podem ser computacionalmente intensivos para problemas de grande escala. Por esse motivo, o segundo grupo (heurísticas) tem se tornando popular para resolver problemas de portfólio (SAIZ *et al.*, 2021).

As heurísticas são algoritmos que alcançam sempre uma solução viável, utilizando um esforço computacional considerado razoável (GOLDBARG; GOLDBARG; LUNA, 2016). Porém, elas não garantem a obtenção da solução ótima. Essas técnicas são projetadas para explorar características específicas do problema e encontrar soluções aproximadas de boa qualidade (LIESIÖ *et al.*, 2021).

Para ilustrar, no trabalho de Dhaini e Mansour (2021) foi projetado e adaptado uma heurística para os problemas de otimização de portfólio irrestrito e restrito. No âmbito da aplicação clássica voltada para investimentos financeiros, o estudo de Puerto *et al.* (2022) propôs um procedimento heurístico para lidar com a otimização combinatória na filtragem de cenários que podem afetar o desempenho na seleção de portfólio.

Diante da discussão anterior, percebe-se uma parte da literatura se preocupa com os desafios da modelagem computacional na resolução de problemas de portfólio (LIESIÖ *et al.*, 2021). Todavia, esta tese busca estudar o problema de seleção de portfólio sob a perspectiva da teoria da decisão. Em outras palavras, a ênfase está na qualidade das informações quanto a geração dos portfólios, para expandir o suporte e modelagem do problema.

Dessa forma, pensado em projetar um algoritmo que explore adequadamente as características específicas do problema em questão, para obter bons resultados em relação ao suporte para modelar alternativas, recorreu-se a abordagem da enumeração implícita.

Ao contrário dos algoritmos de enumeração explícita, que geram todas as combinações possíveis, os de enumeração implícita exploram o espaço de busca de forma mais eficiente. Esses algoritmos se baseiam na ideia de que a estrutura do problema de seleção de portfólio pode ser aproveitada para reduzir o número de combinações avaliadas (TAHA, 2014).

A respeito do uso desse tipo de algoritmo de enumeração, pode-se ilustrar o trabalho de Liesiö (2014). Esse autor desenvolveu um estudo voltado para a análise de decisão de portfólio, no qual utilizou de um algoritmo de enumeração implícita para obter a maximização de funções valores não lineares em aplicações relacionadas com a seleção de um portfólio de projetos de conservação de áreas florestais.

Na pesquisa de Toppila e Salo (2017), foi utilizado também um algoritmo baseado na enumeração implícita para lidar com a alocação de recursos voltados para melhorias que mitiguem riscos em sistemas coerentes, nos quais probabilidades intervalares são empregadas para capturar incertezas epistêmicas. Além disso, um algoritmo de enumeração implícita foi utilizado para a otimização do portfólio de medidas de segurança para a prevenção de cenários de acidentes dependentes do tempo no trabalho de Mancuso et al. (2019).

Logo, com base nessa breve análise da literatura científica sobre seleção de portfólio e o uso de algoritmos, percebe-se que cada abordagem (seja dentro dos métodos exatos ou dos heurísticos) tem suas próprias características, vantagens e limitações, e a escolha depende de vários fatores relacionados com o problema-chave.

## 2.5 Síntese e posicionamento da tese

A base de toda investigação científica está em identificar algum contexto que ainda não foi pesquisado com rigor e explorá-lo. Diante disso, considerando que os gestores do sistema de transporte de gás natural precisam decidir onde investir recursos para manutenção da integridade e segurança dos dutos, foram identificadas duas lacunas principais que motivaram a proposição deste trabalho.

Primeiro, identificou-se uma lacuna de conhecimento nas pesquisas anteriores sobre a seleção de portfólio baseada em riscos. A teoria sobre o gerenciamento de riscos é bastante consolidada, no entanto, uma investigação em termos dos múltiplos aspectos para avaliação dos riscos e desenvolvimento da problemática de portfólio é necessária.

A investigação dessas questões é importante porque modelos anteriores já abraçaram a pesquisa contemporânea quanto a inclusão da multidimensionalidade da gestão de riscos em gasodutos em outros campos de pesquisa (MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017; VIANA *et al.*, 2021; WANG; WANG; DING, 2021; YOU *et al.*, 2014). Portanto, é relevante fornecer também uma base teórica mais forte para a problemática de portfólio quanto ao envolvimento desses múltiplos aspectos na avaliação de riscos.

Em outras palavras, a natureza do risco multidimensional deve ser explorada mais a fundo para contribuir na formulação de políticas mais eficientes de gerenciamento de riscos, quando se considera a seleção de portfólio dos trechos mais críticos de um gasoduto.

Em segundo lugar, com base na revisão integrativa da literatura, percebe-se uma lacuna metodológica. Foi descoberto que a oportunidade revelada na lacuna anterior, quanto ao uso da avaliação multidimensional dos riscos para a problemática de portfólio em gasodutos de gás natural pode acarretar em uma inconsistência.

Então, nesta tese procura-se estabelecer uma nova indagação sobre a pesquisa envolvendo a seleção de portfólio baseada em riscos. Mais especificamente, busca-se abordar a lacuna na formulação dos portfólios quando a escala intervalar (comumente utilizada na avaliação dos riscos sob essa perspectiva multidimensional) é a única forma de mensuração.

A teoria relacionada ao contexto multicritério tende a se concentrar principalmente na correção da inconsistência na formulação do portfólio mediante uma transformação de escala. Todavia, surgem novos paradigmas frutos de estudos envolvendo as abordagens MCDM/A que carecem de atenção. A exemplo dessa condição específica de utilização de uma abordagem MCDM/A que impõe o uso da escala intervalar, a qual comprovadamente pode afetar a formulação de portfólios. Diante dessa perspectiva, até o momento, as opções de abordagens para a seleção de portfólio para GGN não foram definidas de maneira consistente e holística.

Então, este trabalho pretende mostrar como que a organização responsável pelo transporte de gás natural pode, de uma forma mais estratégica, melhorar a tomada de decisão e adquirir o suporte subjacente necessário para gerir eficazmente os riscos em um gasoduto, preservando todas as premissas obrigatórias das normas e resoluções vigentes. Em outras palavras, almeja-se explorar a contribuição para a gestão consolidada de riscos que a modelagem multidimensional pode oferecer em conjunto a otimização combinatória dos trechos mais críticos do GGN, superando com isso as principais limitações impostas a esse contexto de aplicação.

Portanto, com base nos estudos realizados, revela-se promissor a busca de novas abordagens e técnicas para aprimorar a resolução de problemas de portfólio, considerando fatores relevantes ao mesmo tempo em que apoia a tomada de decisão.

Nesse contexto, as técnicas de enumeração implícita se destacam como uma alternativa potencial para lidar com a complexidade desses problemas. Elas permitem a identificação de soluções ótimas mantendo a precisão e a eficiência. Além disso, oferecem uma compreensão mais profunda da formulação dos portfólios, e com isso dos trechos críticos associados ao gasoduto, permitindo uma tomada de decisão mais informada e uma alocação de recursos mais eficaz.

### 3 MODELO DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO EM GGN

Este capítulo apresenta um modelo multicritério para seleção de portfólio voltado para o apoio no gerenciamento de riscos em sistemas de gasodutos de transporte de gás natural, baseado na integração de uma avaliação de risco multidimensional e uma abordagem combinatória (enumeração implícita) (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022).

#### 3.1 A estrutura do modelo proposto

Dada a inviabilidade de usar a abordagem MCDM/A para avaliação dos riscos com Programação Linear (PL), devido à modelagem do problema (ou seja, a impossibilidade de ajustar a escala), é necessária uma estratégia diferente para lidar com o problema de seleção de portfólio apresentado.

A respeito disso, como as variáveis assumem valores discretos (0/1) quando o problema da mochila é formulado, elas podem então ser listadas. Embora enumerar todas as soluções viáveis possíveis ( $2^n$ ) se torne impraticável à medida que o número de variáveis aumenta.

Portanto, a escolha de uma estratégia de enumeração implícita é essencial para reduzir o esforço do processo de resolução e fornecer informações relevantes sobre o comportamento do conjunto de soluções.

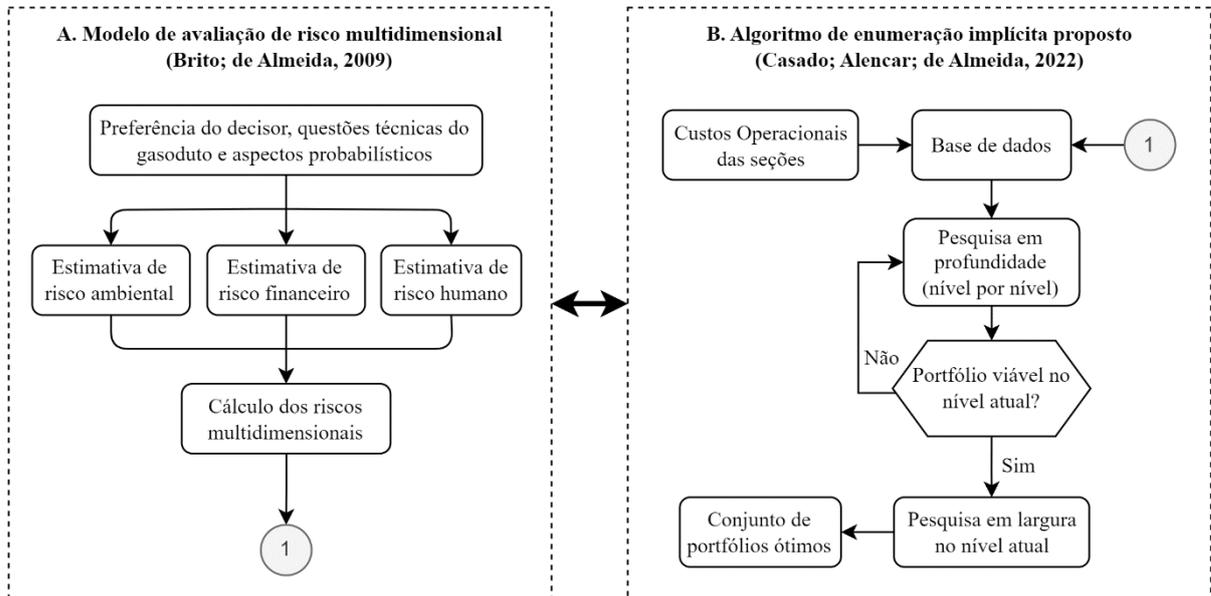
Em outras palavras, a utilização de uma abordagem de enumeração implícita em vez de outras abordagens, como por exemplo as heurísticas, baseia-se em entender melhor a estrutura do espaço de busca e as características das soluções possíveis. Isso pode levar a insights importantes sobre o problema, mesmo que nem todas as soluções sejam necessárias ou viáveis. Além disso, essa estratégia evita a necessidade de resoluções sequenciadas de problemas de PL.

Assim, a estrutura combinatória do problema e as diferentes estratégias de particionamento do conjunto de soluções são investigadas, tendo como base a lógica do processo de enumeração. A partir daí, um algoritmo foi desenvolvido usando uma variante híbrida, que mescla os conceitos de busca em profundidade e busca em largura – comumente usados na Teoria dos Grafos (CORMEN *et al.*, 2009) – fornecendo restrições e codificando as soluções em partes.

O processo de resolução é baseado em um mecanismo para explorar uma árvore de busca por soluções potenciais. Portanto, a enumeração implícita permite que soluções inviáveis sejam excluídas usando certas condições (filtros e restrição) e então apenas parte da combinação de variáveis precisa ser verificada para obter a recomendação ideal para o problema. Na Figura 2, é apresentada uma estrutura geral para implementação do modelo proposto para seleção de

portfólio baseado na enumeração implícita (PSIE – *Portfolio Selection based on Implicit Enumeration*).

Figura 2 – Estrutura do modelo proposto



Fonte: O Autor (2023).

A parte “A” apresentada na Figura 2 representa o modelo multidimensional, que será discutido em maiores detalhes na seção 3.2. O algoritmo de enumeração implícita proposto (parte “B”) utiliza os riscos multidimensionais e os dados de custo (operacional) para cada seção. O algoritmo usa lógica de busca em profundidade, em princípio, para encontrar uma combinação viável de seções; e então, uma busca em amplitude (largura) é iniciada, no nível atual, para obter todas as soluções viáveis que tenham melhores desempenhos. Assim, a busca proposta não analisa todo o espaço de soluções, mas as melhores combinações possíveis para um determinado número de seções.

Cabe ressaltar que este estudo se aplica para mitigação estratégica de riscos em redes de dutos de gás natural existentes. Portanto, a segurança e a integridade dos dutos são cruciais para um futuro sustentável e um desenvolvimento responsável. Assim, com base em todos os requisitos e regulamentos utilizados para o transporte de gás natural, o contexto de operação e manutenção é considerado um fator chave no processo de seleção do portfólio devido à importância de preservar a segurança e confiabilidade do sistema.

### 3.2 Modelo de avaliação de risco multidimensional

O modelo considerado neste estudo para determinar os valores de risco de cada seção foi desenvolvido por Brito e de Almeida (2009). Baseia-se em uma abordagem de decisão

multicritério, na qual aborda aspectos de Teoria da Decisão e Teoria da Utilidade para avaliação de riscos de trechos de Gasodutos de Gás Natural (GGN).

Esse modelo multidimensional de avaliação de risco já está estabelecido e consolidado na literatura para o contexto de GGN (BRITO; DE ALMEIDA, 2009; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017). O mesmo também tem sido expandido para utilização em outros tipos de problemática (BRITO; DE ALMEIDA; MOTA, 2010; VIANA *et al.*, 2021), bem como para outros campos de atuação, a exemplo de dutos de hidrogênio (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010; CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2023b; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016; VIANA *et al.*, 2022a).

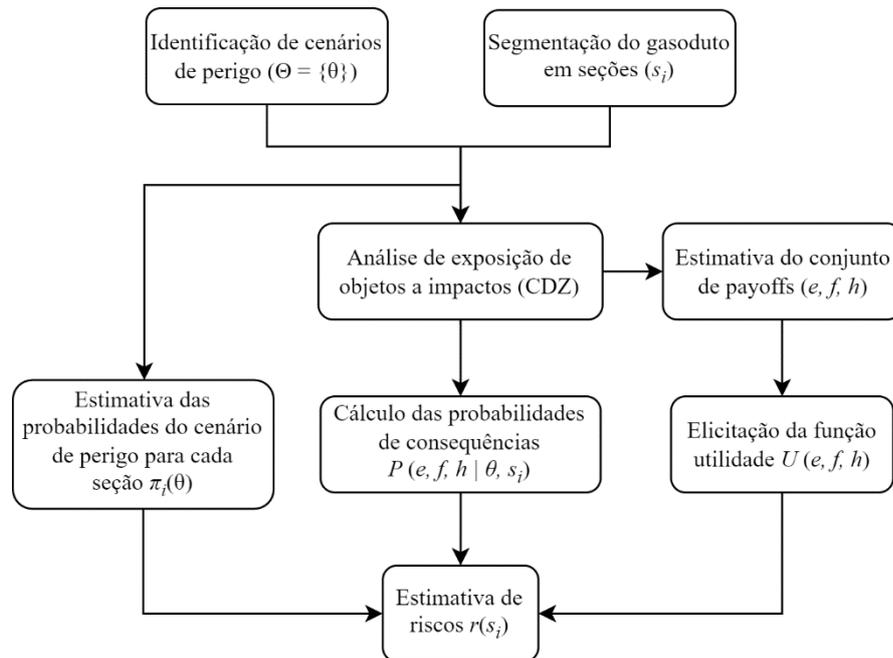
O modelo avalia os impactos que um acidente em um trecho do duto pode causar em três dimensões principais: a ambiental (*e*), a financeira (*f*) e a humana (*h*). Em resumo, baseado nos conceitos da Teoria da Decisão (BERGER, 1985), o modelo agrega várias dimensões de consequências para fornecer medidas de risco multidimensionais. Além disso, utilizando os conceitos da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) (KEENEY; RAIFFA, 1976), incorpora quantitativamente as preferências e o comportamento do DM em casos de incerteza quanto às medidas de risco.

A Teoria da Utilidade é aplicada no processo de avaliação intracritério para avaliar o risco humano, ambiental ou financeiro de cada seção. Ressalta-se que a tradicional representação do risco como produto de probabilidades por valores de consequências não reflete as preferências e a atitude do DM em relação ao risco. Essa abordagem multiatributo usa funções de utilidade sobre consequências ao invés das próprias consequências para permitir a incorporação desses fatores (DE ALMEIDA *et al.*, 2015; KEENEY; RAIFFA, 1976).

Assim, combinando as distribuições de probabilidade das consequências, a função de utilidade em cada dimensão de risco e as probabilidades dos possíveis estados da natureza, estimam-se as perdas esperadas (riscos) para cada seção em cada atributo. As principais etapas do modelo de avaliação de risco podem ser vistas na Figura 3.

Além disso, devemos destacar que, apesar da pluralidade de significados atribuídos às definições e abordagens de risco na literatura, esse modelo adota o conceito de risco formal, sendo matematicamente definido pela Teoria da Decisão. Este conceito trata de uma função correspondente ao valor esperado da perda ao seguir um curso de ação, e a natureza assumir um estado específico (BERGER, 1985).

Figura 3 – Etapas do modelo de avaliação de risco multidimensional



Fonte: Adaptado de Brito e de Almeida (2009).

No modelo, o gasoduto é dividido em um conjunto de seções independentes. A respeito disso, Jo e Ahn (2005) esclarecem que, as taxas de falha do gasoduto (e, portanto, os riscos de acidentes) variam dependendo de vários aspectos ao longo do percurso do duto, como por exemplo o diâmetro, a pressão de operação, o comprimento do gasoduto até a estação de compressão, entre outros.

Além desses aspectos, há também fatores heterogêneos na área adjacente à tubulação, associados à densidade populacional, área de instalação e vegetação. Assim, Jo e Ahn (2005) pontuam que, para avaliação de risco em dutos, é benéfico que eles sejam divididos em trechos (seções), pois como as condições variam ao longo da rota do gasoduto, cada trecho terá diferentes distribuições de probabilidade nos cenários acidentais e nas dimensões de consequências.

Nesse sentido, um novo trecho de duto deve ser individualizado a cada mudança em um dos fatores relacionados, ou seja, quando novas circunstâncias operacionais, estruturais ou ambientais são configuradas. Assim, esse conjunto discreto de seções possuirá como base características homogêneas, permitindo uma gestão operacional adequada em função da possibilidade do desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação de riscos.

Vale ressaltar que a segmentação de áreas é um procedimento padrão na modelagem de risco e pode ser vista em diferentes estudos como Amaya-Gómez, Sánchez-Silva e Muñoz (2019), Bonvicini *et al.* (2015) e Rezazadeh *et al.* (2019).

Além disso, neste modelo de avaliação de riscos são levantados cenários de perigo ( $\Theta = \{\theta\}$ ) decorrentes de vazamentos acidentais durante a operação da tubulação, considerando-se dois modos de falha: furo e ruptura do duto. O cenário de normalidade ( $\theta_N$ ) também é considerado, representando a situação em que o duto opera sem que haja vazamentos de qualquer natureza (BRITO; DE ALMEIDA, 2009).

Os cenários de perigo definem os fenômenos ou acidentes associados ao vazamento acidental de gás natural (SKLAVOUNOS; RIGAS, 2006). Esses acidentes são influenciados por uma combinação de fatores, como modo de falha, ignição imediata ou retardada e existência de espaços confinados (BRITO; DE ALMEIDA, 2009).

Em seguida, é realizada uma análise da exposição dos objetos aos impactos decorrentes da ocorrência de cada cenário de acidente e trecho da tubulação. Em outras palavras, estabelece-se uma região onde os impactos ultrapassam os limites críticos, causando danos às pessoas, à propriedade e ao meio ambiente (DZIUBIŃSKI *et al.*, 2006). Para tanto, utiliza-se o cálculo da Zona Crítica de Perigo (CDZ – *Critical Danger Zone*) proposto por Jo e Ahn (2002) para definir o alcance das consequências analisadas.

Além disso, estima-se a probabilidade de ocorrência de cenários acidentais ( $\pi_i(\theta)$ ) e de normalidade ( $\pi_i(\theta_N)$ ) para cada trecho. Para a estimativa dessas probabilidades associadas a cada cenário possível, foram adotados como referências os valores encontrados no último relatório publicado do EGIG (2020) e publicações na área (DZIUBIŃSKI; FRĄTCZAK; MARKOWSKI, 2006; SKLAVOUNOS; RIGAS, 2006; YUHUA; DATAO, 2005).

Para cada trecho, é feita uma estimativa das consequências relacionadas as três dimensões de impacto (ambiental, financeiro e humano) que eventuais acidentes em gasodutos podem causar. O primeiro grupo de consequências é avaliado medindo a extensão (em metros quadrados) da vegetação afetada. O segundo conjunto (financeiro) é definido como as estimativas monetárias decorrentes de perdas assumidas (por exemplo, multas contratuais, perda de fornecimento por interrupção, ressarcimentos a pessoas e gastos com reparação do meio ambiente).

Por fim, para a dimensão humana ( $h$ ), a estimativa do número de pessoas com alguma lesão física (como queimaduras de primeiro ou segundo grau) devido a um cenário acidental, e não necessariamente mortas, é considerada de forma conservadora. Assim, esta abordagem analisa a previsão de que as pessoas na zona de perigo (raio de impacto em torno de um ponto de falha) associadas a um trecho do gasoduto onde ocorreu o acidente serão afetadas pela radiação térmica emitida naquele cenário acidental.

Deve-se ressaltar que a radiação térmica se deve ao vazamento de gás natural aquecido ou após a ignição. Nesse sentido, é assumido um fluxo de calor constante em toda a zona de perigo associada à seção onde ocorreu um acidente no duto.

Após isso, funções utilidade no conjunto de consequências são elicitadas. Nesse ponto, as preferências do DM são incorporadas ao risco de perdas decorrentes de acidentes no duto. Nesse contexto, o valor mínimo de perda é igual a zero (melhor resultado), e o valor máximo é estimado dentro do CDZ.

Comparativamente, com a situação encontrada nos problemas de manutenção (DE ALMEIDA; FERREIRA; CAVALCANTE, 2015), assume-se neste caso que a função utilidade  $u(e, f, h)$  é aditiva (veja equação 5). Conseqüentemente, fica implícito que a estrutura de preferência do DM está de acordo com as condições de independência exigidas pelos axiomas da Teoria da Utilidade.

$$u(e, f, h) = k_e u(e) + k_f u(f) + k_h u(h) \quad (5)$$

A respeito da equação 5,  $u(e)$ ,  $u(f)$  e  $u(h)$  são utilidades unidimensionais para as dimensões de risco (ambiental, financeiro e humano), e os  $k$ 's são constantes de escala estimadas a partir de um procedimento de elicitación baseado na comparação de loterias, onde  $k_e + k_f + k_h = 1$ .

Em seguida, estima-se uma distribuição de probabilidade ( $P(e, f, h | \theta, s_i)$ ) sobre os valores possíveis dos três conjuntos de consequências para cada par de seção de duto e cenário. Algumas premissas simplificadoras são adotadas para o cálculo do  $P(e, f, h | \theta, s_i)$ : assume-se que as consequências ocorrem de forma aleatória, independente e sem correlação significativa. Assim, as probabilidades podem então ser representadas pelas respectivas Funções Densidade de Probabilidade (PDF – *Probability Density Function*) para as dimensões ambiental, financeira e humana.

De acordo com a Teoria da Decisão, o risco multidimensional de um trecho pode ser definido como o valor da perda esperada (BERGER, 1985). Então, ele é calculado multiplicando as probabilidades do cenário de acidente com a PDF  $F(e, f, h | \theta, s_i)$  e a função de utilidade multiatributo  $u(e, f, h)$ . Por fim, adiciona-se a probabilidade do cenário de normalidade operacional ( $\theta_N$ ) (ver equação 6). Como a perda relacionada ao cenário de normalidade, nas três dimensões de consequências, é nula, o valor (-1) é multiplicado por  $\pi_i(\theta_N)$ .

$$r_{s_i} = \sum_{\theta \in \Theta} \pi_i(\theta) \cdot \left\{ \int_e \int_f \int_h F(e, f, h | \theta, s_i) \cdot u(e, f, h) \cdot de \, df \, dh \right\} + (-1)\pi_i(\theta_N) \quad (6)$$

Algumas hipóteses e premissas são consideradas no modelo de avaliação de risco multidimensional (BRITO; DE ALMEIDA, 2009):

- Não serão considerados acidentes com vazamentos em estações de medição e compressão, que, diferentemente das tubulações, correspondem a sistemas próprios complexos, com dinâmica diferenciada;
- Será assumido que os eventos dos cenários acidentais associados a vazamentos de dutos são mutuamente exclusivos em relação aos eventos do mesmo nível;
- As taxas de falhas associadas às tubulações são consideradas constantes;
- Será considerado que a ocorrência de um cenário acidental em um trecho de gasoduto não influenciará a ocorrência do mesmo ou de outro cenário em algum outro trecho.

Embora a formulação dessas hipóteses limite a complexidade dos fenômenos do mundo real, elas são admissíveis e fornecem estimativas apropriadas para o contexto de decisão.

A decisão obtida entre portfólios é orientada pelo valor agregado do risco multidimensional, que corresponde à soma dos riscos das seções que compõem o portfólio. Ressalta-se que a noção de agregação de risco aqui utilizada se refere ao conceito de caracterização de risco agregado (BJØRNSSEN; AVEN, 2019), ou seja, considera a combinação de vários riscos em um só para que esta possa ser uma medida mais abrangente.

Além disso, considerando que o risco corresponde a valores de perda esperados, o que representa um valor negativo da função utilidade (BERGER, 1985; KEENEY; RAIFFA, 1976), assume-se que os riscos multidimensionais dos trechos estarão em uma escala de  $-1 \leq r_{s_i} \leq 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Isso significa que quanto mais insegura a seção da tubulação, mais próximo o valor do risco multidimensional está de 0.

Adicionalmente, considerando a formulação da programação matemática, a direção para a otimização deve ser interpretada segundo a maximização do problema (encontrar o maior risco agregado). Assim, retomando a equação 1 (seção 2.2), o valor da seção ( $v(s_i)$ ) na função objetivo é representado pelo valor de  $r_{s_i}$ .

### 3.3 Descrição do algoritmo de enumeração implícita

O algoritmo está relacionado a uma árvore de busca composta por elementos (nós) representando os diferentes portfólios (viáveis ou não). O elemento central da árvore (nó raiz)

é formado pela combinação de todas as seções ( $p_{raiz} \equiv S$ ), o que significa que a busca parte de uma solução inviável em relação a restrição orçamentária do problema.

De forma complementar, os nós descendentes da raiz são gerados de uma só vez em ordem decrescente (em função dos custos) para cada nível de busca. No entanto, o número de nós explorados é limitado, pois alguns são excluídos sem serem examinados explicitamente. Além disso, considerando a árvore de busca, vale esclarecer que o nível está associado ao número de seções retiradas do portfólio. Em outras palavras, em cada nível obtêm-se portfólios (viáveis ou não) que possuem o mesmo número de itens alocados.

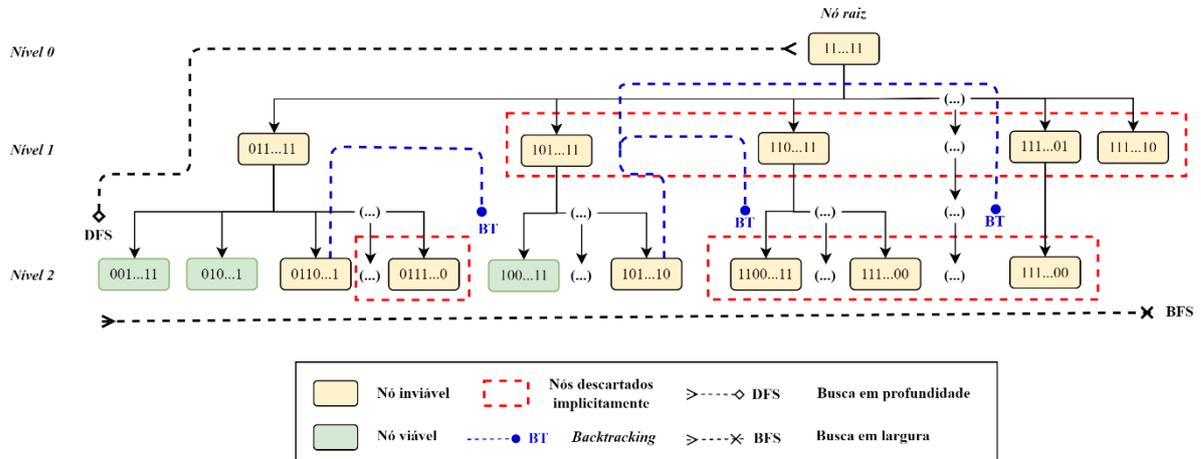
A estratégia de exploração começa na raiz com uma busca em profundidade. A árvore é sistematicamente percorrida (de cima para baixo), explorando e examinando os primeiros nós (descendentes primários) de cada nível na ordem em que são descobertos. Quando a condição local (viabilidade da restrição) determina que existem soluções remanescentes necessariamente viáveis no nível atual, interrompe-se a exploração da árvore. Isso significa que gradativamente, a cada nível pesquisado, o número de seções retiradas do portfólio aumenta, implicando na geração de nós primários, que são avaliados até que uma solução inicial seja obtida.

No nível em que o primeiro nó viável (portfólio) for encontrado, é iniciada uma busca em largura (sistematicamente da esquerda para a direita) dos outros nós inexplorados, verificando-se o potencial de ser uma solução viável. Quando a restrição é violada (condição local), um mecanismo adaptado ao *backtracking* (refinamento com base em retrocessos e saltos na árvore de busca), reduz o espaço de busca e aumenta a eficiência do processo.

Esse mecanismo move a busca um nível acima de cada vez até atingir a raiz ou encontrar um nó viável. Ele se move para a ramificação adjacente anterior para analisar se ainda existem nós descendentes viáveis no nível atual. Então, quando um novo nó viável é encontrado, os nós intermediários são considerados implicitamente enumerados e descartados (as soluções são necessariamente inviáveis).

A busca em largura continua até que a exploração completa do nível atual da árvore seja alcançada. Todos os outros nós de níveis anteriores ao atual durante a busca em profundidade também são considerados rejeitados. Ao final desse processo o algoritmo entrega explicitamente um conjunto completo de soluções ótimas, se houver, ou exclusivamente o portfólio com maior relevância ( $p = \{p_a | a = 1, \dots, A; A \geq 1\}$ ). A Figura 4 apresenta um breve esquema do algoritmo proposto, e o Apêndice A sistematiza o pseudocódigo desse algoritmo.

Figura 4 – Representação da busca pela enumeração implícita



Fonte: O Autor (2023).

### 3.3.1 Notações e definições

Sem perda de generalidade, pode-se definir  $X^t = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$  como o vetor de variáveis binárias no nível  $t$ , que representa um portfólio  $p_a$  do problema (um subconjunto de seções,  $p_a \subset S$ ). Podemos ainda representar esse contexto pelo conjunto de seções alocadas no portfólio no nível  $t$ ,  $Y_t = \{i \mid x_i = 1\}$ . Assim, por exemplo, uma solução para a formulação do problema (M) no nível 2 (veja a Figura 4; equações 1 e 2, no capítulo 2), considerando um conjunto composto por 12 seções candidatas ( $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{12}\}$ ), poderia ser representado por  $X^2 = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$ , ou mesmo,  $Y_2 = \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ .

Além disso,  $O^t = \{p_a \mid a = 1, \dots, A; A \geq 1\}$  representa o conjunto ordenado (em relação aos riscos multidimensionais agregados) de todos os portfólios ótimos no nível  $t$ , onde  $O^t \subset V$ , e  $V$  é o conjunto de todos os portfólios viáveis. Assim, a representação de cada nó corresponde à atribuição de valores (0 ou 1) às variáveis do vetor  $X^t$ . E a raiz é formada por um portfólio inviável contendo todas as seções candidatas,  $X^0 = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$ .

Vale ressaltar que no modelo, uma restrição financeira determina a viabilidade de seleção das seções, principalmente considerando que o projeto de um gasoduto é de capital intensivo. Assim, as estimativas dos Custos Operacionais (OPEX – *Operating Expense*) dos trechos são utilizadas neste estudo. A divisão dos componentes desse custo (por exemplo, custos de manutenção, reparo e pessoal) representa uma parte dos custos totais incorridos ao longo da vida de um projeto de duto (MOLNAR, 2022).

O cálculo do OPEX não pode ser simplesmente considerado como diretamente proporcional à extensão física do trecho do gasoduto. Existem outros elementos cruciais que devem ser levados em conta na análise e estimativa dos custos envolvidos. Por exemplo, um

sistema de tubulação em um ambiente desafiador naturalmente terá custos mais altos de manutenção e reparo, dadas as características técnicas e a condição geral do sistema.

Portanto, é evidente que o cálculo do OPEX em um gasoduto é uma tarefa multifacetada. Assim, esse custo é essencial para a integridade operacional do duto. Dessa forma, as variáveis são ordenadas decrescendo o OPEX para cada seção (representado por  $b_i$  na equação 2, seção 2.2).

Em resumo, a seguir são apresentados algumas notações e proposições postuladas sobre a abordagem do algoritmo proposto para criar uma base sólida, além de permitir o aprendizado contínuo e o desenvolvimento progressivo da abordagem.

**Definição 1.** Um vetor solução  $X^q$  de (M) é descendente de um vetor  $X^t$  se  $Y_q \subset Y_t$ , dado que  $t$  é o nível superior e  $q$  o nível inferior da árvore de busca.

**Proposição 1.** Se  $X^t$  é um vetor solução de (M) no nível  $t$ , então  $|\sum_{i \in Y_t}(r_{s_i})x_i| \geq |\sum_{i \in Y_q}(r_{s_i})x_i|$  para todos os vetores solução  $X^q$  descendentes de  $X^t$ , dado que  $q > t$ .

**Prova.** Lembre-se que  $|r_{s_i}| \geq 0, \forall i = (1, 2, \dots, n)$  e  $Y_q \subset Y_t$ . Suponha que estamos no nível  $t$ , e  $\bar{z}$  é a melhor solução viável de (M) encontrada até o momento, ou seja, existe um vetor  $X^t$  tal que  $\bar{z} = |\sum_{i \in Y_t}(r_{s_i})x_i|$  e que  $X^t$  satisfaz a restrição (equação 2, seção 2.2). Da solução  $X^t$  queremos obter  $X^q$  (um descendente) tal que  $Y_q = Y_t \cup \{\lambda\}$ , onde  $\lambda$  é o índice da variável que assumirá o valor zero (descida de nível na árvore de busca). Como  $|\sum_{i \in Y_t}(r_{s_i})x_i| - |r_{s_\lambda}| \leq \bar{z} \quad \forall \lambda \in Y_t$ , isso significa que todas as soluções  $X^q$  descendente de  $X^t$  fornecerão valores para a função objetivo que são sempre menores ou iguais a  $\bar{z}$ .

**Definição 2.** Qualquer solução viável ( $Y_t = \{i \mid x_i = 1\}$ ) que não inclua mais seções sem violar a restrição imposta é chamada de vetor de solução de fronteira: Se  $\nexists x_i, \forall i \notin Y_t$ , tal que  $Y_t \cup \{i\}$  satisfaça a restrição (equação 2, seção 2.2), então  $Y_t$  é uma solução de fronteira.

**Proposição 2.** Se  $t$  é o primeiro nível da árvore a obter um vetor de solução viável  $X^t = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$  de (M), então o conjunto de portfólios nesse nível ( $O^t$ ) é chamado de portfólios de fronteira.

**Prova.** Gradualmente, à medida que a pesquisa se afasta da raiz ( $X^0 = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$ ), em cada nível, o número de seções retiradas do portfólio aumenta. Portanto, dado que a primeira solução viável é obtida em um nível  $t$  ( $X^t = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$ ), o que pode ser demonstrado é a impossibilidade de adicionar uma seção ao portfólio sem a restrição de recursos (equação 2, seção 2.2) ser violada. Assim a combinação máxima de seções ( $n - t$ ) para obter soluções de fronteira em (M) é obtida.

**Proposição 3.** Dado que a primeira solução viável foi obtida no nível  $t$  da árvore, então todos os vetores de níveis anteriores  $(t - 1, t - 2, \dots, 1)$  são implicitamente desconsiderados por violar a restrição orçamentária, ou seja, não são diretamente avaliados.

**Prova.** Como já mencionado, antes de iniciar o processo de busca na árvore, as seções são devidamente ranqueadas em ordem decrescente de OPEX na raiz ( $X^0 = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)$ ); assim,  $b_1 > b_2 > \dots > b_n$ . Portanto, o custo dos portfólios obtidos inicialmente durante a busca em profundidade (descendentes primários) é maior do que os portfólios adjacentes do mesmo nível. Assim, se as combinações primárias violam a restrição orçamentária, pode-se afirmar que outras combinações adjacentes em cada nível também violarão a restrição. Portanto, é desnecessário verificar seus valores explicitamente.

### 3.4 Aplicação numérica

Esta seção desenvolve uma aplicação numérica para validar o modelo proposto e avaliar sua eficácia na geração dos portfólios frente ao uso da escala intervalar. Primeiramente, são descritos os dados utilizados e apresentada a organização das análises. Em seguida, são discutidos os principais resultados da pesquisa no âmbito da modelagem.

#### 3.4.1 Descrição dos dados e organização da análise

Os dados do artigo de Brito e de Almeida (2009) forneceram um ponto de partida para estabelecer diferentes valores de parâmetros relacionados ao GGN, como diâmetro da seção da tubulação, valor de pressão constante e comprimento da tubulação até a estação de compressão; e aspectos relacionados à estrutura de preferências, necessários para representar um contexto realista.

O GGN simulado neste trabalho tem um comprimento total de 34.200 metros e foi dividido em 12 seções considerando as variações das condições ao longo do trajeto da tubulação (conforme explicado na seção 3.2). Assim, a individualização dos trechos de dutos foi baseada em características homogêneas e independentes (operacionais, estruturais, ambientais, entre outras).

Vale ressaltar que o objeto em estudo possui uma escala de abrangência simplificada, apenas para validação do modelo proposto. No entanto, o uso do modelo pode ser estendido para outras redes de gasodutos (com individualizações superiores a 12 seções).

Considera-se que o diâmetro do GGN é o mesmo para toda a extensão da tubulação, ou seja, diâmetro nominal de 0,2032 metros. Além disso, o GGN tem um valor de pressão constante de  $3,432 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> na estação de compressão a montante. Adicionalmente, este

estudo envolve um GGN que pode abranger no entorno de seu trajeto diferentes áreas, como industriais, comerciais, residenciais e ambientais.

O DM é um indivíduo que representa a organização responsável pelo transporte de gás natural em uma região hipotética, ou seja, corresponde a um gerente ligado ao gerenciamento da segurança e operação dos gasodutos. Ressalta-se que todas as etapas do modelo de avaliação de risco (BRITO; DE ALMEIDA, 2009) devem ser cuidadosamente analisadas para lidar com um problema real, devendo ser observada a estrutura do processo e as condições necessárias para sua aplicação. Isso também significa que o DM deve ter a mesma racionalidade proposta pela estrutura axiomática da teoria que sustenta o modelo para evitar erros na modelagem e conseqüentemente na recomendação final.

No decorrer da aplicação numérica para a construção de portfólios, também serão feitas comparações entre o modelo proposto (PSIE) e a abordagem MCDM/A com PL clássica, sem transformação de escala, aqui denominada programação 0-1 KP.

Essas comparações buscam demonstrar a eficácia do modelo proposto em aplicar uma avaliação de risco multidimensional e superar o problema de escala de modelos aditivos em seleção de portfólio, mesmo quando a escala intervalar é mantida. Além disso, destaca-se a discussão sobre a recomendação mais significativa (quanto aos riscos) que o modelo proposto obtém em relação à programação 0-1 KP (sem transformação de escala).

Nesse sentido, uma questão crítica a ser considerada diz respeito às soluções obtidas com a modelagem. Todo problema de PL (incluindo obviamente a programação 0-1 KP) busca obter uma solução ótima para uma situação. Em contrapartida, o modelo PSIE neste estudo se beneficia da avaliação estratégica e sistemática de combinações de seções para estabelecer uma solução ou conjunto de portfólios.

No entanto, para realizar comparações e confirmar as vantagens do modelo proposto, o portfólio de referência escolhido é o que apresenta maior contribuição de riscos multidimensionais agregados quando se obtém um conjunto de soluções viáveis.

Portanto, em relação à aplicação, com base no GGN hipotético e considerando todas as diretrizes do modelo de avaliação de risco (BRITO; DE ALMEIDA, 2009), a Tabela 1 resume uma parte dos principais dados utilizados, incluindo, os riscos multidimensionais para as seções do duto e as probabilidades dos cenários acidentais.

Complementando outras informações sobre os dados utilizados, a Tabela 1 apresenta o comprimento dos trechos do gasoduto (em metros) e a distância máxima de perigo (CDZ, em metros). Adota-se um fluxo de calor máximo de  $15 \text{ kW/m}^2$ , para o qual a exposição de até 30

segundos tem aproximadamente 1% de probabilidade de causar uma fatalidade (JO; AHN, 2002).

Por questões de confidencialidade, a Tabela 1 também apresenta os valores estimados dos custos OPEX (a restrição considerada neste problema). Para tanto, levou-se em consideração a estimativa de US\$ 3.700,00/ano por km de extensão, com base em um contexto particular de relatórios anuais de uma empresa de transporte de gás natural no Brasil. Ficou decidido que a restrição orçamentária seria fixada em 65% do OPEX total do GGN, considerando o ajuste de recursos que são liberados para realizar atividades no GGN e despesas operacionais, pois também afetam o orçamento disponível.

Tabela 1 – Resumo dos dados numéricos da aplicação

Seção	$\pi_i(\theta)$	$\pi_i(\theta_N)$	Risco ( $r_{S_i}$ )	OPEX (US\$)	Comprimento (m)	CDZ (m)
$s_1$	0,001259	0,998741	-0,9995038	3.885,00	1050	67,96
$s_2$	0,001321	0,998679	-0,9992151	8.325,00	2250	51,01
$s_3$	0,001281	0,998719	-0,9988736	5.180,00	1400	48,05
$s_4$	0,001315	0,998685	-0,9990233	6.660,00	1800	46,71
$s_5$	0,001280	0,998720	-0,9994763	15.540,00	4200	43,15
$s_6$	0,011303	0,988697	-0,9986456	16.280,00	4400	41,20
$s_7$	0,012233	0,987767	-0,9981268	5.550,00	1500	38,76
$s_8$	0,010202	0,989798	-0,9988323	19.425,00	5250	37,89
$s_9$	0,011246	0,988754	-0,9995635	12.025,00	3250	36,82
$s_{10}$	0,001244	0,998756	-0,9991930	11.100,00	3000	35,04
$s_{11}$	0,013438	0,986562	-0,9982816	12.580,00	3400	34,66
$s_{12}$	0,010244	0,989756	-0,9988084	9.990,00	2700	34,19

Fonte: O Autor (2023).

Ressalta-se que todas as normas técnicas e resoluções para lidar com o gerenciamento de riscos em GGN foram preservados, ou seja, considerou-se que atividades obrigatórias de controle e mitigação já foram realizadas no sistema.

Além disso, mesmo avaliando a proximidade dos valores dos riscos entre si, levando em consideração a perspectiva de ocorrência de eventos acidentais raros, essas diferenças tornam-se significativas em virtude dos danos catastróficos que podem surgir. Em outras palavras, é importante observar que as probabilidades de cenários acidentais não são nulas, ou seja, elas podem acontecer.

### 3.4.2 Resultados e discussão

Em primeiro lugar, considerando todos os 4096 portfólios (viáveis ou não) que podem ser obtidos com base nos dados de entrada ( $n = 12$ ;  $2^n = 4096$ ), o modelo proposto apenas precisou analisar 298 portfólios distintos conforme as Proposições 2 e 3 (ver subseção 3.3.1).

Desses portfólios distintos, dez são soluções de fronteira (conjunto  $O^3$ ) no terceiro nível da árvore de busca (o que significa que nove seções estão incluídas no portfólio). Cabe destacar que não foi possível obter soluções que incluíssem mais de nove seções ao portfólio, conforme exposto na Proposição 3 (ver subseção 3.3.1). Além do mais, foi possível descartar 210 portfólios do mesmo nível dos ótimos obtidos (com nove seções) por inviabilidade.

Assim, a enumeração implícita proposta pode examinar as regiões do espaço da árvore de busca até o nível atual sem explorá-las completamente. Em outras palavras, considerando que o problema possui 12 variáveis de decisão, as combinações acima de nove seções foram devidamente desconsideradas por serem inviáveis (evitou-se a avaliação desnecessária de 76 combinações), expondo assim agilidade na modelagem para obtenção de portfólios viáveis.

De acordo com a Proposição 1, não é necessário continuar a busca em um nível superior ao atual (a exemplo do quarto nível com oito seções). Isso porque os outros portfólios viáveis que podem ser encontrados não terão desempenho melhor, em termos de riscos agregados, do que o conjunto  $O^3$ . Em outras palavras, do conjunto  $V$  (composto por 3366 portfólios neste problema), aqueles obtidos com a modelagem proposta possuem os maiores valores de risco agregado para a maior combinação de seções possível ( $r_{p_a} = \sum r_{s_i}; s_i \in p_a$ ).

As soluções obtidas com o modelo PSIE, adequadamente ordenadas de acordo com os riscos multidimensionais agregados, são apresentadas na Tabela 2, que tem a seguinte interpretação: i) as seções designadas como “0” (em vermelho) foram rejeitadas no portfólio; ii) enquanto as seções atribuídas com o valor “1” (em verde) foram selecionadas para a portfólio.

Tabela 2 – Conjunto de portfólios de fronteira obtidos com o modelo proposto

Portfólio	Seção												$r_{p_a}$	Custo total (US\$)
	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$	$s_{11}$	$s_{12}$		
$p_1$	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	-0,7491393	79.550,00
$p_2$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	-0,7491701	80.475,00
$p_3$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	-0,7492022	81.585,00
$p_4$	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	-0,7492085	78.810,00
$p_5$	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	-0,7492158	75.295,00
$p_6$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	-0,7492394	79.735,00
$p_7$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	-0,7492461	78.995,00

$p_8$	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	-0,7492617	82.140,00
$p_9$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	-0,7492714	80.845,00
$p_{10}$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	-0,7493153	78.255,00

Fonte: O Autor (2023).

Ao comparar as soluções, observa-se a natureza combinatória do problema em relação ao esquema de alocação no portfólio. A respeito disso, considerando os dez portfólios obtidos na modelagem do problema, análises adicionais constataam que as seções  $\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_7\}$  tendem a permanecer dentro da recomendação do portfólio de referência.

Assim, isso mostra sua relevância para a análise combinatória do problema. Por outro lado, outras seções do gasoduto (seções-chave) revelam a fonte de diferenciação quanto à formulação dos portfólios, considerando os riscos multidimensionais e respectivas restrições.

Em relação ao desempenho agregado sobre o risco, de acordo com o conjunto de soluções obtidas com o modelo PSIE (como visto na Tabela 2), a recomendação deve ser para o portfólio  $p_1$ , por apresentar o maior valor de risco multidimensional agregado. No entanto, os recursos financeiros alocados para este portfólio não são menores do que os de outras soluções.

De fato, ao invés de atender ao objetivo de exigir a menor quantidade de recursos alocáveis, o modelo PSIE visa apresentar o melhor desempenho do portfólio, dadas as restrições do problema. Um programa de gerenciamento de risco deve ser avaliado pelo benefício de cada alternativa sob uma perspectiva de risco. Assim, a mensuração do benefício da utilização do modelo inclui a perspectiva de prevenção de perdas e permite que os investimentos sejam melhor priorizados.

Além disso, chama-se a atenção para a recomendação do portfólio obtido com a programação 0-1 KP: a solução encontrada foi o vetor  $X^3 = (1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1)$ , ou  $Y_3 = \{1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 12\}$ , que representa o portfólio  $p_{10}$  do conjunto de portfólios de fronteira ( $O^3$ ), obtidos na modelagem inicial (conforme Tabela 2). Isso reforça a desvantagem da formulação direta da 0-1 KP, devido à função aditiva do modelo associada com o uso da escala intervalar.

Assim, foi possível obter com o modelo PSIE outras soluções com desempenho superior quanto ao risco multidimensional agregado em relação à abordagem conjunta sem transformação de escala (programação 0-1 KP). Diante disso, o DM não estando ciente de que o fator da escala (intervalar) afeta a seleção dos trechos do gasoduto, acabaria investindo em ações de mitigação para áreas que não corresponderiam ao melhor cenário de risco.

A partir dessa avaliação inicial, os benefícios do modelo proposto para a seleção dos trechos mais críticos considerando o risco do GGN podem ser verificados. Assim, este modelo

supera o impacto da escala intervalar na formação do portfólio, considerando a impossibilidade de transformação de escala devido às propriedades da abordagem multidimensional utilizada.

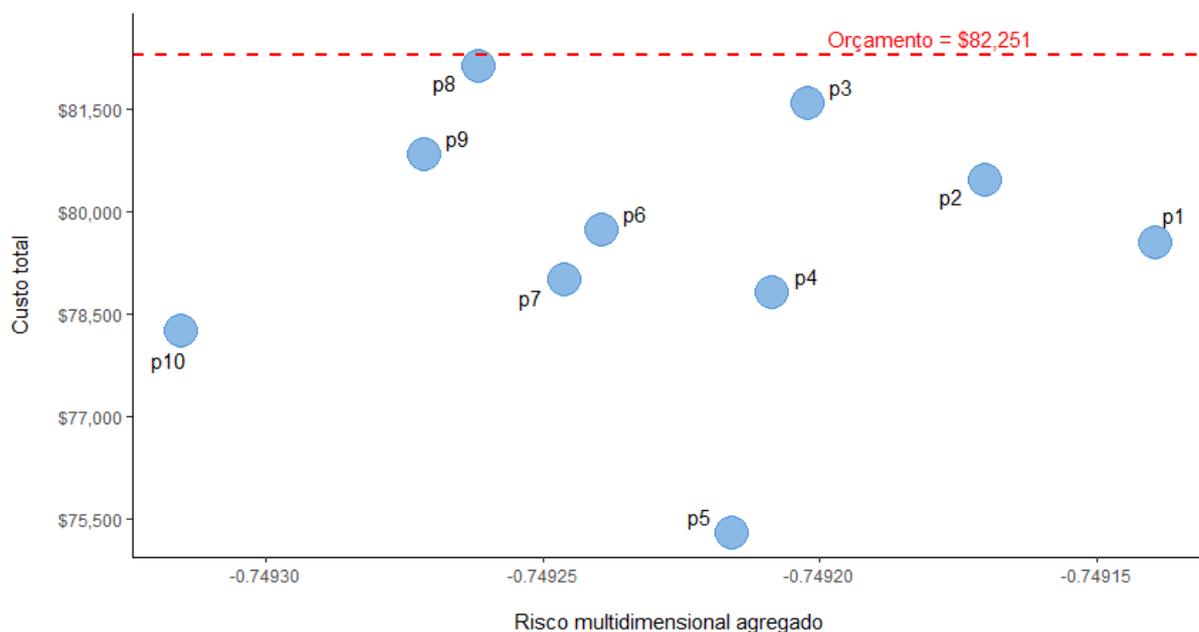
Deve-se observar que o problema do efeito do tamanho do portfólio não foi evidenciado com essa aplicação numérica. A respeito disso, como Martins *et al.* (2016) apontam, a evidência do efeito tamanho do portfólio depende da combinação de valores e restrições consideradas pelo problema.

Na prática, o modelo PSIE tem implicações no gerenciamento de uma rede de dutos. Ele pode ajudar os gestores na formulação de ações complementares em resposta aos riscos mais latentes, podendo assim dar maior cobertura ao combate à eventual ocorrência de falhas da rede.

Ao lidar com um problema de decisão complexo como este, o ponto relevante é que o propósito de um modelo multicritério não é estabelecer uma solução, mas apoiar discussões sobre o problema e desenvolver uma recomendação entre alternativas (BELTON; STEWART, 2002). Nessa perspectiva, as informações fornecidas ao DM devem ser claras e objetivas para estabelecer uma compreensão adequada do contexto analisado.

Assim, para potencializar esse processo de compreensão, técnicas de visualização (como gráficos, diagramas, mapas) podem ser utilizadas (ACKERMANN *et al.*, 2014). Assim, por meio de uma análise de visualização gráfica dos dados da Tabela 2, conforme mostrado na Figura 5, buscou-se ampliar a percepção do problema de decisão ao nível das recomendações individuais, contribuindo assim para o entendimento da decisão a ser tomada.

Figura 5 – Mapeamento de portfólios de fronteira



Fonte: O Autor (2023).

Assim, a partir desse mapeamento, apesar das diferenças anteriormente destacadas entre as soluções dos modelos, foi possível fornecer um insight valioso sobre o processo decisório: as implicações das escolhas potenciais devido ao desempenho dos portfólios em termos de risco considerando a distância entre esses valores. Em outras palavras, apesar das explicações expostas no final da subseção 3.4.1, pode ser difícil para o DM interpretar adequadamente os riscos multidimensionais agregados ( $r_{p_a}$ ). Estes riscos também apresentam, em termos da Teoria da Utilidade, uma escala de valores numericamente muito próximos uns dos outros (como pode ser visto na Figura 5). Então, vale ressaltar que o DM pode não ter certeza sobre o impacto da escolha entre as recomendações.

Vale destacar que embora a diferença seja relativamente pequena entre os portfólios obtidos (por exemplo, a diferença entre  $p_1$  e  $p_{10}$  é da ordem de  $1,76 \times 10^{-04}$ ), ela não deixa de ser significativa, como já mencionado anteriormente, porque eventos acidentais são raros em gasodutos. Além disso, as consequências podem ser devastadoras, sejam elas ambientais, econômicas ou sociais (RAMÍREZ-CAMACHO *et al.*, 2017).

Assim, com base nessa perspectiva de discussão, as informações relevantes precisam ser remodeladas em uma estrutura significativa, que forneça uma representação tangível das escolhas para ajudar o DM a fazer possíveis ajustes em suas deliberações ou possivelmente reforçar a decisão de aceitar a recomendação.

Nesse sentido, pode-se utilizar uma medida que oriente o DM na percepção de como a intensidade do risco pode subsidiar a tomada de decisão. A este respeito, observa-se na literatura a utilização de uma medida relacionada com comparações quanto a incrementos de risco (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010; BRITO; DE ALMEIDA, 2009; DA SILVA; ALENCAR; ALMEIDA, 2022; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017). Em outras palavras, pode-se expressar para o DM o quão significativa é a diferença entre itens obtidos em termos de incrementos de risco.

Então, isso pode ser feito a partir da razão desses incrementos à nível dos portfólios, revelando a magnitude considerável que um portfólio incrementa ao risco em relação ao outro. Ou seja, examinando o desempenho em termos de risco, consegue-se captar o aumento agregado, indicando o quanto se ganha ao escolher um conjunto de seções em detrimento de outro.

A respeito disso, a equação 7 mostra como a Razão de Risco (RR) em termos de incrementos é calculada. Ressalta-se que isso só é possível porque a escala intervalar, utilizada na abordagem de avaliação de risco multidimensional, permite discutir as diferenças que separam dois objetos consecutivos. Neste caso, observa-se a necessidade de que o conjunto de

portfólios ótimos ( $O^t$ ) tenha no mínimo três elementos, caso contrário, a interpretação do incremento de risco não se fundamenta.

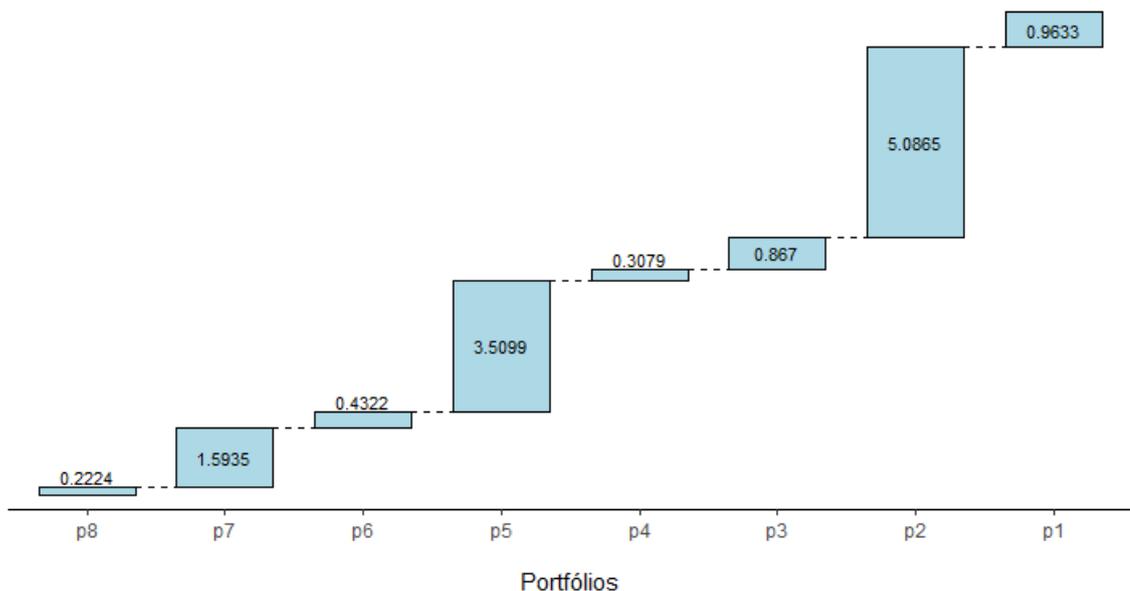
$$RR = \left( \frac{r_{p_a} - r_{p_{a+1}}}{r_{p_{a+1}} - r_{p_{a+2}}} \right); a = 1, 2, \dots, A - 2 \quad (7)$$

Esta análise da RR serve como fundamento adicional para o DM aumentar sua percepção e, assim, ter mais confiabilidade nos resultados para a tomada de decisão.

Por isso, ao fazer uma análise mais profunda dos riscos agregados dos portfólios com base nos dados da Tabela 2 e em relação a RR (pela equação 7), nota-se uma pequena diferença entre impacto do risco agregado no gasoduto quando se comparam os portfólios  $p_1$  e  $p_2$ , conforme exposto na Figura 6. Assim, a RR revela-se uma medida quantitativa da prioridade relativa do portfólio de referência  $p_1$  (no ranking dos portfólios de fronteira), ainda que o crescimento do risco entre  $p_1$  e  $p_2$  não seja excessivo.

Em contrapartida, o aumento dos valores de risco de  $p_3$  para  $p_2$  é 5,0952 vezes maior que o aumento dos valores de risco de  $p_4$  para  $p_3$ . Esse valor da razão destaca a magnitude considerável pela qual  $p_2$  excede  $p_3$  em relação aos outros portfólios. Uma observação semelhante pode ser feita comparando os portfólios  $p_6 - p_5$ . No entanto, destaca-se que os portfólios em posições inferiores no ranking não necessariamente apresentam baixo risco agregado para o contexto multidimensional.

Figura 6 – Razão de incremento do risco agregado entre os portfólios



Fonte: O Autor (2023).

Complementando essa observação, é possível também olhar além dos valores de risco agregados. Em outras palavras, pode ser examinando cada índice de risco agregado de forma independente pela dimensão avaliada (humana, financeira e ambiental).

Nesse contexto, é necessário uma análise mais profunda sobre o modelo de avaliação de risco multidimensional utilizado (BRITO; DE ALMEIDA, 2009), o qual é baseado em uma abordagem de critério único de síntese.

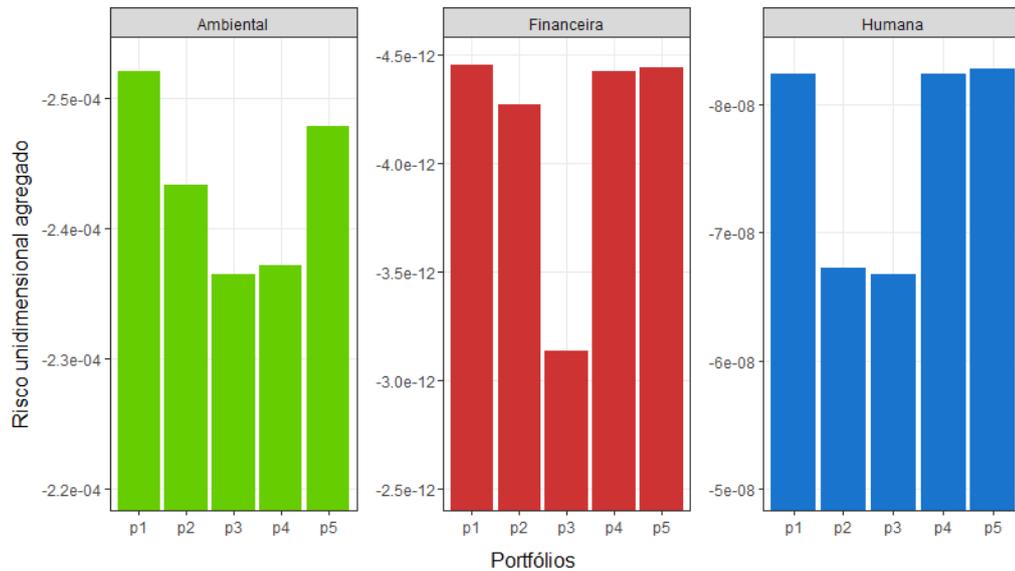
Devido a esta abordagem implicar a lógica da compensação, assume-se que o DM faz concessões entre os atributos, e assim desenvolverá uma avaliação global do risco de cada seção. Portanto, o desempenho do risco agregado para os portfólios pode não apresentar aspectos equilibrados, uma vez que as constantes de escala estabelecem os trade-offs entre os atributos e permitem a compensação da avaliação da seção (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Assim, considerando essa noção de compensação e a característica aditiva, este estudo analisa também uma perspectiva de desagregação para fornecer mais informações ao processo decisório. Para tanto, dada a formulação matemática da avaliação de risco multidimensional, a equação 6 (seção 3.2) pode ser reformulada. Nesse sentido, obtém-se uma expressão (equação 8) baseada nos riscos unidimensionais, na constante de escala e na probabilidade associada a um cenário de normalidade.

$$r_{s_i} = ([r_{s_i}]_e k_e + [r_{s_i}]_f k_f + [r_{s_i}]_h k_h) - \pi_i(\theta_N) \quad (8)$$

Assim, a medida de síntese do portfólio ( $r_{p_a}$ ) pode ser separada e organizada em unidades menores, ou seja, nos três riscos unidimensionais agregados (ambiental, financeiro e humano). Ressalta-se que, dadas as limitações cognitivas de um DM e o número de portfólios ótimos obtidos, é prudente que a análise da desagregação seja realizada utilizando um conjunto restrito de soluções (exceto nos casos em que a modelagem encontra apenas um portfólio viável). Portanto, neste estudo, foram considerados apenas os cinco melhores portfólios do conjunto  $O^3$ , conforme mostrado na Figura 7 (no eixo y, onde tem-se “e-01”, lê-se “10<sup>-01</sup>”).

Figura 7 – Análise de desagregação de risco dos portfólios



Fonte: O Autor (2023).

Analisando a Figura 7 e considerando a estimativa das constantes de escala ( $k_e = 0,315$ ;  $k_f = 0,113$ ;  $k_h = 0,572$ ), realizada dentro do modelo de risco multidimensional (BRITO; DE ALMEIDA, 2009) – utilizando procedimentos baseados em comparações de loterias de consequência; para maiores detalhes, ver Keeney e Raiffa (1976) – o DM amplia seu conhecimento sobre a situação de decisão. Este fato ocorre porque as constantes de escala representam uma métrica que indica a “importância” do atributo e a amplitude da dispersão dos desempenhos da seção (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Diante disso, o DM pode reconsiderar a recomendação do modelo proposto ( $p_1$ ) em comparação com outros portfólios devido aos desempenhos em relação aos riscos unidimensionais agregados em análise. Por exemplo, o portfólio  $p_3$ , que apresenta melhor desempenho na dimensão humana e ambiental, em comparação ao portfólio  $p_1$ , poderia ser escolhido.

### 3.5 Síntese do capítulo

Este capítulo apresenta um novo modelo multicritério para identificar portfólios de seções críticas de um Gasoduto de Gás Natural (GGN) com base em uma avaliação de risco multidimensional e uma enumeração implícita. Para tanto, o modelo proposto utiliza medidas de risco derivadas de uma abordagem multicritério que considera potenciais perdas ambientais, financeiras e humanas (BRITO; DE ALMEIDA, 2009).

Além disso, utiliza ramificações inteligentes e estratégias de busca eficazes para selecionar seções que precisam de mais atenção em relação ao risco do sistema e levando em

consideração as restrições orçamentárias. A viabilidade do modelo proposto foi ilustrada com a aplicação numérica de um GGN baseado em dados simulados de uma pesquisa realizada em uma empresa de gás natural.

Em setores como o GGN, vários trechos compõem a rede de transporte, aos quais devem ser aplicadas ações complementares para reduzir riscos em diferentes dimensões. Em relação à aplicação apresentada neste estudo, embora simplifique a complexidade do mundo real, é realista e, portanto, o modelo proposto mostra-se capaz de selecionar satisfatoriamente o portfólio de seções críticas.

Assim, foi possível demonstrar, por meio de análises e discussões ao longo do capítulo, que o modelo tem potencial para fornecer ao DM recomendações claras e concisas, de acordo com as condições específicas em análise. Em outras palavras, foi possível permitir uma percepção mais ampla do conjunto de soluções viáveis e fornecer um direcionamento mais adequado para a tomada de decisão, superando o viés na formulação dos portfólios mesmo fazendo uso da escala intervalar.

No entanto, o portfólio de referência apresentado ao final desse capítulo consiste em uma recomendação preliminar, ou seja, para atestar a robustez desse resultado ainda se faz necessário outras investigações. Em resumo, a análise de sensibilidade é uma etapa fundamental após a modelagem de problemas multicritério.

Parte-se do princípio que alguns dados de entrada, ou mesmo alguma simplificação no modelo possa impactar a recomendação final. Portanto, evidencia-se a necessidade de empregar uma análise de sensibilidade, para compreender como as variações nos parâmetros do problema afetam a solução encontrada, fornecendo insights valiosos sobre a estabilidade e confiabilidade da solução.

Diante disso, o capítulo seguinte aborda a estruturação, aplicação e discussão de um protocolo de análise de sensibilidade sobre o modelo proposto para obter uma solução mais robusta e confiável, adaptada a diferentes contextos e condições.

## 4 ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO MODELO

Esta seção busca explicar a estruturação do protocolo de análise de sensibilidade global para subsidiar a tomada de decisão na seleção do conjunto de trechos estratégicos para abordar riscos multidimensionais no Gasoduto de Gás Natural (GGN). Assim, isso ajuda a agregar mais credibilidade ao processo de tomada de decisão.

Portanto, a seção 4.1 tem o propósito de apresentar a fundamentação e premissas básicas da investigação da análise de sensibilidade global sobre o modelo proposto. Para tanto, pretende-se esclarecer a importância da investigação, descrever os aspectos direcionadores dessa análise e esquematizar algumas questões relevantes.

O benefício de um modelo está no potencial de auxiliar o DM, reunindo todos os pontos essenciais de um problema de decisão em um só lugar (BORGONOVO, 2017). No entanto, como um modelo corresponde a uma representação formal e simplificada da realidade (DE ALMEIDA *et al.*, 2015), algumas características em sua construção podem carregar incertezas inerentes. Assim, na seção 4.2, é realizada a análise dos parâmetros do modelo de seleção de portfólio, ou seja, o intuito é verificar quais parâmetros de entrada em relação ao risco estão mais sujeitos às imprecisões e trabalhar a investigação direcionada a eles.

Nesse sentido, destaca-se o potencial da análise de sensibilidade para modelar sistemas e apoiar a tomada de decisão (RAZAVI *et al.*, 2021). Logo, este é o ponto de partida para a discussão na seção 4.3, que apresenta como o protocolo análise de sensibilidade global é projetado para responder algumas questões de pesquisa.

Na seção 4.4, é estabelecida uma ligação entre os principais resultados obtidos com as questões que incentivaram a condução dessa investigação. Por fim, considerando que a modelagem desse estudo segue a estrutura do problema 0-1 KP (equações 1 e 2), a última seção (4.5) enfatiza a análise de robustez em relação a incertezas que influenciam a restrição do problema: os Custos Operacionais (OPEX – *Operating Expense*). Cabe destacar que todas as análises descritas nesse capítulo foram devidamente incorporadas na estrutura do SAD, o qual será melhor detalhado no capítulo 5.

### 4.1 Contextualização sobre a investigação das incertezas

Segundo Borgonovo e Plischke (2016), a criação de modelos específicos de suporte à decisão é uma forma de resolver muitos problemas de gestão. Mais especificamente, as abordagens MCDM/A fornecem contribuições relevantes. Através delas, é possível possibilitar

a tomada de decisões mais estratégicas envolvendo objetivos múltiplos e frequentemente conflitantes, auxiliando assim a gestão de riscos (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Dessa forma, conforme discutido no capítulo anterior o modelo proposto apresenta uma abordagem multicritério de apoio à decisão que utiliza um procedimento alternativo para seleção de portfólio em sistemas de GGN. A proposta fortalece alguns aspectos da capacidade de busca, pois trata da otimização combinatória e problemas relacionados a abordagens aditivas multicritério focadas no problema de portfólio (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022). Neste sentido, a abordagem deste modelo encontra não apenas uma estimativa das seções mais críticas da rede de dutos em relação às restrições, mas também um conjunto de soluções ótimas.

No entanto, Borgonovo, Buzzar e Wendell (2018) explicam que encontrar uma solução por meio de um modelo de apoio à decisão é apenas um ponto de partida. Atrelado à forma como isso deve ser formulado, o modelo deve enfrentar a tarefa crítica de analisar os aspectos de modelagem com mais rigor e, como resultado, isso deve gerar insights gerenciais que orientem melhor a tomada de decisão em contextos complexos.

Nesta perspectiva, uma vez que ao construir um modelo, vários elementos devem ser especificados, incluindo a estrutura, parâmetros e entradas, percebe-se que cada um deles pode ter uma incerteza associada (por exemplo, devido à ausência de dados precisos) (SALTELLI *et al.*, 2019). Desse ponto de vista, um grande passo é investigar a incerteza por meio desses elementos do modelo (RAZAVI *et al.*, 2021). Em particular, Aven e Renn (2009) enfatizam a incerteza como um componente crítico da avaliação de risco.

No contexto de dutos, devido à incerteza na causa das falhas, diversos fatores podem impactar na segurança dessa infraestrutura e, portanto, nos níveis de risco (VIANA *et al.*, 2021). Portanto, se estimativas de risco são usadas para construir o portfólio no modelo proposto, como as incertezas podem influenciar a política de gestão? Assim, a precisão e robustez dos resultados devem ser questionadas.

Logo, destaca-se a importância de incorporar a investigação de possíveis variações nas medidas de risco e como essas alterações influenciam na sensibilidade dos resultados finais, principalmente quando os parâmetros seguem um comportamento probabilístico (BORGONOVO; CILLO; SMITH, 2018). Assim, isso reforça a noção de que antes de considerar as recomendações do modelo seleção de portfólio para o desenho de estratégias de mitigação, uma análise mais abrangente deve ser construída para envolver todos os cenários de incerteza plausíveis na avaliação dos riscos.

Diante desse cenário, a análise de sensibilidade é frequentemente recomendada como parte integrante das melhores práticas para alcançar a qualidade e robustez do processo de

modelagem (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016). De fato, por exemplo, ao adotar uma metodologia MCDM/A, a análise de sensibilidade tem sido empregada em muitos contextos baseados em risco (BAKHTAVAR; YOUSEFI, 2018; DA SILVA; ALENCAR; ALMEIDA, 2022; LIU *et al.*, 2018; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017).

Além disso, por meio da análise de sensibilidade, pode-se obter informações valiosas sobre o comportamento do modelo, sua estrutura e sua resposta a mudanças, ou seja, pode melhorar o entendimento de como o modelo funciona (BORGONOVO, 2017).

Com base nesse panorama, este capítulo se propõe a analisar as incertezas envolvidas no modelo desenvolvido quanto as avaliações dos riscos, para adicionar transparência ao problema e reforçar a tomada de decisão.

Em outras palavras, essa investigação permite que a percepção de risco nos portfólios seja moldada por visões mais amplas que levem a ações mais direcionadas para mitigação de perdas. Portanto, busca-se atuar como suporte para quantificar a sensibilidade do resultado esperado da decisão do modelo.

#### *4.1.1 Aspectos direcionadores da análise*

Essencialmente, a importância primordial deste capítulo é oferecer ao DM um bom nível de confiança de que o portfólio escolhido representa o conjunto de trechos mais críticos da malha do gasoduto, considerando as incertezas no processo de gerenciamento de risco.

Ressalta-se que para melhorar a consistência da aplicação da análise de sensibilidade, inicialmente, questões de pesquisa devem ser enquadradas (BORGONOVO, 2017). Em outras palavras, a literatura mostra que um passo significativo é uma afirmação objetiva do que se quer entender a partir do modelo (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016). Assim, considerando esse fato, é possível melhorar a clareza de todo o processo, aumentando assim a familiaridade do DM com o comportamento do modelo e dando a ele confiança com base nas respostas obtidas sobre o modelo de decisão (BORGONOVO, 2017).

Para tanto, discutiu-se a sensibilidade da modificação na formulação do portfólio ótimo, ou seja, analisar a validação da estabilidade da recomendação original no decorrer do experimento (simulação das incertezas envolvidas). Assim, nesse sentido, este capítulo busca investigar as seguintes questões de pesquisa sobre o modelo proposto:

- a) Sob a influência de incertezas na modelagem de risco, qual é o comportamento do portfólio ótimo recomendado?
- b) Quais fatores na entrada do modelo contribuem significativamente para a variação na decisão?

Nesse sentido, essas questões são respondidas por meio de um protocolo análise de sensibilidade global suportado por ferramentas gráficas e estatísticas, tornando o modelo mais compreensível e, portanto, mais adequado para uso na gestão de risco de gasodutos.

#### 4.1.2 *Insights para a análise de sensibilidade*

Considerando os aspectos metodológicos, os métodos de sensibilidade podem ser amplamente classificados como locais e globais. Na primeira abordagem, há o estudo de perturbações na saída do modelo, que ocorrem em torno de valores nominais (BORGONOVO, 2017; SALTELLI *et al.*, 2007). A segunda abordagem considera o domínio total da definição dos fatores, ou seja, envolve toda a faixa de variação dos inputs (BORGONOVO, 2017; RAZAVI *et al.*, 2021).

Dadas as limitações das técnicas de abordagem local (como suposições de linearidade e variações pontuais) para lidar com problemas do mundo real, a análise de sensibilidade global tem sido mais adequada para mapear a incerteza em modelos científicos (NOGAL; NOGAL, 2021; RAZAVI *et al.*, 2021).

Além disso, para a representação adequada de todas as incertezas envolvidas e maior transparência do processo decisório, recomenda-se que a análise de sensibilidade seja realizada em conjunto com a análise de incertezas (BORGONOVO, 2017). Em relação à análise de incertezas, uma recomendação importante são as estratégias de amostragem para representar incertezas de parâmetros. Simulações de Monte Carlo (SMC) são comumente usadas para esse fim (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016; NOGAL; NOGAL, 2021).

Uma SMC modela variáveis probabilisticamente para lidar com a incerteza, ou seja, trata os parâmetros de entrada por meio de funções de distribuição (SHIELDS *et al.*, 2015). Portanto, essa abordagem de SMC é adequada para análise de sensibilidade global, pois permite que as relações entre as incertezas de entrada e os resultados da análise sejam mais facilmente estabelecidas (HELTON, 1993).

Como Razavi *et al.* (2021) destacam, análise de sensibilidade não é apenas um paradigma quantitativo em que se quantifica a contribuição da variabilidade de cada insumo em relação à variabilidade de alguma função de saída. A análise de sensibilidade também deve trazer uma reflexão geral sobre o conhecimento. Nessa perspectiva, outro ponto de destaque é a distinção entre análises de sensibilidade vinculadas à valor e decisão (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016).

Na primeira abordagem, há o interesse em quantificar a mudança na saída do modelo devido a mudanças nas entradas, ou seja, verificar a interferência do comportamento numérico da entrada para a saída (investigação de valor).

Nesses casos, índices específicos são usados para representar o nível de sensibilidade na variação da saída. Pode-se listar, por exemplo, o índice de sensibilidade baseado em variância (MARINO; ZIO, 2021), a medida de importância independente do momento (LÓPEZ-BENITO; BOLADO-LAVÍN, 2017), ou ainda estatísticas não paramétricas (MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017).

Para a segunda abordagem, há interesse em avaliar se há mudança no resultado ótimo (investigação de decisão). Viana *et al.* (2021) realizam um estudo alinhado aos propósitos da visão de sensibilidade para a tomada de decisão, no intuito de apoiar as operações de planejamento de uma rede de transporte de gás natural. Para isso, os autores se basearam em uma estatística não paramétrica para validar os índices de sensibilidade.

Em resumo, observa-se na literatura uma concentração mais significativa de estudos focados na perspectiva de análise de sensibilidade baseada em valor (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016). Assim, há a necessidade de explorar ainda mais a abordagem de análise de sensibilidade global alinhada com os propósitos da visão de decisão.

Dado esse histórico, há uma oportunidade de delinear o modelo de decisão estruturado para formulação de portfólio em uma rede GGN, considerando uma perspectiva mais sofisticada e que contribua com os principais insights já mencionados da literatura vigente de análise de sensibilidade.

Portanto, este capítulo aborda o suporte à decisão para o modelo de seleção de portfólio proposto, utilizando uma análise de sensibilidade global alinhada com a visão para decisão sobre o resultado esperado, considerando diferentes premissas e incertezas nas avaliações de risco.

#### 4.2 Análise dos parâmetros do modelo de seleção de portfólio

Em um ambiente de tomada de decisão, as saídas geradas por um modelo podem mudar à medida que a construção do modelo evolui. Isso é ocasionado devido as incertezas inerentes a alguns fatores utilizados na modelagem. Nesse contexto, a busca por uma decisão mais concisa requer que mais informações sejam obtidas.

Nesta perspectiva, a análise de sensibilidade associada à incerteza na gestão do risco revela-se como uma abordagem fundamental (AVEN; RENN, 2009; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017). A respeito disso, como as recomendações de modelagem de seleção de

portfólio são derivadas de um modelo de risco quantitativo, conforme exposto no capítulo 3, as entradas do respectivo modelo devem ser investigadas quanto à natureza do risco.

Do ponto de vista processual, ao realizar uma análise mais criteriosa do modelo de seleção de portfólios baseado em risco, foi possível estabelecer melhor os fatores que podem alterar a recomendação do portfólio ótimo. Portanto, este trabalho considera cinco diferentes grupos (padrões) de parâmetros associados às questões de avaliação de risco multidimensional, inseridas no modelo proposto.

É fundamental observar que cada grupo analisado configura uma entrada com incertezas, que podem afetar os valores de risco (equação 6, seção 3.2) e o portfólio recomendado. Assim, isso reforça a necessidade de investigar as contribuições desses parâmetros para tornar as recomendações mais credíveis. Em seguida (próximas subseções), é feita uma breve explicação e ligação entre a definição desses inputs (grupos de parâmetros) no processo de análise de sensibilidade global e a incerteza envolvida na avaliação de risco.

Nesse sentido, um protocolo de análise de sensibilidade global será estruturado na próxima seção para fornecer mais insights para a tomada de decisões estratégicas sobre a definição dos trechos mais críticos do duto, quando houver incertezas na avaliação de riscos de acordo com os grupos de parâmetros relatados a seguir. Assim, será possível verificar a significância do resultado final quando a variação de diferentes fontes de incerteza ocorrer.

#### 4.2.1 Zona Crítica de Perigo (CDZ)

A metodologia de avaliação de risco multidimensional tem em sua estrutura a análise da exposição de objetos à impactos devido a um cenário acidental ( $\theta$ ). Em outras palavras, o modelo faz uma avaliação conservadora dos riscos envolvidos para cada cenário  $\theta$  e trecho  $s_i$ , considerando a zona de perigo mais crítica para cada trecho associado ao pior cenário acidental que possa ocorrer nele.

Este contexto permite uma estimativa conservadora do raio de risco máximo a partir de um ponto na tubulação. Para determinar essa região crítica, utiliza-se da proposta idealizada por Jo e Ahn (2003, 2002), a qual é composta pelos seguintes parâmetros: i) valor da pressão constante na estação de compressão a montante da seção; ii) diâmetro da tubulação; e iii) comprimento da seção a partir da estação de compressão a montante.

Assim, o impacto de uma determinada variação nesses fatores que compõem o CDZ – assumindo, por exemplo, cenários de condições atmosféricas e valores críticos de radiação de calor – pode levar a situações críticas quanto ao alcance das consequências analisadas.

#### 4.2.2 Fluxo de Radiação de Calor

Após estimar as zonas de perigo associadas a vários cenários acidentais em cada seção, obtém-se um conjunto de possíveis consequências. Essas possíveis consequências se devem ao transporte de calor e energia por meio de gás aquecido, chamas ou explosões que afetam pessoas, infraestrutura, áreas de vegetação, entre outros.

O cálculo das perdas para as três dimensões está diretamente relacionado à intensidade do calor médio liberado sobre o cenário acidental ( $\theta$ ). Em relação aos efeitos dos impactos de um acidente por vazamento de gás natural, o modelo associa o nível de Radiação de Calor (HR – *Heat Radiation*) com a probabilidade de ocorrência de danos específicos. É por isso que há interesse no impacto da variação de parâmetros relacionados ao fluxo de radiação de calor para a avaliação de risco.

O fluxo de radiação de calor sobre o cenário acidental é dado pela abordagem desenvolvida por Jo e Crowl (2008), na qual pode-se listar, por exemplo, parâmetros como: i) transmissividade atmosférica; ii) taxa efetiva de vazamento de gás; e iii) umidade relativa.

#### 4.2.3 Parâmetros relacionados ao gás

O modelo de avaliação de risco multidimensional aborda o GGN. Por isso, os parâmetros referentes ao gás também precisam de atenção. Nesse sentido, em um contexto mais amplo, tais fatores podem ser subdivididos em dois grupos:

- Os que variam por seção (SEC), ou seja, inerentes à tubulação, independentemente do modo de falha que ocorra;
- Os que variam de acordo com o cenário (SCEN), ou seja, apresentam valores diferentes de acordo com o cenário de ocorrência.

Portanto, para o primeiro grupo, os parâmetros observados como variados nas seções discretas do duto são principalmente derivados de suas características físicas. Como o comprimento da tubulação, fluxo regular de gás e umidade relativa. Outros parâmetros dependem da localização, como a distância da tubulação da estação de compressão e a quantidade de vegetação na zona crítica de perigo. Por fim, alguns parâmetros dependem do acordo entre fornecedores e clientes de gás natural, como o valor da venda e a estimativa da multa do contrato.

O segundo grupo, dependente do cenário de ocorrência, é vital. Um conjunto de incertezas relacionadas ao modo de falha da tubulação, a presença de uma fonte de ignição e barreiras de confinamento podem desencadear mecanismos probabilísticos que influenciarão a

ocorrência de cenários acidentais, que por sua vez afetarão a probabilidade de impactos decorrentes do acidente.

Assim, entre os parâmetros analisados neste grupo estão, por exemplo, a taxa de liberação de gás pelo furo ou ruptura e a proporção do tamanho do furo obtido pela razão efetiva para a área transversal da tubulação. Portanto, é necessário verificar a influência que esses dois grupos de parâmetros relacionados ao gás podem ter na recomendação final.

#### 4.2.4 Todos os parâmetros de risco

Anteriormente, foram detalhados os principais grupos de parâmetros que compõem a avaliação de risco multidimensional utilizada no modelo seleção de portfólio. A última configuração a ser analisada refere-se à variação igual para todos os parâmetros (ALL). Nesse contexto, a significância do resultado final pode ser verificada quando a variação de diferentes fontes de incerteza coincide.

### 4.3 Estrutura da análise de sensibilidade global

As etapas que compõem a análise de sensibilidade global utilizada neste estudo estão resumidas na Figura 8. Para tanto, uma SMC é o primeiro passo para entender as fontes de incerteza que dominam as mudanças nos resultados (BORGONOVO, 2017; SALTELLI *et al.*, 2019). Nessa perspectiva, quando se modela a análise de sensibilidade global com SMC, a análise de incerteza acaba produzindo a variabilidade de um determinado parâmetro de entrada (ou um conjunto deles), enquanto a análise de sensibilidade global mede a perturbação na saída (BRITO; ALMORADIE; EVERS, 2019).

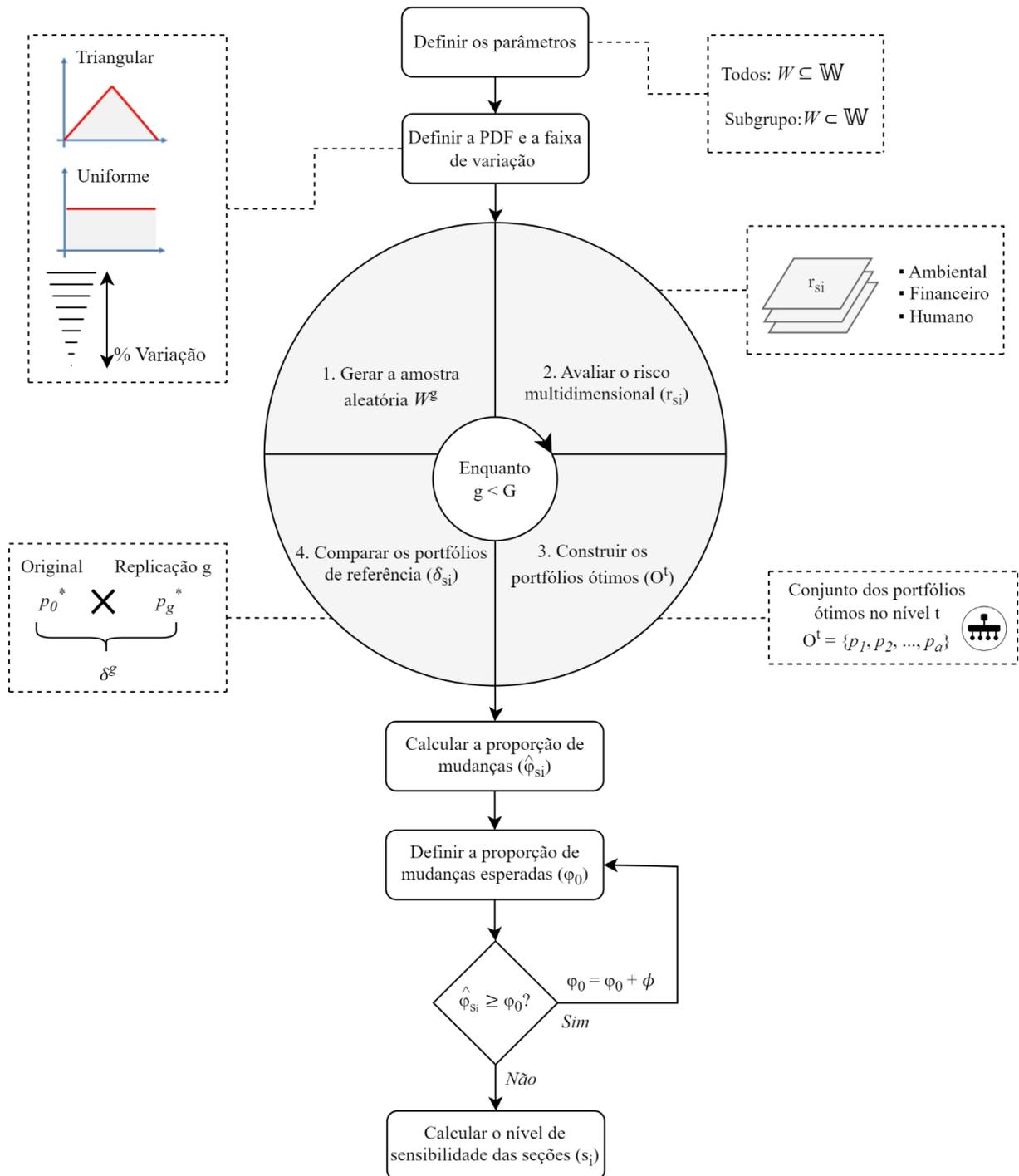
Considere o espaço de entrada do modelo proposto ( $\mathbb{W}$ ), que é formado principalmente pelos parâmetros de avaliação de risco multidimensional (conforme discutido na seção 4.2). Os padrões de avaliação usados na SMC são formulados a partir desse conjunto de entradas. Em outras palavras, considera-se grupos de diferentes parâmetros de entrada do modelo,  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_d\} \subset \mathbb{W}$ , para realizar a análise de incerteza.

Nesse sentido, antes da aplicação da SMC, é estabelecida a composição dos fatores a serem investigados:

- Todos os parâmetros de risco  $W \subseteq \mathbb{W}$  (conforme discutido na subseção 4.2.4);
- Subgrupo específico  $W \subset \mathbb{W}$  (conforme discutido nas subseções 4.2.1 a 4.2.3).

Neste segundo caso, os valores originais dos parâmetros não selecionados são mantidos como referência nominal para cálculo do risco multidimensional (ver equação 6, seção 3.2).

Figura 8 – Protocolo da análise de sensibilidade global



Fonte: O Autor (2023).

Assim, a partir da definição dos padrões de avaliação, é possível indicar como uma variação típica dos parâmetros em análise pode impactar a decisão final do portfólio. Em seguida, a simulação cria resultados possíveis usando uma distribuição de probabilidade sobre os parâmetros de entrada do modelo. Nesse sentido, cada parâmetro é descrito por uma Função Densidade de Probabilidade (PDF) que gera um conjunto de valores utilizados na SMC (THOMOPOULOS, 2013).

A respeito disso, um número abundante de repetições ( $G$ ) é utilizado considerando diferentes faixas de variação que atuam como grau de incerteza, permitindo a variabilidade dos parâmetros. Para tanto, um passo importante é determinar a distribuição de probabilidade. No entanto, a distribuição real dos parâmetros é desconhecida (por exemplo, devido à falta de dados de séries temporais ou estimativas de especialistas).

Nessa perspectiva, considerando algumas avaliações básicas das características das variáveis em análise, as distribuições de probabilidade mais comuns sugeridas são as distribuições uniforme e triangular (FISHMAN, 1996; THOMOPOULOS, 2013). Essas distribuições permitem compreender o comportamento dinâmico dos possíveis resultados a partir dos valores originalmente estabelecidos.

Além disso, cada item do conjunto  $W$  é tratado como uma variável aleatória. Assim, considerando a amostragem das respectivas distribuições dessas variáveis ( $W^g$ ), a avaliação de risco multidimensional ( $r_{s_i}$ ) é realizada para cada trecho do duto (ver equação 6, seção 3.2).

Posteriormente, a abordagem de enumeração implícita é aplicada para construção do(s) portfólio(s). Assim, dentro do espaço de soluções do problema ( $V$ ), a saída do modelo,  $O^t = \{p_a | a = 1, \dots, A; A \geq 1\} \subset V$  representa os portfólios ótimos encontrados (no nível  $t$ ).

Ainda em relação ao output do modelo, a informação mais relevante para o DM é o portfólio ótimo de referência ( $p^* \in O^t$ ). Assim, se o espaço de busca possui um conjunto de portfólios ótimos (ambos com o mesmo número de seções envolvidas), o portfólio de referência representa aquele com melhor desempenho em termos de riscos agregados ( $r_{p_a}$ ).

Seguindo o processo de análise de sensibilidade global, é interessante estimar medidas de sensibilidade para determinar qual dos parâmetros de entrada é o mais importante para influenciar a incerteza na decisão do modelo. Nesse sentido, surge uma questão fundamental: como estimar uma medida de sensibilidade mais adequada para esse contexto decisório na seleção de portfólio? Nessa perspectiva, para responder a essa questão, postulou-se a construção da medida de sensibilidade alinhada ao propósito da visão para decisão com base na proporção referente ao portfólio de referência recomendado.

A este respeito, em cada replicação ( $g$ ), é feita uma comparação entre o portfólio de referência associado ao conjunto de dados original ( $p_0^*$ ) e o portfólio de referência ( $p_g^*$ ) atribuído à amostra da replicação  $g$ . Em suma, esta comparação enfatiza detalhes sobre as seções do gasoduto. Neste caso, um índice ( $\delta_{s_i}$ ) é utilizado para capturar as modificações referentes aos portfólios de referência obtidos na simulação:

- a) Quando a seção  $s_i$  está presente tanto no portfólio  $p_0^*$  quanto no  $p_g^*$ , na replicação  $g$ , o índice se torna  $\delta_{s_i} = 0$ ;
- b) Quando a seção  $s_i$  do portfólio  $p_0^*$  não está presente em  $p_g^*$ , na replicação  $g$ , o índice passa a ser  $\delta_{s_i} = 1$ ;

Em outras palavras, o foco do índice ( $\delta_{s_i}$ ) está na contabilização das diferenças obtidas entre as seções alocadas no portfólio da simulação ( $p_g^*$ ) e o portfólio de referência original ( $p_0^*$ ).

Considerando a execução de replicações ao longo do experimento da SMC, os índices  $\delta_{s_i}$  podem ser interpretados como ensaios de Bernoulli independentes. Assim, pode-se ajustar esse contexto a um modelo de probabilidade binomial (MONTGOMERY; RUNGER, 2018).

Do ponto de vista metodológico, para analisar a robustez da recomendação do modelo proposto de acordo com as incertezas nas configurações dos parâmetros, é utilizada uma variável construída ( $\hat{\varphi}_{s_i}$ ) conforme mostrado na equação 9.

$$\hat{\varphi}_{s_i} = \frac{\sum_{g=1}^G \delta_{s_i}}{G} \quad (9)$$

Em outras palavras, a variável  $\hat{\varphi}_{s_i}$  estima a proporção das seções distintas para a combinação do portfólio de referência original (considerando os eventos de desigualdade,  $\delta_{s_i} = 1$ ), gerados na amostra  $G$ . Nesse caso, a ideia é estimar a significância da proporção de mudanças no experimento simulado.

Assim, é necessário testar hipóteses sobre essa proporção em relação ao limiar de sensibilidade, representado pela proporção esperada de modificações ( $\varphi_0$ ). Deste modo, um par de afirmações (hipóteses) mutuamente e coletivamente exaustivas sobre o contexto em análise é formulada para responder às questões de pesquisa.

$$\begin{cases} H_0: \hat{\varphi}_{s_i} \geq \varphi_0 \\ H_1: \hat{\varphi}_{s_i} < \varphi_0 \end{cases} \quad (10)$$

A hipótese nula ( $H_0$ ) afirma que a proporção das seções distintas obtidas na simulação em relação ao portfólio de referência original ( $p_0^*$ ) é maior ou igual a um valor de referência ( $\varphi_0$ ). Se  $H_0$  não representa uma teoria estabelecida, sua rejeição é efetivamente esperada para que o modelo proposto seja robusto e, conseqüentemente, a configuração original do portfólio de referência seja mantida.

Nesse sentido, considerando que a amostra é suficientemente grande ( $G$ ), então a proporção de mudanças pode ser aproximada a uma distribuição normal ( $\hat{\varphi}_{s_i} \sim N[G\varphi_0, G\varphi_0(1 - \varphi_0)]$ ) considerando uma correção de continuidade (MONTGOMERY; RUNGER,

2018). Além disso, assume-se que o teste de proporção para uma amostra pode ser usado para avaliar se a proporção ( $\hat{\varphi}_{s_i}$ ) de cada seção é significativa em relação ao valor da proporção esperada de mudanças ( $\varphi_0$ ). A estatística de teste é definida de acordo com a equação 11.

$$z = \frac{\hat{\varphi}_{s_i} - \varphi_0}{\sqrt{\varphi_0(1 - \varphi_0)/G}} \quad (11)$$

Portanto, na regra de decisão, o nível descritivo (ou valor-p) é usado para mostrar a probabilidade de que a estatística de teste (ou um valor mais extremo) seja observada por acaso, assumindo que  $H_0$  é verdadeira. Assim, considerando um nível de significância leve ( $\alpha$ ) para garantir uma baixa probabilidade de erro Tipo I, se o valor-p for menor que  $\alpha$ , a amostra contraria a hipótese nula.

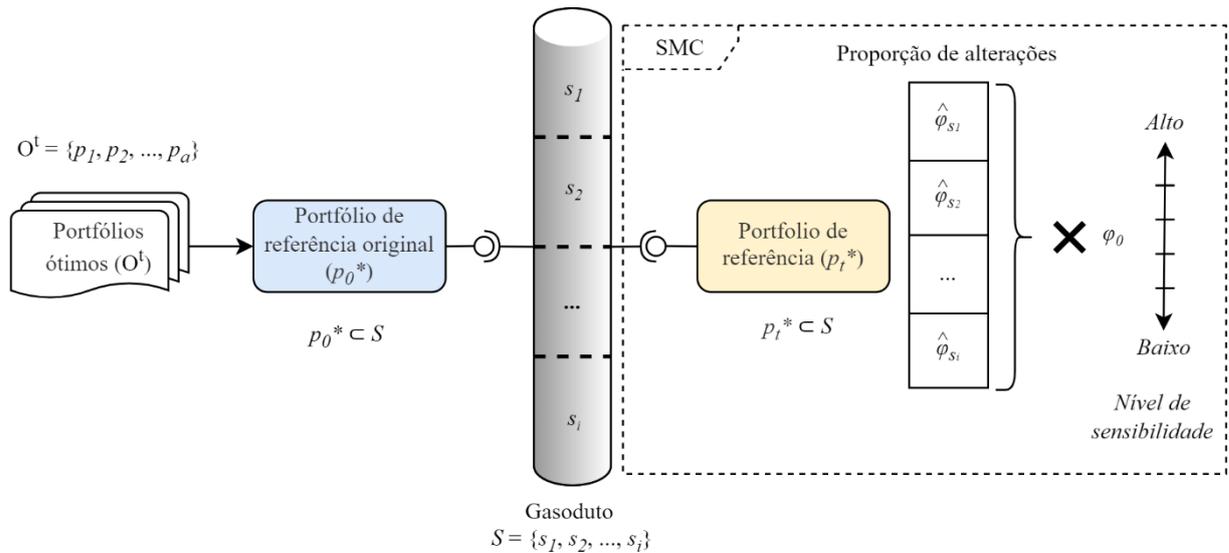
Uma observação neste contexto é que a razão  $\varphi_0$  influencia a estatística do teste (ver equação 11). Portanto, é possível inferir o nível de sensibilidade das seções para cada padrão de avaliação. Assim, o nível de sensibilidade é considerado através de um determinado  $\varphi_0$ , que influencia o teste estatístico (rejeição de  $H_0$ ) quanto à magnitude das mudanças de seção.

Considerando que o valor de  $\varphi_0$  é empírico (MONTGOMERY; RUNGER, 2018), e como não há especificação técnica desse valor pelo modelo analisado, inicialmente são atribuídas pequenas proporções. Se  $H_0$  não for rejeitado, pode-se incrementar o valor de referência ( $\varphi_0 = \varphi_0 + \phi$ ) até que ocorra a mudança no resultado da regra de decisão. Em outras palavras, quando a afirmação da hipótese alternativa é verdadeira, estabelece-se que a seção  $s_i$  pertence a um nível de sensibilidade específico.

Assim, neste ponto, pode-se deduzir quais condições afetam a robustez da recomendação do portfólio de referência original. Ou seja, reconhece-se qual grupo de parâmetros pode promover mais modificações em relação ao portfólio de referência. A percepção do nível de sensibilidade em relação ao valor de referência  $\varphi_0$  pode ser interpretado na Figura 9.

Assim, quanto menor for esta métrica (valor de referência  $\varphi_0$ ) e mais relevante for o nível descritivo (valor-p), mais robusto será o desempenho relativo do portfólio de referência original para a decisão final. Por outro lado, à medida que o nível de sensibilidade aumenta, mantendo a relevância do valor-p, maior é a probabilidade de alteração da recomendação para o portfólio de referência.

Figura 9 – Percepção do nível de sensibilidade através do valor de referência



Fonte: O Autor (2023).

Além disso, a simulação executará o processo descrito na Figura 9 sucessivamente (enquanto  $g < G$ ), usando um conjunto diferente de entradas dentro de seus intervalos plausíveis. Este protocolo análise de sensibilidade global será implementado na próxima seção. Por fim, será apresentada uma discussão dos resultados obtidos para compartilhar insights essenciais sobre a abordagem proposta e, conseqüentemente, revelar a robustez da seleção de portfólio para as seções mais críticas de um GGN.

#### 4.4 Simulação: resultados e discussão

Esta seção apresenta a aplicação do protocolo análise de sensibilidade global, proposto na seção 4.3, para avaliar a robustez da recomendação do modelo proposto quanto a seleção das seções mais críticas de gasoduto, considerando diferentes cenários de incerteza que impactam nos riscos multidimensionais.

A subseção 4.4.1 investiga a robustez da decisão em seleção de portfólio com base em resultados de análise de sensibilidade global. Por fim, a subseção 4.4.2 apresenta um resumo dos insights evidenciados pelo estudo com foco nas respostas às questões de pesquisa (ver subseção 4.1.1).

##### 4.4.1 Explorando a análise de sensibilidade global

Em relação às características utilizadas para análise de incertezas, observa-se que elas são combinadas por dois componentes principais, conforme explicado na seção 4.3: i) o nível de incerteza relacionado; ii) modelagem probabilística da incerteza.

Assim, a configuração desses componentes explorados na análise de sensibilidade global é apresentada na Tabela 3. Em termos práticos, isso permite o melhor exame do espaço de variação dos parâmetros e, conseqüentemente, validação do experimento quanto à investigação da análise de incertezas.

Tabela 3 – Principais características dos componentes da análise de sensibilidade global

<i>Componente</i>	<i>Identificador</i>	<i>Descrição</i>
<i>Nível de incerteza</i>	L: baixo ( <i>low</i> )	Faixa de variação de 10%
	M: médio ( <i>medium</i> )	Faixa de variação de 15%
	H: alto ( <i>high</i> )	Faixa de variação de 20%
<i>Modelagem probabilística da incerteza</i>	T: triangular	Distribuição de probabilidade contínua que tem um mínimo, um máximo e uma moda
	U: uniforme	Distribuição de probabilidade contínua ao longo de um intervalo uniforme

Fonte: O Autor (2023).

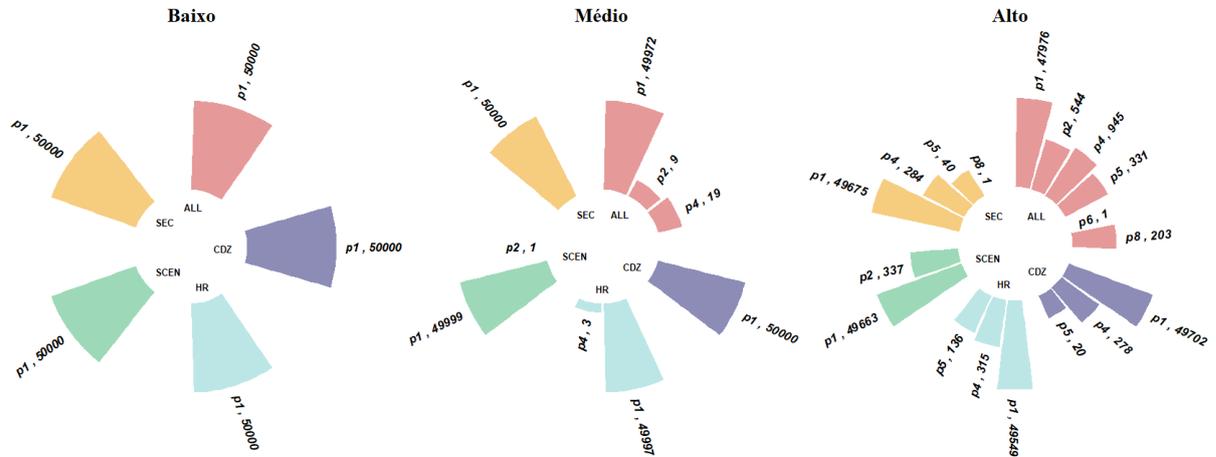
Em outras palavras, utiliza-se da combinação dos componentes apresentados na Tabela 3 com cada grupo de parâmetros (conforme discutido na seção 4.2) para compor os 30 padrões de análise. Por exemplo, a notação “HR-L-U” indica um padrão de simulação envolvendo os parâmetros de fluxo de radiação de calor, cujas variações ocorrem de acordo com uma distribuição uniforme e um baixo grau de incerteza (cerca de 10%).

A lei dos grandes números garante que a frequência relativa de ocorrência de um possível resultado de uma variável aleatória converge para o resultado teórico à medida que o número de experimentos aumenta (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Nesse sentido, para cada um dos cinco padrões de avaliação (CDZ, HR, SEC, SCEN e ALL), são realizadas 50.000 repetições ( $G$ ) para observar possíveis resultados do comportamento dos parâmetros.

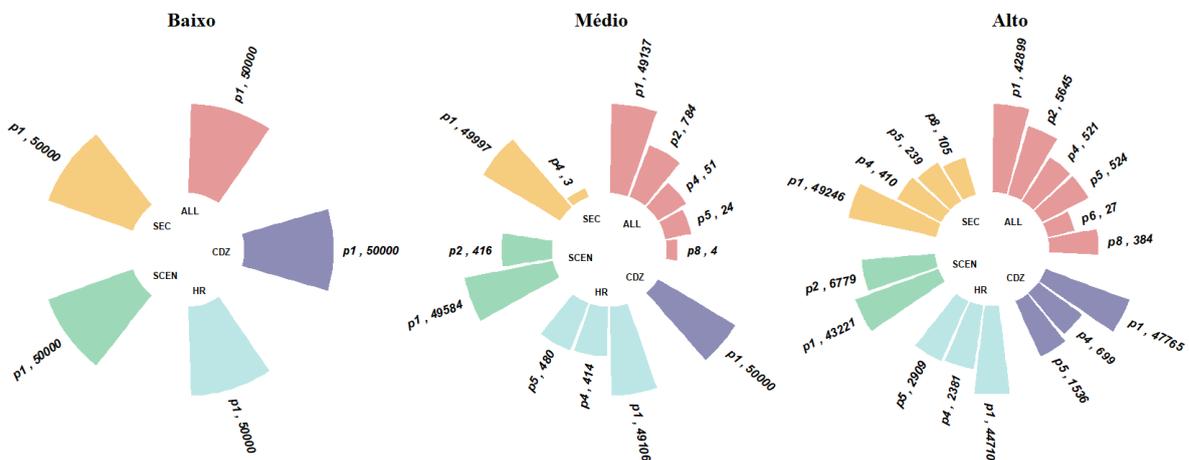
Portanto, considerando todo o desenho apresentado, os resultados iniciais da simulação são resumidos através do gráfico de barras circulares, conforme mostrado na Figura 10. As barras indicam a frequência dos portfólios de referência obtidos em cada padrão de avaliação. Essa análise permite que o DM verifique o comportamento dos portfólios vis-à-vis incertezas nas avaliações dos riscos multidimensionais.

Figura 10 – Resultados da SMC para os portfólios de referência em cada padrão

## (a) TRIANGULAR



## (b) UNIFORME



Fonte: O Autor (2023).

Dada a análise da Figura 10, independente da distribuição (triangular e uniforme, respectivamente, Figura 10a e 10b), observa-se que a incerteza nos parâmetros não resultou em decisões que refletissem uma mudança para todos os dez portfólios ótimos (vide Tabela 2, subseção 3.4.2), ou seja, a variabilidade testada não levou à recomendação de quatro portfólios específicos:  $p_3$ ,  $p_7$ ,  $p_9$ , e  $p_{10}$ .

Outra característica observada é a baixa variabilidade na ocorrência de portfólios para casos com baixo nível de incerteza em ambas as distribuições. A SMC obteve exclusivamente o portfólio de referência original ( $p_1$ ), considerando apenas 10% da variação dos parâmetros em todos os padrões.

Além disso, pode-se observar que em situações em que não podem ser feitas suposições sobre a distribuição de valores intermediários, ou seja, de acordo com uma PDF uniforme, o efeito da incerteza na simulação foi mais significativo. Em contraste, incertezas sob PDF triangular geram resultados “exatos” em relação à portfólio de referência original,

principalmente quanto menor o grau de incerteza do padrão de avaliação. Portanto, estabelece-se que os resultados de PDF uniformes representam uma análise menos conservadora, ou seja, implicam em maior sensibilidade aos padrões de avaliação.

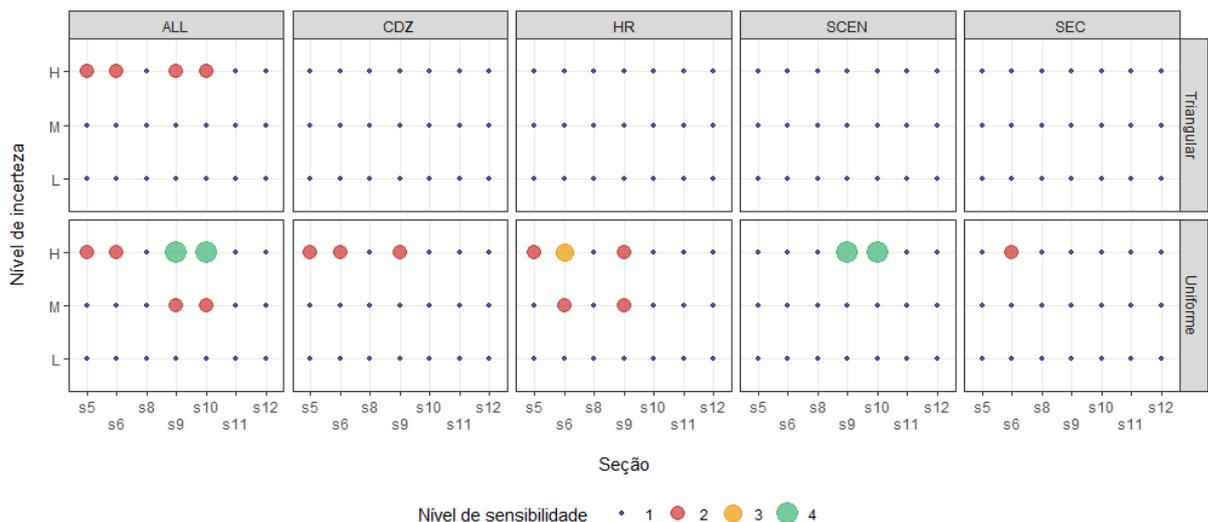
Para o experimento, a proporção de mudanças entre os portfólios recomendados é testada em relação a algumas proporções esperadas de referência – começando em  $\varphi_0 = 0.01$  e incrementando na ordem de  $\phi \geq 0.05$  – no nível de confiança de 95%. Portanto, com base nessa investigação estatística, é possível mostrar se e onde a incerteza na avaliação do cálculo do risco pode afetar a credibilidade dos resultados do modelo.

Cada nível de sensibilidade é definido em relação a uma faixa referente aos valores de  $\varphi_0$ . Por exemplo, para uma determinada seção, o nível 1 corresponde a uma proporção esperada inferior a 1%, o que significa que não há alteração significativa na seleção do portfólio de referência.

Além disso, se um padrão for avaliado com um certo nível de sensibilidade, esse é o nível mais alto em que os dados são estatisticamente significativos. Para ilustrar, dada a evidência da significância de  $\varphi_0 = 0.06$ , o experimento revela uma proporção entre 1% e 6% de mudanças no portfólio de referência original (configurando o nível 2). Em outras palavras, quanto menor o nível de sensibilidade, em função da proporção esperada de mudanças ( $\varphi_0$ ), mais robusto é o portfólio de referência original.

Com os resultados em mente, as informações de sensibilidade à nível das seções são exploradas usando uma ferramenta de visualização, como visto na Figura 11. Cada círculo nesta visualização exibe em uma escala graduada (de tamanho e cor) do nível de sensibilidade, sendo o maior designado pelo número 4.

Figura 11 – Apresentação do nível de sensibilidade das seções-chave



Esta ferramenta de visualização lista o conjunto de parâmetros, a modelagem probabilística, o nível de incerteza e as seções-chave. Com isso, o DM pode entender melhor a influência da variação do risco multidimensional para a formulação do portfólio ótimo em relação a seleção do conjunto de seções, permitindo assim mais insights na tomada de decisão. Adicionalmente, o Apêndice B apresenta em detalhes os resultados dos testes de proporção para cada padrão de avaliação.

Conforme discutido na subseção 3.4.2, o experimento da SMC deve ser direcionado para as seções-chave  $\{s_5, s_6, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}\}$ , uma vez que cinco áreas presentes no conjunto original dos portfólios ótimos ( $s_1, s_2, s_3, s_4, s_7$ ) não apresentam variabilidade nas modificações. Vale ressaltar que embora a aplicação deste estudo não considere todas as seções devido às premissas estabelecidas, o modelo permite que o DM explore, se necessário, as informações de sensibilidade ao longo de todo o escopo do gasoduto.

A avaliação necessária para esta investigação é entender dentro de cada padrão as implicações dos diferentes graus de incerteza e as proporções de referência que rejeitam a hipótese nula. Portanto, ao integrar essas informações, estabelece-se o nível de sensibilidade das seções em relação à distorção do portfólio de referência original, e assim a tomada de decisão pode ser melhor e mais fidedignamente orientada.

Portanto, confirmando uma observação previamente analisada ao nível do portfólio (ver Figura 10), para todos os grupos de parâmetros e ao menor grau de incerteza (ver Figura 11), obteve-se imediatamente um nível descritivo mais significativo no teste de proporção, o que significa que as seções foram avaliadas no nível de sensibilidade 1.

Outra observação interessante é que em todos os padrões de avaliação, as seções  $\{s_8, s_{11}, s_{12}\}$  foram sempre avaliadas no nível de sensibilidade 1. Esse achado demonstra que variações nos riscos multidimensionais não afetam a alocação dessas seções para a formulação do portfólio original recomendado.

Além disso, como visto na Figura 11, as avaliações dos padrões centrados nos valores originais (PDF triangular) não expressam sensibilidade significativa. Assim, os resultados obtidos na simulação para PDF triangular mostram que a proporção amostral ( $\hat{\varphi}_{s_i}$ ) dos trechos é significativamente menor do que a especificação analisada ( $\varphi_0 = 0.01$ ), configurando o nível de sensibilidade 1.

Portanto, não há diferença significativa quanto à seleção das áreas para o portfólio de referência original, exceto para o padrão ALL-H-T. Portanto, este é o único padrão para PDF triangular, no qual um nível de sensibilidade 2 pode ser inferido para as seções  $\{s_5, s_6, s_9, s_{10}\}$ ,

relativas à geração de uma recomendação diferente do portfólio de referência original (ou seja, significância para  $\varphi_0 = 0.06$ ).

Em situações envolvendo a variação de 15% no nível de incerteza (para PDF uniforme), não são observadas alterações substanciais na seleção dos trechos em relação à recomendação do modelo. Assim, isso significa que a maioria dos conjuntos de parâmetros contribui com menos de 1% de incerteza na saída ( $\varphi_0 = 0.01$ ), exceto para os padrões HR-M-U e ALL-M-U. Ambos alcançaram um grau de sensibilidade no nível 2 ( $\varphi_0 = 0.06$ ), o que significa que a incerteza na saída, capturada do modelo quanto ao teste de proporção, revela que esses dois conjuntos de fatores são responsáveis por uma variação na saída entre 1% e 6%. A sensibilidade está no nível 2 para as seções  $\{s_9, s_{10}\}$  no padrão ALL-M-U e  $\{s_6, s_9\}$  no padrão HR-M-U.

Além disso, embora a análise menos conservadora tenha sido identificada para a PDF uniforme, curiosamente ela apresenta mais situações de sensibilidade apenas para níveis significativos de incerteza dos parâmetros envolvidos.

A princípio, um nível de sensibilidade 2 também é observado para os padrões CDZ-H-U e SEC-H-U. Portanto, mesmo diante de mudanças mais acentuadas no CDZ ou SEC, a volatilidade da decisão é inferior a 6%.

Uma análise comparativa de padrões de avaliação semelhantes (mesmo nível de incerteza e modelagem probabilística) revela que os resultados dos padrões CDZ e HR apresentam analogias. As seções  $\{s_5, s_9\}$ , em ambos os padrões, são avaliadas no nível de sensibilidade 2. Entretanto, no padrão HR-H-U, a seção  $s_6$  tem um nível de sensibilidade 3, indicando a geração de uma recomendação diferente da portfólio de referência original, referente a esta seção, de 6% a menos de 11% das ocorrências (ou seja, significância para  $\varphi_0 = 0.11$ ).

Do ponto de vista da distribuição uniforme, a observação mais marcante foi que dois padrões específicos, SCEN-H-U e ALL-H-U, apresentaram resultados substanciais. Considerando a ocorrência de mudança significativa no nível de incerteza, nesses padrões de avaliação, a importância relativa dos fatores tem relevância moderada na saída do modelo (entre 11% e 16%), configurando um nível 4 de sensibilidade para as seções  $\{s_9, s_{10}\}$ . E em relação ao padrão ALL-H-U, ainda se tem a indicação do nível de sensibilidade 2 para as seções  $\{s_5, s_6\}$ .

Portanto, essa evidência mostra que o DM deve estar atento a um exame mais cauteloso dos fatores relacionados ao padrão SCEN, principalmente associados às seções  $\{s_9, s_{10}\}$ . Considerando também circunstâncias que podem afetar o planejamento das áreas mais críticas,

destaca-se a influência moderada do padrão HR neste estudo, ou seja, os parâmetros intrínsecos a esse padrão também devem ser mais bem controlados.

Além disso, explicitamente em relação às seções  $\{s_9, s_{10}\}$ , também foi notável a influência conjunta de todos os parâmetros (ALL) de cálculo de risco na formulação dos portfólios. Portanto, uma análise mais aprofundada reforça que a sensibilidade dessas duas seções contribui para a discussão obtida sobre a RR entre os dois principais portfólios ótimos (vide Tabela 2). Ou seja, em primeiro lugar, a distinção entre as portfólios  $p_1$  e  $p_2$  reside justamente na troca entre as seções  $s_{10}$  e  $s_9$ , e, posteriormente, nota-se um pequeno aumento do risco da portfólio  $p_2$  para  $p_1$  quando comparado ao aumento do risco da portfólio  $p_3$  para  $p_2$ .

Assim, dentre o conjunto de portfólios, aquele que geralmente aparece com maior frequência relativa nas simulações substituindo a portfólio de referência original é  $p_2$ . Então, agregando essas informações, é possível fornecer ao DM uma comparação de relevância entre as opções de portfólio recomendadas. Assim, facilita-se a melhor alocação das ações de mitigação e combate aos riscos nas condições envolvidas.

#### 4.4.2 *Resumo das descobertas da análise de sensibilidade global*

Em suma, considerando a primeira questão de pesquisa, baseando-se em todo o background analisado, independentemente do padrão de avaliação, o portfólio composto pelas seções mais críticas em relação ao risco multidimensional tende a permanecer sendo o original,  $p_1$ .

Considerando outras informações de sensibilidade, pode-se observar mais de perto o portfólio esperado na simulação. Dado que para as seções podem ocorrer variação na avaliação de riscos multidimensionais, devido às incertezas inerentes, pode-se estabelecer o conjunto esperado de áreas escolhidas para a formulação do portfólio.

Nesse sentido, foi possível verificar que a sensibilidade das seções implicou na configuração de um portfólio esperado igual ao portfólio de referência original ( $p_1$ ). Além disso, a modelagem evidenciou que as influências da recomendação final não incluem todos os portfólios ótimos no conjunto inicial. Portanto, os indicativos suportam a robustez do modelo de seleção de portfólio baseado em risco, uma vez que se obtém uma recomendação confiável sobre um conjunto de trechos críticos do gasoduto.

Por fim, em relação à segunda questão de pesquisa, destaca-se que grupos de parâmetros envolvendo HR e SCEN são mais críticos para influenciar a tomada de decisão, com destaque para situações de incerteza significativa. Na prática, isso significa que o DM deve conhecer e

controlar melhor esses grupos de parâmetros, essencialmente porque estão associados a níveis de sensibilidade consideráveis para algumas seções que compõem o portfólio recomendado. Assim, isso reforça que explorar os parâmetros de um modelo ajuda a melhorar a qualidade das decisões de gestão de risco, considerando como lidar com diferentes contextos de incerteza.

Deve-se destacar também a sensibilidade relativa a possíveis mudanças em todos os parâmetros do modelo (ALL), considerando também um alto nível de incerteza (próximo de 20%).

Portanto, ao cruzar todas as informações previamente relatadas como resposta imediata às incertezas na medida de avaliação de risco multidimensional, a recomendação do modelo proposto pode ser seguida com mais segurança. Com isso, os gestores das empresas de transporte de gás natural podem ajustar uma melhor alocação dos recursos de mitigação do risco. Nesse sentido, o portfólio de referência original está intimamente relacionado às seções mais críticas, mesmo considerando incertezas de parâmetros cruciais.

#### 4.5 Análise complementar: sensibilidade em relação a restrição

Como a modelagem também é baseada na formulação matemática do problema da mochila binária, existem condições relacionadas a restrições que podem impactar na recomendação final. Assim, outro contexto de pesquisa pode ser destacado, como a incerteza no consumo de recursos nas seções e no limite de recursos envolvidos para o gasoduto.

Para melhor explorar a análise do modelo PSIE, é realizada também uma análise de sensibilidade que incorpora possíveis fontes de variação nos dados relacionados com a restrição do problema (custos OPEX).

Desse modo, considerou-se analisar em um cenário a parte, apenas variações nos custos devido a influências ao longo do tempo sobre vários fatores tangíveis e intangíveis, como variações diretamente relacionadas à instalação física (deterioração, por exemplo) e fatores relacionados ao custo do processo de gerenciamento (preço dos materiais, custo da mão de obra, entre outros).

Assim, como esses parâmetros também podem apresentar diferentes níveis de incerteza e as distribuições reais são desconhecidas, além das variações apresentadas na Tabela 3, foi investigado uma variação extrema (E – *extreme*) de 25%, de acordo com as distribuições uniforme e triangular.

Diante disso, é possível explorar o espaço de variação dos valores de custo e avaliar melhor a robustez da recomendação final ao DM. Portanto, para cada uma das análises, neste

caso foram realizadas 100.000 iterações para observar os resultados relacionados ao comportamento dinâmico do processo de flutuação dos custos, totalizando 800.000 repetições.

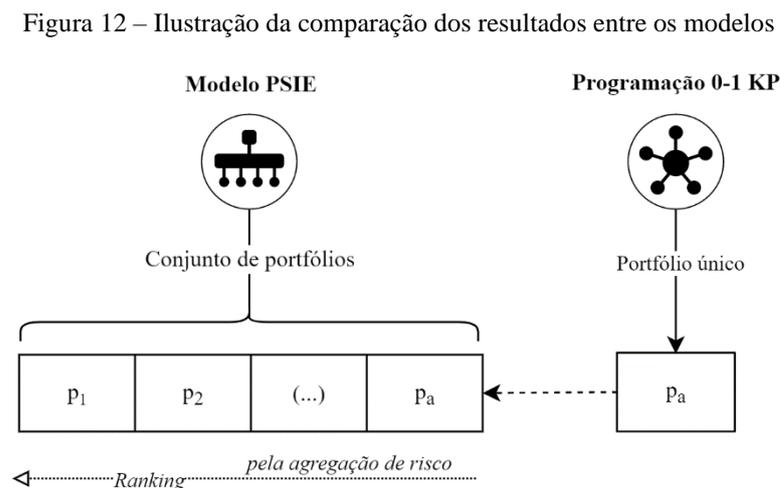
Ressalta-se que nesta parte da investigação, o termo robustez mostra a força do modelo, de acordo com as condições específicas em análise, na obtenção de soluções de referência (portfólios). Em outras palavras, quanto maior a “frequência” do aparecimento das soluções de referência durante as iterações, mais robusta será a saída.

#### 4.5.1 Resultados da análise de sensibilidade quanto aos custos

Primeiramente, serão feitas comparações entre as semelhanças e diferenças das recomendações entre os dois modelos (PSIE e 0-1 KP). Em seguida, serão avaliadas as frequências dos diferentes portfólios de referência obtidos.

Diante de todos os resultados da simulação, observou-se uma característica importante: as soluções encontradas no modelo PSIE são no mínimo iguais ou relativamente superiores às obtidas pela programação 0-1 KP em termos de risco multidimensional agregado ( $r_{p_a}$ ).

Em detalhe, em apenas 3.387 casos (de 800.000 replicações) houve igualdade de recomendação entre os modelos, o que representou a situação em que o modelo PSIE encontrou apenas um portfólio ótimo na árvore de busca em um determinado nível  $t$ . Nos demais casos, o portfólio encontrado com a programação 0-1 KP sempre representou a última posição do conjunto de soluções ordenadas obtidas com o modelo proposto, conforme ilustrado na Figura 12.



Fonte: O Autor (2023).

Esse contexto mostra que, para uma mesma variação em ambas as distribuições, o modelo PSIE pode combinar as seções mais relevantes para formar portfólios, superando a distorção dos resultados devido à escala intervalar. Por outro lado, na programação 0-1 KP (sem

a transformação de escala), observa-se que trechos com baixo risco e custo acabam sendo preferidos a trechos melhores, mesmo que esses tenham os custos mais elevados (MAVROTAS; DIAKOULAKI; KOURENTZIS, 2008).

Assim, de acordo com os resultados do modelo PSIE, é possível atingir pelo menos o mesmo nível dos resultados da programação 0-1 KP ou melhorar o desempenho das soluções. Assim, o DM sempre cobre dentro da gestão de risco do GGN as seções mais críticas.

Outro fato que chamou a atenção para os resultados da simulação para os dois modelos foi a existência de soluções não padronizadas, representando portfólios que não faziam parte do conjunto  $O^3$ , compreendendo 14 combinações diferentes. Esta situação mostra uma mudança no espaço de soluções viáveis com a variação dos custos.

Assim, eventualmente, em cada cenário simulado nesta análise, algumas combinações passaram a fazer parte do conjunto de soluções, e outras também saíram desse conjunto. Considerando todos os cenários, a programação 0-1 KP tem maior frequência de portfólios de referência não padrão para ambas as distribuições, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Frequência dos portfólios de referência originais e não padronizados

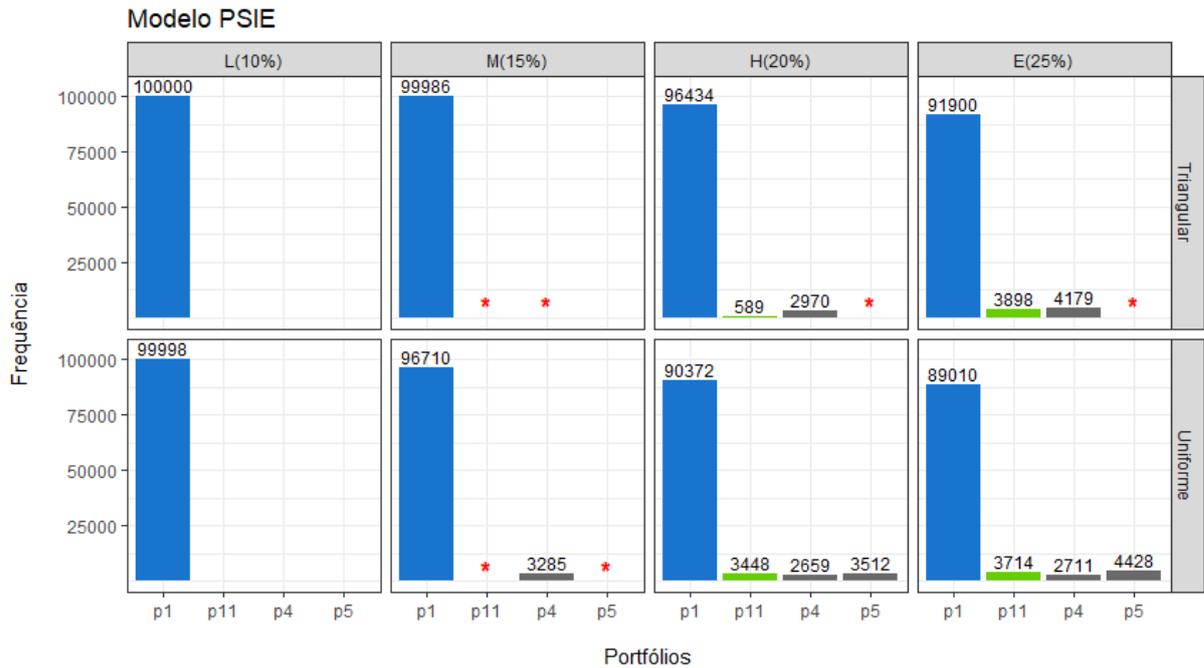
Abordagem	Distribuição	Conjunto original ( $O^3$ )	Conjunto não padrão
Modelo PSIE	U	392724	7276
	T	395503	4497
Programação 0-1 KP	U	373973	26027
	T	380168	19832

Fonte: O Autor (2023).

Assim, considerando apenas os portfólios obtidos na simulação com o modelo PSIE como foco, observou-se que quatro combinações se destacaram ( $p_1$ ,  $p_4$ ,  $p_5$  e  $p_{11}$ ), das quais apenas uma estava relacionada ao conjunto de portfólios não padronizados (portfólio  $p_{11}$ , com vetor  $X^3 = (1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1)$ ). A Figura 13 mostra as frequências dessas quatro combinações principais divididas por variação e tipo de distribuição, com destaque para os portfólios  $p_1$  e  $p_{11}$  (respectivamente nas cores azul e verde).

Esta figura também mostra os portfólios que apresentaram frequências consideravelmente mais baixas (inferiores a 50), indicadas por “\*”. Além disso, não houve ocorrências para os portfólios  $p_{11}$ ,  $p_4$  e  $p_5$  no cenário de variação de 10% e nem para o portfólio  $p_5$  no cenário de variação de 15%.

Figura 13 – Frequências dos portfólios obtidos na SMC para o modelo PSIE



Fonte: O Autor (2023).

Como pode ser visto, o portfólio de referência da recomendação original (o portfólio  $p_1$ ) permanece em todos os cenários como o mais frequente dentre outros para o modelo PSIE. Além da frequência, uma observação adicional ao comparar esses quatro portfólios foi que: o portfólio de referência  $p_1$  é 0,0021%, 0,0092% e 0,0102% maior quanto ao risco multidimensional agregado de  $p_{11}$ ,  $p_4$  e  $p_5$ , respectivamente, considerando ambas as distribuições de probabilidade.

Portanto, diante dessa análise, o que se atesta é o potencial do modelo PSIE em fornecer resultados mais robustos também quanto à variação de custos, visto que o nível de incertezas não afetou significativamente a recomendação ao DM pelo portfólio  $p_1$ . Assim, garante-se uma combinação dos trechos GGN com os maiores índices de risco agregado dadas as restrições consideradas.

Ainda considerando os quatro portfólios principais obtidos na simulação pelo modelo PSIE, as diferenças entre eles estão nas seções  $s_5$ ,  $s_6$ ,  $s_8$  e  $s_9$  (vide Tabela 2 e descrição do  $p_{11}$  anteriormente). Assim, analisando mais detalhadamente a sensibilidade de inclusão dessas seções no portfólio de referência, conforme apresentado na Tabela 5, pode-se observar que entre as 100.000 repetições em cada variação, as seções  $s_5$ ,  $s_8$  e  $s_9$  apresentaram uma alocação consideravelmente menor no portfólio de referência, diferentemente da seção  $s_6$ , que apresentou frequência significativa. Assim, reforça-se mais uma vez a recomendação de combinar as seções que compõem o portfólio  $p_1$ .

Tabela 5 – Frequência de seções incluídas no portfólio de referência

Distribuição	Variação	Seção			
		S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>
U	25%	2731	89130	3725	4552
	20%	2661	90379	3449	3520
	15%	3285	96712	1	4
	10%	0	100000	0	2
T	25%	4179	91900	3899	23
	20%	2970	96435	589	7
	15%	4	99987	9	1
	10%	0	100000	0	0

Fonte: O Autor (2023).

Além disso, uma pequena variação na incerteza dos custos OPEX resultou em uma menor probabilidade de variação nas soluções encontradas. Para as duas distribuições, a variação de 10% não produziu mudanças significativas em relação às recomendações obtidas com a modelagem inicial da aplicação numérica.

Quando a distribuição triangular foi considerada, notou-se um efeito mais conservador na obtenção das soluções do conjunto inicial ( $O^3$ ) em relação aos portfólios não padronizados para os dois modelos.

Por fim, pode-se estimar que o algoritmo de enumeração implícita desenvolvido no modelo PSIE tem uma eficiência considerável na identificação do conjunto de portfólios de fronteira. Adicionalmente, foi possível estimar que a complexidade do algoritmo proposto está relacionada à combinação entre a profundidade da árvore ou nível final de busca ( $t$ ) e o tamanho do problema ( $n$ ), conforme visto na equação 12 (CORMEN *et al.*, 2009).

$$C_{n,t} + (t - 1) = \frac{n!}{(n - t)! (t!)} + (t - 1) \quad (12)$$

Assim, o pior caso para o algoritmo (uma situação que requer o número mais significativo de operações) seria a repetição de  $C_{n,t} + (t - 1)$  operações. No entanto, após considerar todos os cenários simulados, notou-se um ganho significativo de desempenho, em que o pior caso nunca foi alcançado.

Detalhadamente, considerando que a parcela mais significativa dos resultados da simulação (99%) apontava para um portfólio composto por 9 itens (chegando ao nível 3), o pior cenário seria de 222 operações, enquanto o comportamento estimado era em média de apenas 20 operações.

Assim, este resultado mostra o potencial de enumerar implicitamente muitas soluções, eliminando regiões que não podem levar a uma solução melhor. Além disso, houve uma redução média no número de iterações necessárias para obter uma solução viável de 86,44% em relação à programação 0-1 KP.

#### 4.6 Síntese do capítulo

Este capítulo estrutura sobre o modelo de decisão (apresentado no capítulo anterior) o suporte de uma análise de sensibilidade global sobre a seleção de seções mais críticas que compõem o gasoduto, considerando a restrição financeira relacionada.

O protocolo da análise de sensibilidade global permitiu uma investigação aprofundada de como a variação das entradas do modelo, em termos de parâmetros de risco multidimensionais e da restrição financeira, podem afetar as decisões sobre o portfólio de referência recomendado. Como vantagem, foi possível prover maiores informações ao DM sobre o comportamento das soluções do problema, permitindo mostrar que o portfólio de referência original é confiável na recomendação para decisões futuras envolvendo ações de mitigação.

Adicionalmente, a estrutura da análise de sensibilidade global proposta promove a cobertura de algumas lacunas apontadas em estudos anteriores (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016; SALTELLI *et al.*, 2019), como:

- i) consideração de uma análise integrada de incerteza e sensibilidade do problema;
- ii) estudo global do comportamento dos parâmetros de modelagem; e
- iii) visão da sensibilidade para decisão em oposição à abordagem do comportamento numérico dos parâmetros.

Assim, esta tese agrega à literatura uma contribuição quanto a problemática de portfólio para GGN, em vista também do suporte da análise de sensibilidade envolvendo a decisão baseada em risco. Então, o procedimento estruturado nesse trabalho propicia ao DM uma vasta gama de informações sobre o procedimento de formulação do portfólio das seções críticas do gasoduto. Isso permite um maior controle e apoio na tomada de decisão.

Contudo, a implementação manual da abordagem proposta pode ser complexa e sujeita a erros. Com isso, a construção de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) permite agilidade e eficiência no processo decisório. Em outras palavras, o SAD promove a automatização da aplicação do modelo, realização de cálculos precisos e oferece uma visualização dos resultados de maneira clara e intuitiva. Diante disso, o capítulo seguinte apresenta o detalhamento da construção do SAD para suporte à abordagem desta tese.

Adicionalmente, é possível ajustar a modelagem completa de seleção de portfólio (em conjunto com a análise de sensibilidade) para outros tipos de dutos, como os que transportam hidrogênio, uma vez que a estimativa de riscos depende das propriedades físico-químicas do gás e de questões de transporte.

Vale ressaltar que a metodologia de avaliação de riscos multidimensionais já foi estabelecida na literatura para tratar de outros tipos de problemática para dutos de hidrogênio (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010; KANG *et al.*, 2023; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016; RUSSO; DE MARCO; PARISI, 2020; VIANA *et al.*, 2022a).

Sendo assim, por meio dessa nova perspectiva, foi desenvolvido também um modelo de decisão baseado em portfólio para aprimorar a mitigação de riscos multidimensionais em seções de dutos de hidrogênio, de acordo com o trabalho recém-publicado em periódico (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2023b).

## 5 SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA GERENCIAMENTO ESTRATÉGICO DE RISCOS EM GGN

Para facilitar a aplicação e o uso de abordagens MCDM/A, sistemas informatizados geralmente são desenvolvidos para auxiliar a tomada de decisão. Nesse sentido, levando em consideração a complexidade do problema de gerenciamento de riscos para Gasodutos de Gás Natural (GGN) e toda a modelagem proposta, conforme discutido ao longo desta tese, foi desenvolvido um SAD para fornecer suporte automatizado para essa problemática (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2023a).

### 5.1 Descrição do sistema

O sistema é intitulado como *Opte: Multidimensional Risk for Portfolio Selection in Natural Gas Pipelines*, e ele implementa as metodologias apresentadas nos capítulos anteriores. Esse SAD foi desenvolvido de forma colaborativa entre o Grupo de Pesquisa em Análise de Risco e Modelagem em Meio-ambiente, Ativos, Segurança, Operações e Natureza (REASON) e o Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão (CDSID).

O SAD já possui registro no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), BR5120230018589. Além disso, a versão final do sistema está disponível mediante solicitação no endereço de e-mail do grupo de pesquisa REASON (reason.ufpe@gmail.com).

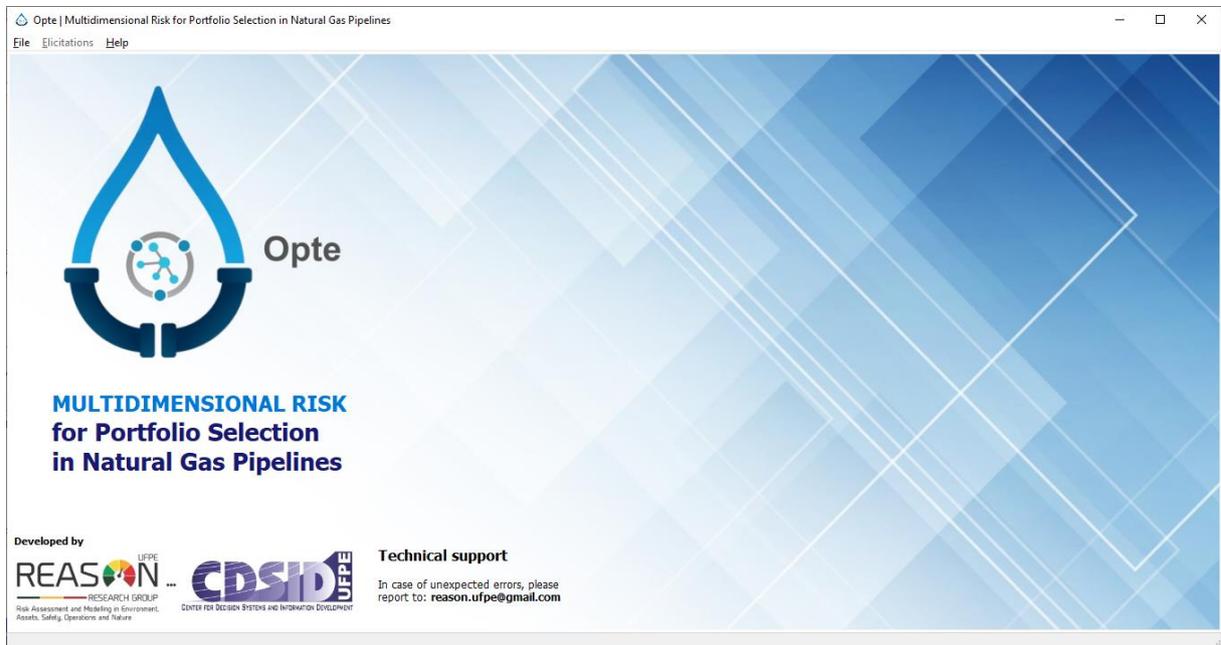
A respeito do desenvolvimento desse sistema, buscou-se explorar diversos aspectos, como usabilidade, confiabilidade e robustez, no intuito de prover uma boa experiência de uso e conseqüentemente proporcionar resultados consistentes na tomada de decisão. Na Figura 14 é possível observar a interface de abertura do SAD, cuja arquitetura e modulação serão detalhados nas próximas subseções.

Ainda com relação ao desenvolvimento do SAD, o mesmo foi escrito em Delphi como uma aplicação *desktop* para *Windows* e utiliza um Ambiente de Desenvolvimento Integrado próprio (IDE – *Integrated Development Environment*). Essa linguagem de programação é uma extensão do *Object Pascal*, que foi arquitetada para uso na área de programação orientada a objetos.

Apesar de ter sido desenvolvido para *Windows*, a biblioteca FireMonkey pode ser utilizada para compilar o projeto para código nativo em macOS, Android, iOS e Linux. Contudo, para que a utilização deste sistema atenda às necessidades do usuário, faz-se necessário um requisito computacional: que a máquina possua o pacote *Microsoft Office*. Além

disso, o SAD faz integração com uma ferramenta para criação de gráficos e visualização de dados, a biblioteca gráfica *TeeChart*.

Figura 14 – Interface inicial do SAD criado com base no modelo proposto

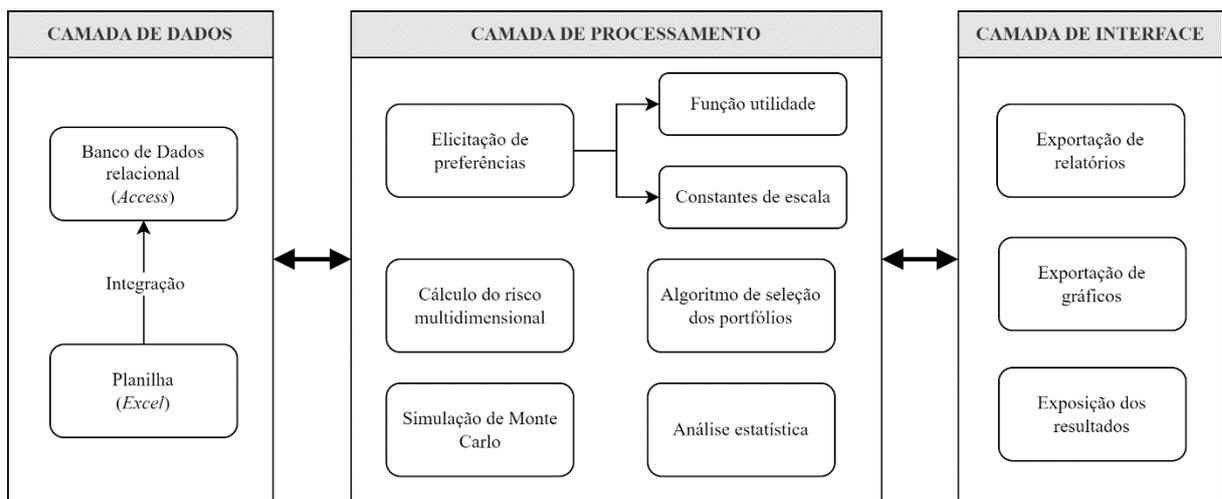


Fonte: O Autor (2023).

## 5.2 Arquitetura do software

A arquitetura do SAD é composta de três camadas principais (conforme Figura 15): i) a camada de dados; ii) a camada de processamento; e iii) a camada de interface com o usuário.

Figura 15 – Arquitetura do SAD em função das camadas



Fonte: O Autor (2023).

A camada de dados é responsável pelo armazenamento, acesso e gerenciamento dos dados utilizados pelo sistema para o processo decisório. Essa camada é fundamental para

garantir a integridade e consistência dos dados, além de fornecer uma interface para que as outras camadas possam acessar e manipular esses dados.

A camada de dados é implementada através do sistema de gerenciamento de dados relacionais do *Microsoft Access*. Esse sistema de gerenciamento é usado para armazenar, organizar e recuperar dados de forma eficiente através de tabelas.

Essa estrutura de dados revela-se organizada e consistente devido ao fato de o relacionamento entre as tabelas ser estabelecido por meio de chaves primárias e estrangeiras. Assim, o Banco de Dados (BD) se torna altamente escalável, confiável e seguro. Um esboço dessas relações dentro do banco de dados relacional do SAD pode ser visto na Figura 16.

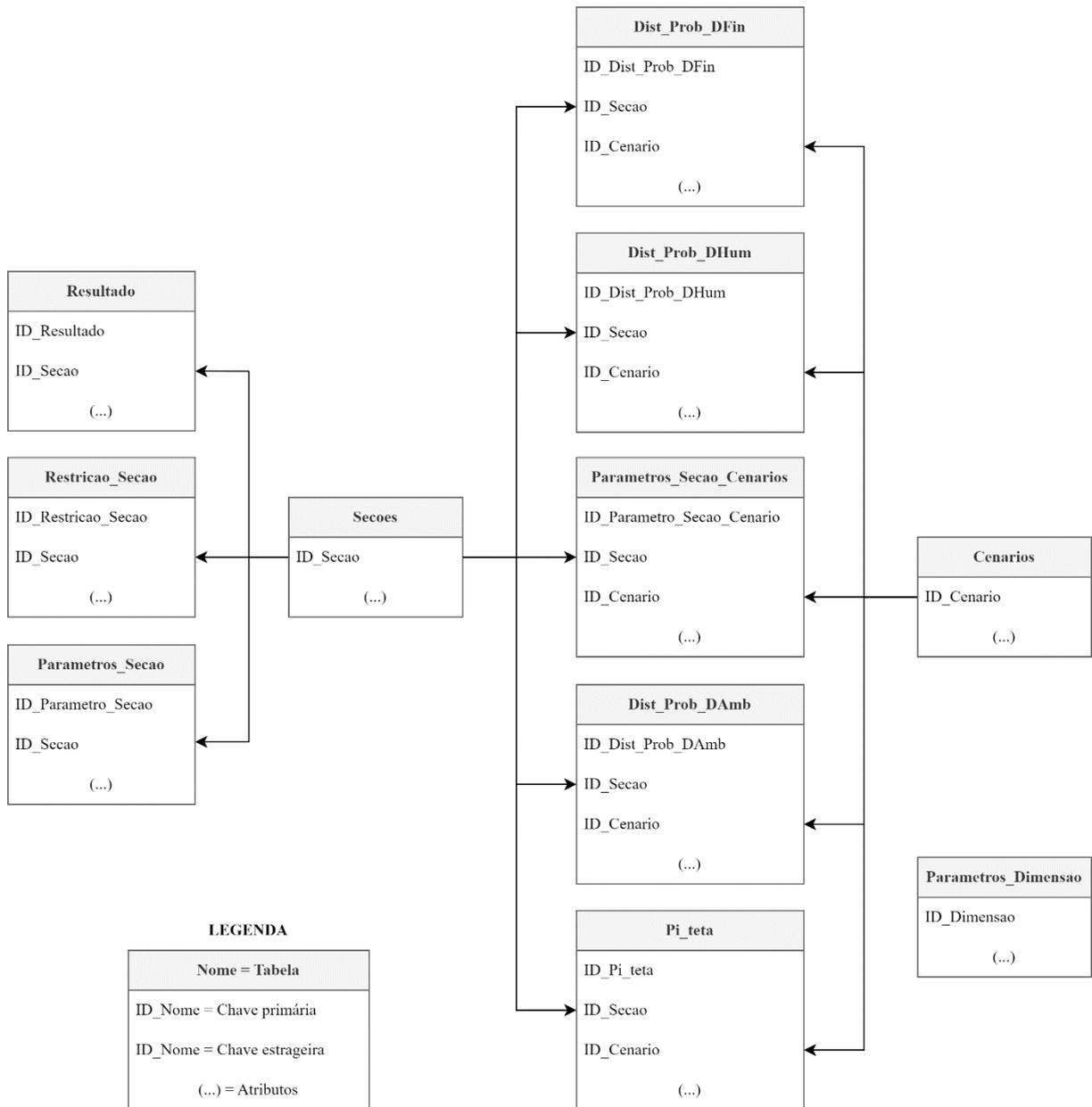
Devido a outras necessidades específicas do sistema, a camada de dados também permite o armazenamento em arquivo, como planilhas (editadas através do *Microsoft Excel*) e documentos de texto separados por vírgulas (CSV – *Comma-Separated Values*).

Por sua vez, a camada de processamento é responsável pelo processamento lógico dos dados. Nessa camada, o SAD utiliza do modelo MCDM/A e do algoritmo de enumeração implícita desenvolvido para analisar e manipular os dados de maneira a produzir informações úteis para o processo decisório, isto é, os portfólios ótimos. Além disso, nessa camada é possível realizar também o processo de coleta das informações sobre as preferências do DM, bem como a modelagem estatística para avaliar a sensibilidade do modelo e fornecer insights sobre a robustez e confiabilidade das decisões tomadas.

Finalmente, na camada de interface com o usuário, o SAD apresenta as informações resultantes do processamento de dados de maneira clara e acessível, permitindo que os usuários possam visualizar, explorar e interagir com as informações de forma intuitiva.

Em resumo, a camada de interface é responsável por apresentar informações, receber entradas, gerenciar a navegação e permitir a personalização da experiência do usuário. Essa camada também é responsável por garantir que a aparência e o comportamento do sistema sejam consistentes em todas as telas.

Figura 16 – Estrutura do banco de dados relacional



Fonte: O Autor (2023).

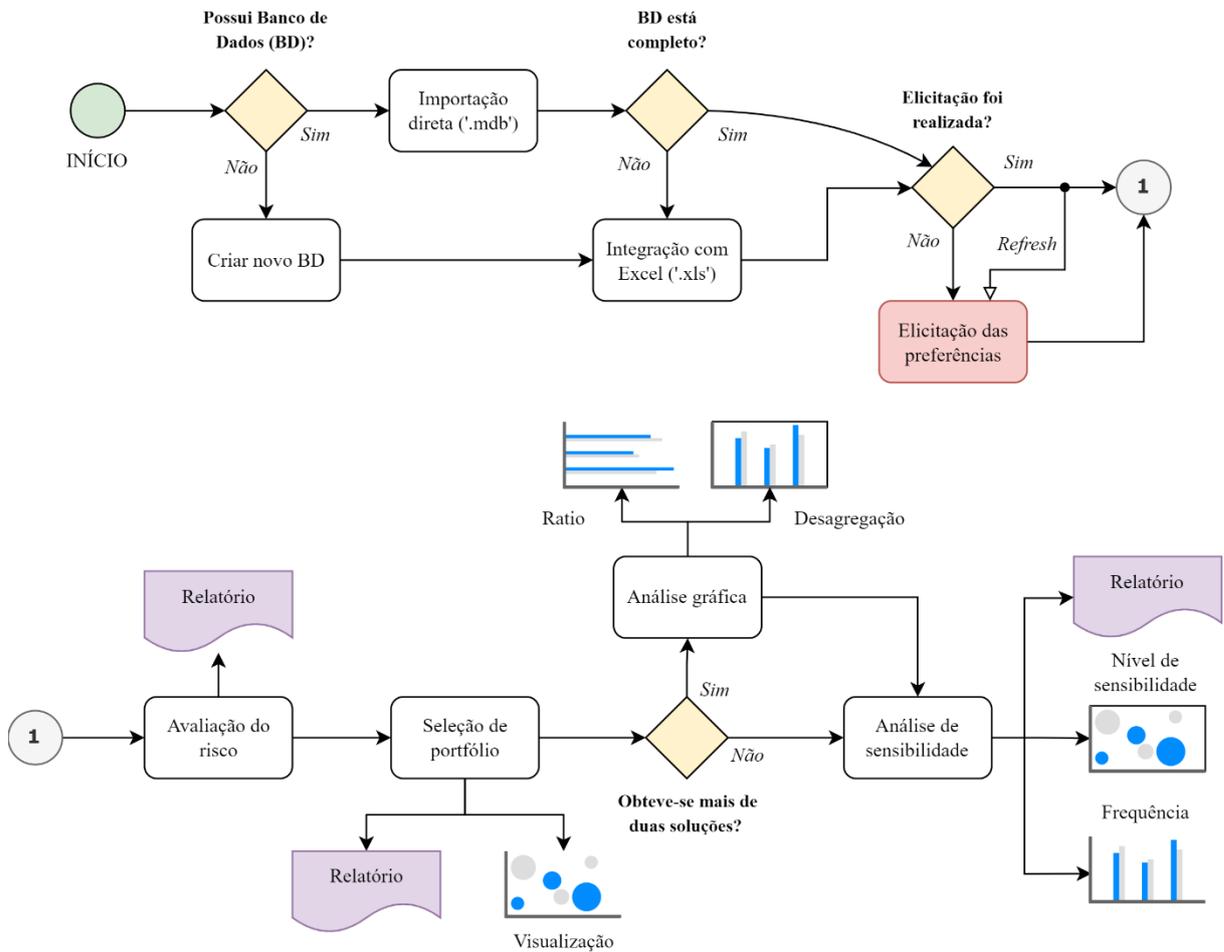
### 5.3 Modularização do SAD

A modularização permite que o desenvolvimento de software seja dividido em módulos que possuem funções específicas. Os módulos são componentes que possuem interfaces definidas, as quais se comunicam entre si.

A respeito disso, a execução do SAD é didaticamente dividida em três módulos primários: i) A avaliação multidimensional do risco das seções; ii) A seleção do(s) portfólio(s) das seções do gasoduto; iii) A análise de sensibilidade do modelo às diferentes variáveis e incertezas que afetam a decisão.

Além disso, pode-se citar um módulo secundário que envolve a modelagem das preferências do DM em termos de funções utilidade e a definição das constantes de escala. Para auxiliar no entendimento dos módulos do SAD, a Figura 17 apresenta a sequência de ações possíveis para execução completa do software.

Figura 17 – Estrutura das etapas de execução do SAD



Fonte: O Autor (2023).

### 5.3.1 Inicialização do SAD

O Banco de Dados (BD) é a fonte primária de dados para o SAD e fornece a base sobre a qual o sistema funciona. Em outras palavras, o BD serve para reduzir inconsistências de manipulação, manter integridade, garantir independência e compartilhamento dos dados.

Conforme exposto na subseção anterior, esse software utiliza o sistema de gerenciamento de BD da *Microsoft (Access)*. É importante destacar a praticidade em importar um BD já existente, o qual tenha sido coletado e organizado anteriormente.

Contudo, conforme exposto na Figura 17, o BD pode ser criado pelo próprio usuário. Entretanto, por se tratar de uma tarefa delicada (envolvendo muitos parâmetros relacionados

com o gasoduto), o SAD estabelece a necessidade do DM (em conjunto com os outros atores do processo) coletar os dados previamente necessários – conforme uma *template* (disponível no *Help* do software) – em uma planilha única (editada através do *Microsoft Excel*), para na sequência realizar a unificação junto ao BD.

Somente após preencher corretamente todos os dados referentes à entrada de informações, incluindo a obtenção de preferências, é que o DM poderá aplicar a modelagem de avaliação dos riscos multidimensionais para o gasoduto de gás natural e, em seguida, realizar a análise dos portfólios das seções.

### 5.3.2 Módulo de elicitação das preferências

Para a execução de qualquer modelagem MCDM/A, faz necessário compreender e caracterizar o comportamento de um indivíduo, o DM, em relação as suas preferências e objetivos em relação à situação problemática. Para tanto, este módulo secundário é responsável pela obtenção desses valores de preferências.

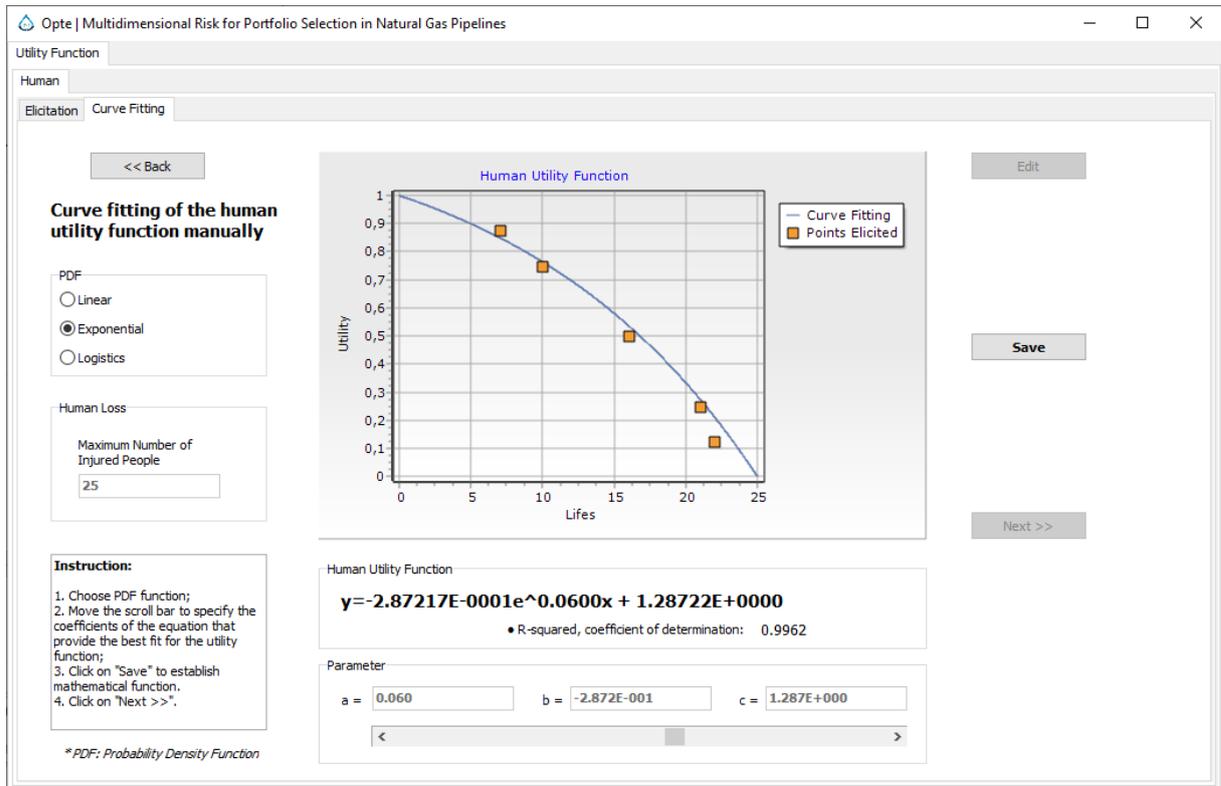
Ainda a respeito disso, estabelece-se que a estrutura de preferência do DM deve espelhar a estrutura de preferência da empresa que ele faz parte. Adicionalmente, espera-se que o DM possua algum conhecimento e experiência em análises MCDM/A, caso contrário, ele deve contar com o apoio de um grupo de especialistas para lidar com o contexto.

Conforme aponta de Almeida *et al.* (2022), a estrutura de preferências do DM pode ser modelada de diferentes maneiras. Para este módulo do SAD, utilizou-se como base o procedimento de elicitação da função utilidade multiatributo proposto por Keeney e Raiffa (1976), envolvendo principalmente a avaliação das funções utilidades condicionais e das constantes de escala.

Cabe ressaltar que durante a elicitação da função utilidade, é considerado um intervalo fechado de consequências, com o valor máximo representando uma consequência nula (ou seja, a ausência de impactos acidentais) e o valor mínimo sendo determinado pela maior das consequências estimadas (ou seja, a pior perda possível).

Este módulo secundário realiza separadamente para cada atributo de decisão o procedimento de elicitação. A abordagem usa uma sequência estruturada e gradual de questões para guiar o DM na determinação das preferências. Posteriormente, com o auxílio de ferramentas gráficas, o DM pode ajustar os pontos elicitados ao formato da função utilidade que melhor reflita sua estrutura de preferências. Para tanto, em relação ao estabelecimento das funções, o DM dispõe do coeficiente de determinação para avaliar a qualidade do ajuste aos dados elicitados. A Figura 18 exemplifica a interface do ajuste de curva da função utilidade.

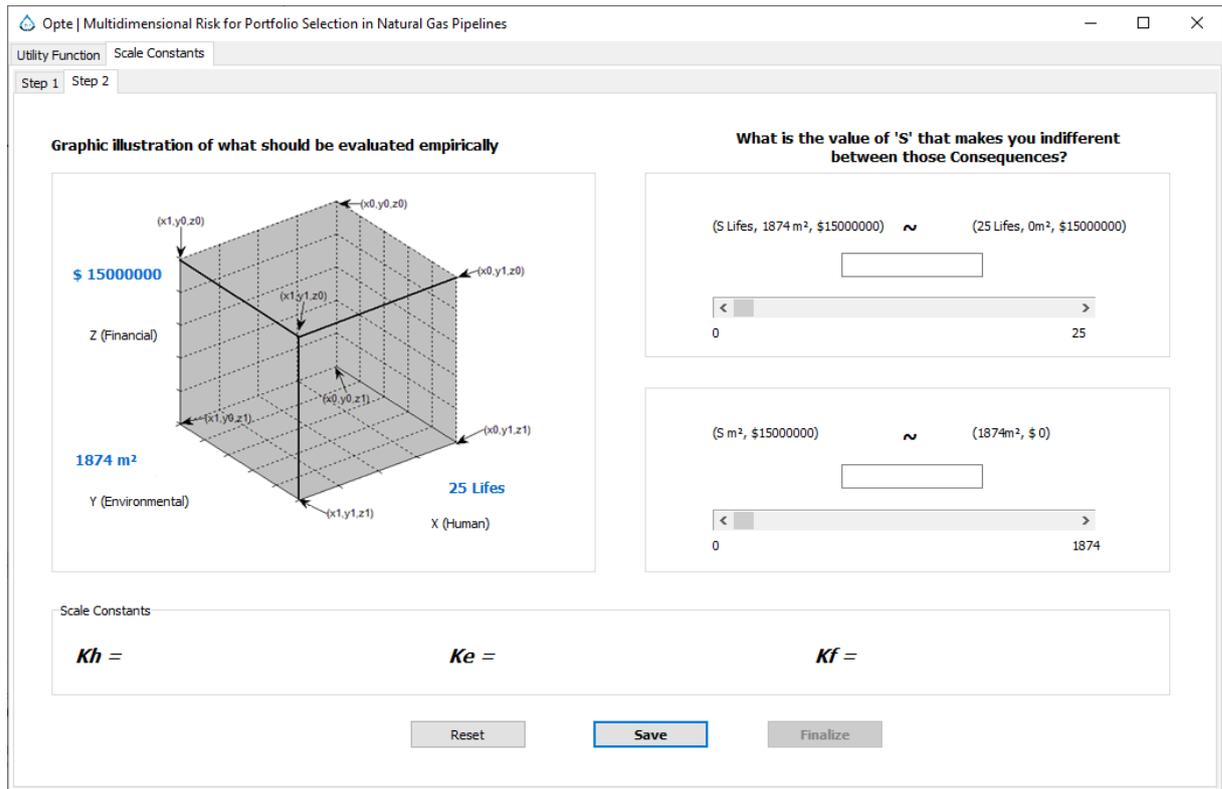
Figura 18 – Interface do ajuste de curva para uma das funções utilidade



Fonte: O Autor (2023).

A última etapa do processo de elicitação deste módulo é a avaliação intercritério, na qual são obtidas as constantes de escala, que servem para agregar os critérios do problema. Vale destacar que as constantes de escala representam a razão entre os critérios, considerando o conjunto de consequências presentes em cada um deles (DE ALMEIDA *et al.*, 2022). A Figura 19 apresenta a interface dessa etapa final do processo de elicitação.

Figura 19 – Interface de uma parte da elicitação das constantes de escala



Fonte: O Autor (2023).

### 5.3.3 Módulo de avaliação dos riscos

De posse dos todos os parâmetros básicos, relacionados ao gasoduto e a estrutura de preferências, é possível dar sequência a execução do primeiro módulo do SAD. Neste módulo são implementadas todas as abordagens descritas na seção 3.2, no que tange a avaliação dos riscos multidimensionais das seções do gasoduto, conforme o modelo de Brito e de Almeida (2009). A Figura 18 expõe a interface desse módulo após sua devida execução.

Além disso, nesse módulo também é possível fazer comparações dos incrementos de riscos, a partir do exame das diferenças entre os riscos de cada seção do gasoduto (similar a equação 7 utilizada a nível de portfólio na subseção 3.4.2). Nessa perspectiva, com base na Figura 18, o DM pode, por exemplo, observar que a diferença de risco entre as seções 6 e 12 é aproximadamente 6,81 vezes maior, ou mais preferível, do que a diferença de risco entre as seções 12 e 8.

Figura 20 – Interface do módulo de avaliação dos riscos

**Summary of risk assessment of natural gas pipelines**

Section	Mult. Risk (MR)	Human Risk	Environmental Risk	Financial Risk	Absolute Difference (E-05)	Ratio
Section 7	-0.998126827587171	-4.40203247986058E-8	-0.000606428820120724	-1.3758610582658E-11	1.54758475138572	0.42517921434443
Section 11	-0.998281586062309	-1.019998655261E-6	-0.00235799338281598	-6.61908445843865E-10	3.63984103449622	2.23528342661058
Section 6	-0.998645570165759	-7.86414525699013E-10	-0.000782085463892736	-3.04315770452725E-12	1.62835772464676	6.81400536718104
Section 12	-0.998808405938223	-3.34580593953712E-7	-0.00121574856060332	-1.41884233630508E-10	0.238972181103581	0.578105044203629
Section 8	-0.998832303156334	-1.11390962345579E-8	-0.00109714184812672	-2.15927526791718E-12	0.413371555048059	0.276289780363024
Section 3	-0.998873640311839	-1.10971902894759E-10	-0.00129306377464564	-1.09792083153101E-10	1.49615217220456	0.881238077304947
Section 4	-0.99902325529059	-1.89282652839015E-10	-0.000806195154924004	-5.96142479469382E-11	1.69778429999323	7.68827572836831
Section 10	-0.99919303959058	-3.24952488932401E-7	-0.000954598227898744	-2.07919628672412E-11	0.220827707014815	0.08454590853486691
Section 2	-0.99921511672976	-9.89132086117668E-11	-0.000928119057169704	-3.72343648021132E-11	2.6119265951674	9.50986376394216
Section 5	-0.999476309389277	-2.23030216690168E-9	-0.000212018959021532	-1.03450446458652E-13	0.274654470348024	0.459646979045224
Section 1	-0.999503774836311	-1.48994818662398E-12	-0.000670860933263809	-2.13648785203709E-11	0.597533504774761	
Section 9	-0.999563528186789	-8.96665638194326E-9	-0.000619525590938551	-1.70716302324328E-12		

**Footnote - Ratio:**  
This measurement scale allows comparisons regarding pipeline sections concerning risk increments. In other words, by measuring the Ratio of these increments, it is possible to reveal the considerable magnitude that one section increments to risk relative to another.

Fonte: O Autor (2023).

Por fim, neste módulo ainda é possível exportar um relatório com todas as informações obtidas (conforme Figura 18), através de uma planilha (via *Microsoft Excel*).

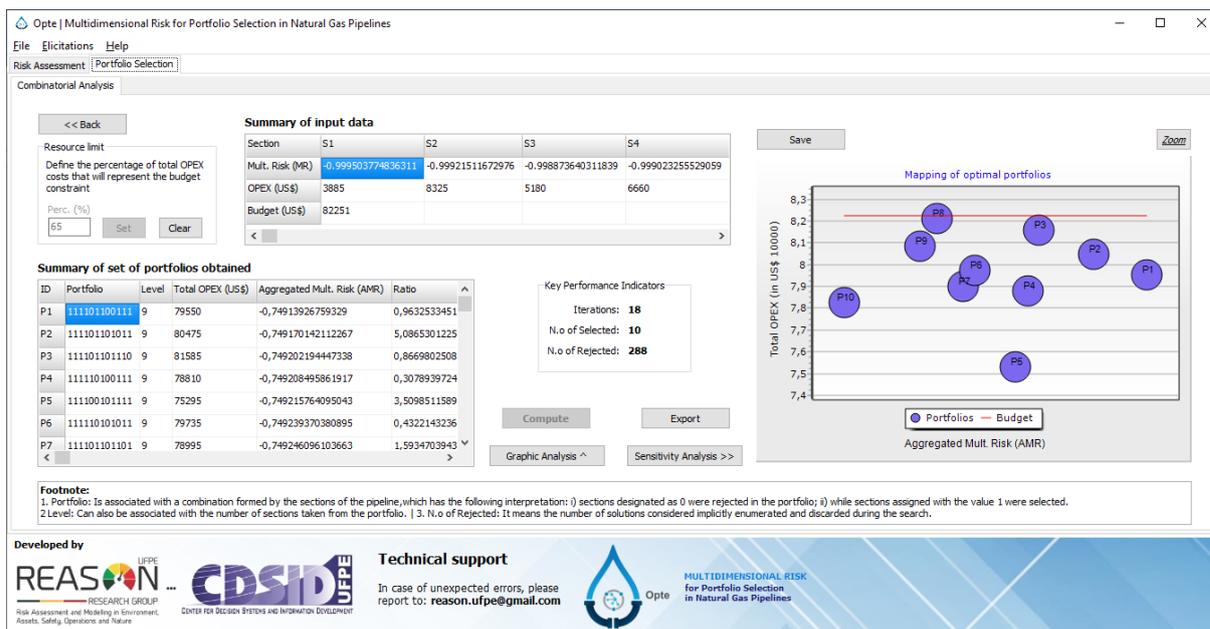
### 5.3.4 Módulo de seleção dos portfólios

Posteriormente a análise dos riscos de cada seção, o software apresenta o módulo de seleção dos portfólios. Neste módulo, toda a abordagem apresentada na seção 3.3 é implementada para a obtenção do(s) conjunto(s) de solução(ões) ótima(s) do problema. A Figura 19 apresenta a interface geral desse módulo.

A partir da definição dos valores dos riscos multidimensionais das seções e das estimativas dos OPEX, o algoritmo de enumeração implícita desenvolvido obtém o(s) portfólio(s) que agregam a maior quantidade de seções, e isso consequentemente representa um benefício para o planejamento de ações de mitigação de riscos.

Em outras palavras, o intuito é obter, dado a restrição financeira, o maior valor agregado do portfólio, o qual é dado pela soma de todos os valores de desempenho de risco das seções selecionadas. Nesse sentido, é requisitado ao DM qual a porcentagem em relação ao orçamento disponível, uma vez que o investimento geralmente é limitado.

Figura 21 – Interface do módulo de seleção dos portfólios

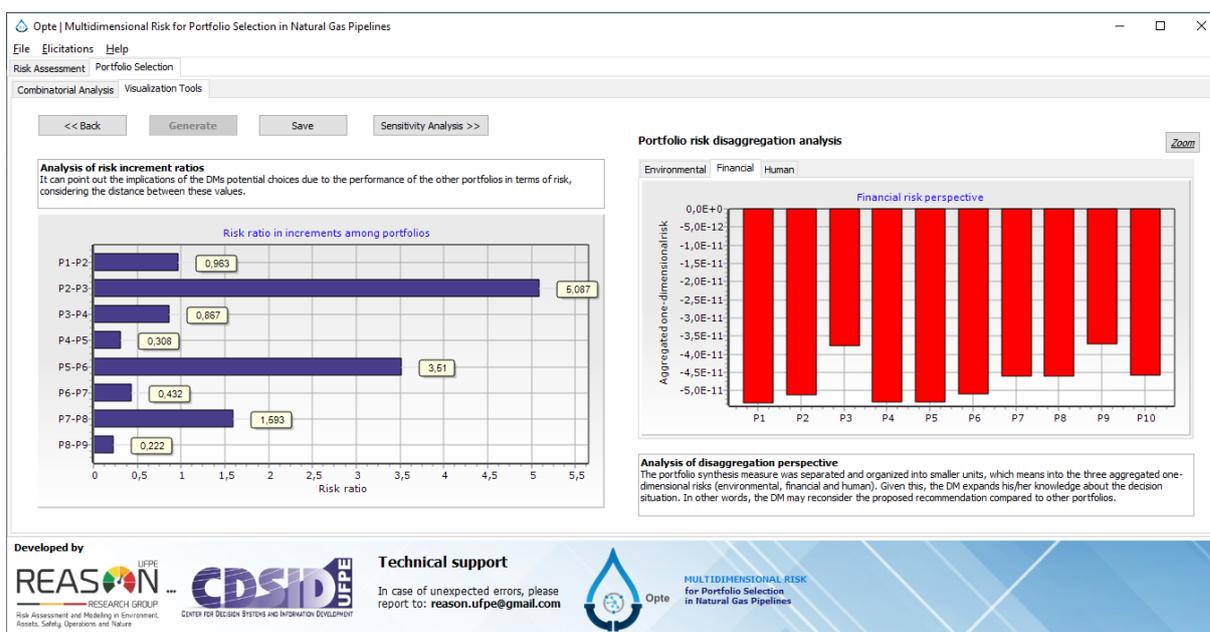


Fonte: O Autor (2023).

Além dessa análise, neste módulo também foram implementadas, em uma aba exclusiva conforme visto na Figura 20, as análises de visualização gráfica apresentadas na subseção 3.4.2. Isto é, a discussão a respeito da Razão de Risco (RR) em termos de incrementos (revelando a grandeza que um portfólio incrementa ao risco em relação ao outro), bem como a perspectiva de desagregação do risco multidimensional agregado do portfólio em relação às dimensões de consequência.

De forma análoga ao módulo de avaliação dos riscos, neste módulo é possível exportar um relatório com as informações obtidas (conforme Figura 19), através de uma planilha (via *Microsoft Excel*).

Figura 22 – Interface das análises de visualização gráfica



Fonte: O Autor (2023).

### 5.3.5 Módulo de análise de sensibilidade

Por fim, foram instrumentalizadas nesse módulo as análises descritas na seção 4.3 e 4.4. Mais especificamente, após a conclusão do objetivo-base do modelo proposto com relação a obtenção das áreas mais críticas do gasoduto, esse modulo permite ao DM uma avaliação mais acurada sobre as recomendações.

Em outras palavras, o usuário pode realizar simulações para prever os resultados de diferentes cenários envolvendo incertezas na modelagem (conforme discutido nas seções 4.2 e 4.5), a fim de verificar o nível de confiança sobre os resultados previamente encontrados.

A Figura 21 apresenta a interface geral desse módulo. Similarmente aos demais módulos, é possível exportar um relatório com as informações resumidas da simulação realizada (através de uma planilha, via *Microsoft Excel*).

Figura 23 – Interface do módulo de análise de sensibilidade

Opte | Multidimensional Risk for Portfolio Selection in Natural Gas Pipelines

File Elicitations Help

Risk Assessment Portfolio Selection Sensitivity Analysis

Monte Carlo Simulation

<< Back

1) Choose the parameters that will be modified by the distribution.

Patterns

CDR  Heat Radiation  By Section  Budget

By Scenario  OPEX of sections  All/None

CDR - Critical Danger Radius

- d: Section pipeline diameter;
- Po: Constant pressure valley;
- Lo: Pipeline extension until the compression station;

2) Enter the percentage variation of parameters. Then, choose the desired distribution and click the "Save Distribution" button.

Variation and Probability Distribution

Parameter variation value (%)

Options

Triangular  Uniform

3) Enter the number of cases you want to calculate

Number of Cases

Summary of Scenarios

Parameter	PDF	Range
diameter	Uniform	15%
Po	Uniform	15%
Lo	Uniform	15%

Analyze Export

Clear Statistical Analysis >>

Final sensitivity analysis report

Total solutions	Portfolio	Level	Aggreg. Mult. Risk (AMR)	Total OPEX (US\$)	Iteration	Pattern	PDF
10	1111011001111	9	-0,749152383503883	79550	1	CDR	Unif
10	1111011001111	9	-0,749140834206177	79550	2		
10	1111011001111	9	-0,749130484525368	79550	3		
10	1111011001111	9	-0,749167241253148	79550	4		
10	1111011001111	9	-0,749129770809595	79550	5		
10	1111011001111	9	-0,749172246552776	79550	6		
10	1111011001111	9	-0,749153043152633	79550	7		
10	1111011001111	9	-0,749168395687745	79550	8		
10	1111011001111	9	-0,749137771655081	79550	9		
10	1111011001111	9	-0,749175079404596	79550	10		
10	1111011001111	9	-0,749173982105538	79550	11		
10	1111011001111	9	-0,749173534530472	79550	12		
10	1111011001111	9	-0,749200280739467	79550	13		

Developed by

REASON RESEARCH GROUP Risk Assessment and Modeling in Environment, Assets, Safety, Operations and Nature

CDSID UFPE CENTER FOR DECISION SYSTEMS AND INFORMATION DEVELOPMENT

Technical support

In case of unexpected errors, please report to: [reason.ufpe@gmail.com](mailto:reason.ufpe@gmail.com)

Opte MULTIDIMENSIONAL RISK for Portfolio Selection in Natural Gas Pipelines

Fonte: O Autor (2023).

Além disso, o SAD nesse módulo é capaz de realizar análises utilizando técnicas estatísticas para identificar padrões e outras informações relevantes (nível de sensibilidade das seções) fruto das simulações efetuadas. Atrelado a isso, o software apresenta os resultados dessas análises de forma clara e compreensível, utilizando recursos visuais para facilitar a interpretação das informações, conforme observa-se na Figura 22.

Figura 24 – Interface das análises estatísticas associadas as simulações efetuadas

Opte | Multidimensional Risk for Portfolio Selection in Natural Gas Pipelines

File Elicitations Help

Risk Assessment Portfolio Selection Sensitivity Analysis

Monte Carlo Simulation Statistical Analysis

<< Back

MCS results for the optimal portfolios

Portfolio frequencies in the sensitivity analysis

Portfolio	Frequency
P1	15
P2	14
P3	5
P4	2
P5	1
P6	1
P7	7
P8	4
P9	1

Save Zoom

Section-level sensitivity information

Explanation

The proportion of changes between recommended portfolios is tested against some expected benchmark proportions. Therefore, based on this statistical investigation, it is possible to show if and where uncertainty in the assessment of risk calculation can affect the credibility of the results of the model.

Choose the confidence level of the test

95%

$$\begin{cases} H_0: \hat{\varphi}_{s_i} \geq \varphi_0 \\ H_1: \hat{\varphi}_{s_i} < \varphi_0 \end{cases}$$

Set Save Clear

Sensitivity level of sections

Confidence level: 95%

S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8

Level1 Level2 Level3 Level4

Developed by

REASON RESEARCH GROUP Risk Assessment and Modeling in Environment, Assets, Safety, Operations and Nature

CDSID UFPE CENTER FOR DECISION SYSTEMS AND INFORMATION DEVELOPMENT

Technical support

In case of unexpected errors, please report to: [reason.ufpe@gmail.com](mailto:reason.ufpe@gmail.com)

Opte MULTIDIMENSIONAL RISK for Portfolio Selection in Natural Gas Pipelines

Fonte: O Autor (2023).

Adicionalmente, cabe destacar que o DM pode exportar todas as figuras exibidas ao longo da execução do SAD. Além disso, as figuras apresentam como característica principal a interatividade, ou seja, permite que os usuários alterem a precisão de exibição dos dados (*zoom*) para fazer análises específicas.

#### 5.4 Síntese do capítulo

O presente capítulo aborda o desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para fornecer suporte automatizado ao problema de gerenciamento de riscos em GGN. O objetivo é instrumentalizar, de forma prática, as complexas modelagens associadas ao modelo proposto nesta tese.

O referido sistema integra um conjunto de ferramentas para apoiar o processo decisório, desde a coleta e análise de dados até a visualização e interpretação dos resultados. Uma das principais contribuições do SAD é a capacidade de lidar com a complexidade associada ao problema de decisão em estudo.

O SAD permite a organização estruturada dos dados, incluindo informações sobre as características dos gasodutos, condições técnicas e operacionais. Além disso, todos os procedimentos do modelo de decisão são incorporados ao sistema, permitindo uma análise mais abrangente e precisa na formulação dos portfólios. A aplicação de simulações também está disponível, permitindo a avaliação de incertezas e a análise de sensibilidade.

Outro aspecto relevante do SAD é sua capacidade de visualização e interpretação dos resultados. O sistema oferece recursos gráficos e relatórios que facilitam a compreensão e a análise dos dados.

Em síntese, o desenvolvimento do SAD se revela como uma necessidade para enfrentar as complexidades deste problema de decisão. Através da automação e integração de ferramentas, o SAD proporciona uma abordagem estruturada, permitindo uma tomada de decisão embasada em um ambiente desafiador e crucial para o setor de energia.

## 6 CONCLUSÕES

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões principais que resultam dos estudos desenvolvidos, as limitações encontradas nesta pesquisa e suas implicações práticas, assim como algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

### 6.1 Considerações finais

O modelo de decisão proposto envolve a análise de vários fatores, como a probabilidade de ocorrência de um evento de risco no gasoduto, o impacto potencial desse evento, o custo de implementação de medidas operacionais, entre outros. Portanto, o uso desse modelo fornece uma base sólida para decisões de gerenciamento de risco.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi apresentar um modelo de decisão multicritério voltado para a gestão de riscos em gasodutos de gás natural, que melhorasse a mitigação de riscos ao selecionar um portfólio dos trechos mais críticos dessa rede de transporte. Assim, seria possível contribuir conseqüentemente para a alocação de recursos de forma mais objetiva, principalmente ao considerar a avaliação dos trechos sob uma perspectiva multidimensional para os riscos.

Adicionalmente, foi também utilizado uma análise de sensibilidade para aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos com o modelo. Nesse sentido, confirmando a possibilidade de utilizá-lo para retratar formalmente o problema em estudo e encontrar uma solução representativa.

A partir de uma revisão integrativa, foram identificados alguns pontos de interesse na literatura, que estabeleceram as bases do modelo proposto e, conseqüentemente, contribuíram para o estado da arte em aplicações envolvendo o transporte de gás natural (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022; VIANA *et al.*, 2022b) e a extensão para outras substâncias (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2023b).

Nesse contexto, destaca-se a importância de possuir um processo decisório bem estruturado, pois ajuda a evitar decisões baseadas em opiniões pessoais ou enviesadas, que podem levar a decisões inadequadas. Além disso, um procedimento documentado e transparente pode ajudar a aumentar a confiança dos usuários do sistema e de outras partes interessadas. Nesse sentido, o modelo de decisão pode ser facilmente atualizado à medida que novos dados ou informações se tornam disponíveis, garantindo que a decisão permaneça relevante e precisa ao longo do tempo.

Cabe então ressaltar a implicação gerencial desse modelo, ou seja, a capacidade de identificar os riscos mais latentes associados ao gasoduto de gás natural. Isso permite que o gestor (DM) tenha uma visão holística dos pontos críticos. Com base nas informações estratégicas, o DM pode implementar medidas de segurança adicionais, aprimorar as práticas de manutenção (por exemplo, inspeção de proteção catódica e *pigging* operacional), estabelecer planos de resposta a emergências e desenvolver estratégias de contingência mais eficazes.

Assim, ao adotar o modelo proposto, a organização demonstra seu compromisso com a proteção do meio ambiente, da sociedade e do patrimônio. Assim, fortalece sua reputação e relacionamento com stakeholders como clientes, órgãos reguladores e comunidades locais.

Este modelo multicritério foi validado por meio da realização de uma aplicação numérica com base em dados reais de um estudo anterior realizado em uma empresa de gás natural, e a análise dos resultados pode ser usada para contextualizar os impactos ambientais, econômicos e sociais desta pesquisa para a sociedade.

Por exemplo, essa abordagem pode auxiliar na minimização do impacto de possíveis acidentes para as pessoas, flora e fauna locais nas áreas circunvizinhas do duto. E conforme mencionado, ações preventivas mais efetivas podem ser estabelecidas, reduzindo então o risco de falha do sistema e minimizando o tempo de parada do gasoduto. Portanto, isso pode ter um impacto positivo no desempenho financeiro da organização envolvida na operação do gasoduto.

O modelo proposto permite fornecer uma ampla gama de informações valiosas sobre outras soluções ótimas obtidas durante o processo de busca. Assim, pode-se fornecer ao DM uma lista hierárquica de soluções candidatas formada pelo maior número possível de áreas que compõem o gasoduto, dada a restrição financeira. Portanto, essa lista permite ao DM fazer uma análise integral, ou seja, manter a recomendação final ou revisá-la devido a esse conjunto mais amplo de soluções.

Por fim, esta tese apresenta um avanço na forma de obtenção de portfólios devido à generalidade e modularidade da enumeração implícita proposta. Assim, o algoritmo desenvolvido permite ampla aplicação em situações envolvendo o problema de seleção de portfólio.

Em síntese, este estudo destaca o aprimoramento de pesquisas voltadas para abordagens de gestão de riscos que considerem as múltiplas dimensões dos impactos causados pelos acidentes. Além disso, foi possível delinear outra abordagem que evita o viés da escala intervalar na resolução de problemas de portfólio. Logo, garante-se uma recomendação mais concisa e direcionada para mitigar perdas, e proporcionar um processo decisório estruturado, livre de recomendações enganosas e com mais informações em geral.

## 6.2 Limitações e desafios da pesquisa

Ao criar um modelo de decisão para auxiliar no gerenciamento de riscos em gasodutos, é inevitável que algumas limitações e desafios surjam no processo de modelagem do problema. Essas limitações podem ser decorrentes de diversos fatores, incluindo a complexidade do sistema de gasodutos, a disponibilidade e qualidade dos dados, e as condições de desempenho computacional e escalabilidade.

Uma das principais limitações está relacionada à representação completa e precisa de todos os fatores envolvidos. A disponibilidade e qualidade dos dados podem apresentar desafios significativos. Para desenvolver um modelo de decisão, é necessário contar com informações confiáveis, a exemplo neste caso de características do gasoduto, condições operacionais e outros fatores relevantes.

No entanto, esses dados podem ser limitados, incompletos ou inconsistentes, o que pode afetar a precisão e confiabilidade das estimativas de risco. Em outras palavras, um dos desafios enfrentados refere-se à estruturação de dados relativos às questões operacionais e técnicas do gasoduto, cuja acessibilidade e transparência facilitam a aplicação do modelo proposto.

Pode-se notar também que, apesar da modelagem de enumeração implícita trazer algumas vantagens (como uma compreensão e interpretação aprofundada dos resultados), esta abordagem é válida apenas para tamanhos moderados do problema (individualização do gasoduto envolvendo até 25 seções). Isso se deve às limitações dos métodos exatos na resolução de problemas de otimização combinatória em grande escala (natureza NP-difícil) (DOERING *et al.*, 2019).

No entanto, é importante reconhecer que a utilização da abordagem nesse estudo também levou em consideração outros objetivos específicos da pesquisa. Mais especificamente, a utilização da simulação de Monte Carlo (SMC) para lidar com a incerteza e a variabilidade dos dados. Neste caso, a quantidade de iterações necessárias para obter resultados confiáveis exige recursos computacionais consideráveis. Portanto, é evidente que o uso da SMC em um modelo de decisão multicritério naturalmente apresenta desafios operacionais significativos.

Adicionalmente, faz-se necessário comentar sobre a necessidade de um analista para a condução da modelagem de decisão. Em outras palavras, a expertise e habilidades do analista são fundamentais para orientar e facilitar todo o procedimento, assegurando que a modelagem seja realizada de forma adequada e coerente com os objetivos e contextos específicos.

A respeito disso, destaca-se também o desafio de fornecer um assessoramento ao DM para garantir que seja estabelecido um processo de elicitación de preferências coerente com a

Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Além disso, este trabalho não aborda as possíveis sinergias no modelo de decisão quanto à presença conjunta de seções do gasoduto no portfólio.

### 6.3 Implicações práticas

Como os dutos de gás natural geralmente cobrem longas distâncias, selecionar as seções mais críticas em relação ao risco é fundamental para maximizar o uso eficiente de recursos, tempo e esforço. Portanto, a abordagem desenvolvida ajuda a evitar gastos desnecessários, pois, em um problema de escolha de portfólio, o número de seções e as diversas combinações ( $2^n$ ) em que cada uma pode ser mantida podem ser imensas.

Ao priorizar essas seções críticas, aplicando o modelo proposto, as organizações podem direcionar seus esforços para monitorar e manter essas áreas, identificar e corrigir estrategicamente possíveis problemas e garantir a segurança contínua do transporte de gás natural.

Além disso, através do modelo é possível que essas empresas foquem em investir em tecnologias e medidas de segurança específicas para as áreas críticas indicadas. Isso inclui, por exemplo, a instalação de sensores adicionais para monitorar o vazamento de gás, a implementação de medidas de proteção contra incêndio ou a realização de inspeções mais frequentes.

Em resumo, a seleção criteriosa dos trechos mais críticos em termos de risco utilizando o modelo de decisão proposto é essencial para garantir a segurança do transporte dessa substância, maximizar o uso eficiente dos recursos e garantir a continuidade do fornecimento de energia. Assim, evidentemente pode-se evitar maiores consequências sobre ativos humanos, financeiros e ambientais.

Adicionalmente, este modelo pode ajudar os gestores a avaliar a eficácia das medidas de gestão de riscos já implementadas. Considerando o ciclo de atividades obrigatórias de segurança e manutenção que as normas regulatórias impõem sobre toda a malha do gasoduto, pode-se usar o modelo proposto para monitorar continuamente o desempenho do gasoduto e identificar áreas onde as medidas de gerenciamento de risco precisam ser ajustadas ou aprimoradas. Em outras palavras, a empresa pode entender e responder continuamente aos riscos com estratégias eficientes de mitigação devido ao portfólio ótimo obtido.

Pensando nisso, integrar esse novo modelo de decisão pode ser uma forma eficaz de aprimorar o processo de gestão de riscos das organizações responsáveis pelo transporte de gás natural. Deste modo, isso pode envolver a complementação de abordagens já utilizadas ou até

mesmo a substituição, pois o novo modelo investiga diferentes perspectivas de perdas alinhadas com problemas reais de risco.

#### 6.4 Direcionamentos para trabalhos futuros

Considerando um processo de aprendizado contínuo, novos insights podem ser extraídos das discussões deste estudo. Para pesquisas futuras, existem algumas oportunidades para melhorar e estender este modelo, como por exemplo:

- O modelo de avaliação de risco multidimensional (BRITO; DE ALMEIDA, 2009) pode ser estendido para situações dependentes do tempo, ou seja, onde as taxas de falha de trechos de dutos não são constantes;
- Modificações no procedimento de busca podem ser feitas no intuito de aperfeiçoar a obtenção de soluções. Por exemplo, outras abordagens, como heurística ou métodos baseados em aprendizado de máquina, podem oferecer melhores desempenhos computacionais e escalabilidade;
- O modelo proposto poderia ser expandido para incluir considerações do processo de decisão em grupo, que já foi considerado em outros contextos associados à abordagem MCDM/A (MORAIS; DE ALMEIDA, 2010);
- A utilização de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como recursos complementares para auxiliar a tomada de decisão;
- Selecionar um portfólio de ações estratégicas que possam ser consideradas para abordar os riscos das seções que compõem o portfólio. Ou seja, novas pesquisas podem buscar estruturar um plano ótimo de ações (por exemplo, manutenção, inspeção, estrutural, entre outras), considerando as particularidades de cada trecho escolhido para o portfólio em resposta aos riscos;
- Melhorias no protocolo de análise de sensibilidade global podem ser estabelecidas. Por exemplo, a amostragem do Latin Hypercube, que amostra com mais precisão toda a gama de funções de distribuição, pode ser usada no lugar da Simulação de Monte Carlo (SMC);
- A investigação cuidadosa da estimativa das atitudes de risco do DM em relação ao risco. Ou seja, estudar como essas questões podem influenciar o processo de tomada de decisão, principalmente no que diz respeito à avaliação de risco.

## REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F.; HOWICK, S.; QUIGLEY, J.; WALLS, L.; HOUGHTON, T. Systemic risk elicitation: Using causal maps to engage stakeholders and build a comprehensive view of risks. **European Journal of Operational Research**, v. 238, n. 1, p. 290–299, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.035>
- ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 8, p. 3610–3619, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.122>
- AMAYA-GÓMEZ, R.; SÁNCHEZ-SILVA, M.; MUÑOZ, F. Integrity assessment of corroded pipelines using dynamic segmentation and clustering. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 128, p. 284–294, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.049>
- ASME. **Pipeline transportation systems for liquid and slurries. ASME code for pressure piping, B31.4**. New York, NY.: The American Society of Mechanical Engineers, 2019. *E-book*.
- AVEN, T.; RENN, O. On risk defined as an event where the outcome is uncertain. **Journal of Risk Research**, v. 12, n. 1, p. 1–11, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/13669870802488883>
- BAKHTAVAR, E.; YOUSEFI, S. Assessment of workplace accident risks in underground collieries by integrating a multi-goal cause-and-effect analysis method with MCDM sensitivity analysis. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, p. 3317–3332, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1618-x>
- BALALI, A.; VALIPOUR, A.; EDWARDS, R.; MOEHLER, R. Ranking effective risks on human resources threats in natural gas supply projects using ANP-COPRAS method: Case study of Shiraz. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 208, p. 107442, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107442>
- BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. 1st. ed. New York, NY.: Springer New York, NY, 2002. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- BERGER, J. O. **Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis**. 2nd. ed. New York, NY: Springer, 1985. (Springer Series in Statistics). *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4286-2>
- BIEZMA, M. V.; ANDRÉS, M. A.; AGUDO, D.; BRIZ, E. Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach. **Engineering Failure Analysis**, v. 110, p. 104446, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104446>
- BJØRNSSEN, K.; AVEN, T. Risk aggregation: What does it really mean? **Reliability Engineering and System Safety**, v. 191, n. May, p. 106524, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106524>
- BOLOTINA, I.; BORIKOV, V.; IVANOVA, V.; MERTINS, K.; UCHAIKIN, S. Application

of phased antenna arrays for pipeline leak detection. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 161, p. 497–505, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.059>

BONVICINI, S.; ANTONIONI, G.; MORRA, P.; COZZANI, V. Quantitative assessment of environmental risk due to accidental spills from onshore pipelines. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 93, p. 31–49, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.007>

BORGONOVO, E. **Sensitivity Analysis: An Introduction for the Management Scientist**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. (International Series in Operations Research & Management Science). v. 251. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52259-3>

BORGONOVO, E.; BUZZARD, G. T.; WENDELL, R. E. A global tolerance approach to sensitivity analysis in linear programming. **European Journal of Operational Research**, v. 267, n. 1, p. 321–337, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.034>

BORGONOVO, E.; CILLO, A.; SMITH, C. L. On the Relationship between Safety and Decision Significance. **Risk Analysis**, v. 38, n. 8, p. 1541–1558, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12970>

BORGONOVO, E.; PLISCHKE, E. Sensitivity analysis: A review of recent advances. **European Journal of Operational Research**, v. 248, n. 3, p. 869–887, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.032>

BRIGGS, R. A. Normative Theories of Rational Choice: Expected Utility. *In*: ZALTA, E. N. (org.). **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Fall 2019 ed. [*S. l.*]: Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019.

BRITISH PETROLEUM. **bp Statistical Review of World Energy 2022** (S. Dale, Org.). **British Petroleum**. London, UK: [*s. n.*], 2022.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, n. 2, p. 187–198, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.02.014>

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T.; MOTA, C. M. M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 3, p. 812–821, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.016>

BRITO, M. M. de; ALMORADIE, A.; EVERS, M. Spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis in a MCDA-based flood vulnerability model. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 33, n. 9, p. 1788–1806, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1599125>

BS EN 14161:2011+A1:2015. **Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems**. [*S. l.*]: British Standards Institution, 2015.

CASADO, R. S. G. R.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Combining a multidimensional risk evaluation with an implicit enumeration algorithm to tackle the portfolio selection problem of a natural gas pipeline. **Reliability Engineering & System**

**Safety**, v. 221, p. 108332, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108332>

CASADO, R. S. G. R.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. **Opte: Multidimensional Risk for Portfolio Selection in Natural Gas Pipelines**. Software desenvolvido pelos grupos de pesquisa CDSID e REASON (UFPE): Recife, 2023a. Depositante: Ramon Swell Gomes Rodrigues Casado. BR5120230018589. Depósito: 28 jun. 2023. Concessão: 04 jul. 2023.

CASADO, R. S. G. R.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Portfolio-based decision model for enhancing the mitigation of multidimensional risks in hydrogen pipeline sections. **Process Safety and Environmental Protection**, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.051>

CHEN, Y.; XIE, S.; TIAN, Z. Risk assessment of buried gas pipelines based on improved cloud-variable weight theory. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 221, p. 108374, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108374>

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to algorithms**. 3rd editio ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2009.

DA SILVA, L. B. L.; ALENCAR, M. H.; ALMEIDA, A. T. de. Exploring global sensitivity analysis on a risk-based MCDM/A model to support urban adaptation policies against floods. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 73, p. 102898, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102898>

DE ALMEIDA, A. T.; ALENCAR, M. H.; GARCEZ, T. V.; FERREIRA, R. J. P. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 28, n. 2, p. 153–184, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/imaman/dpw021>

DE ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA-FILHO, A. T.; GARCEZ, T. V. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**. Cham: Springer International Publishing, 2015. (International Series in Operations Research & Management Science). v. 231. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17969-8>

DE ALMEIDA, A. T.; EKENBERG, L.; SCARF, P.; ZIO, E.; ZUO, M. J. **Multicriteria and optimization models for risk, reliability, and maintenance decision analysis: recent advances**. Cham, Switzerland: Springer, 2022. (International Series in Operations Research & Management Science). v. 321. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89647-8>

DE ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, R. J. P.; CAVALCANTE, C. A. V. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 26, n. 3, p. 249–271, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/imaman/dpv010>

DE ALMEIDA, A. T.; VETSCHERA, R. A note on scale transformations in the PROMETHEE v method. **European Journal of Operational Research**, v. 219, n. 1, p. 198–200, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.034>

DE ALMEIDA, A. T.; VETSCHERA, R.; DE ALMEIDA, J. A. Scaling Issues in Additive Multicriteria Portfolio Analysis. *In: Lecture Notes in Business Information Processing*. [S. l.: s. n.]. v. 184, p. 131–140. *E-book*. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11364-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11364-7_12)

DE ALMEIDA, J. A.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Portfolio selection of information systems projects using PROMETHEE V with c-optimal concept. **Pesquisa Operacional**, v. 34, n. 2, p. 275–299, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2014.034.02.0275>.

DELLA CROCE, F.; SALASSA, F.; SCATAMACCHIA, R. An exact approach for the 0–1 knapsack problem with setups. **Computers and Operations Research**, v. 80, p. 61–67, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.11.015>

DELOUYI, F. L.; GHODSYPOUR, S. H.; ASHRAFI, M. Dynamic Portfolio Selection in Gas Transmission Projects Considering Sustainable Strategic Alignment and Project Interdependencies through Value Analysis. **Sustainability**, v. 13, n. 10, p. 5584, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13105584>

DHAINI, M.; MANSOUR, N. Squirrel search algorithm for portfolio optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 178, p. 114968, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114968>

DOERING, J.; KIZYS, R.; JUAN, A. A.; FITÓ, À.; POLAT, O. Metaheuristics for rich portfolio optimisation and risk management: Current state and future trends. **Operations Research Perspectives**, v. 6, p. 100121, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100121>

DZIUBIŃSKI, M.; FRĄTCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 5, p. 399–408, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.10.007>

DZIUBIŃSKI, M.; FRĄTCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. S.; FRĄTCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 5, p. 399–408, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.10.007>.

EGIG. Gas Pipeline Incidents - 11th Report: period 1970 – 2019. In: [S. l.]: European Gas Pipeline Incident Data Group, 2020. p. 56. *E-book*. Disponível em: [https://www.egig.eu/reports/\\$60/\\$61](https://www.egig.eu/reports/$60/$61)

FISHMAN, G. S. **Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications**. New York, NY: Springer New York, 1996. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2553-7>

GARCEZ, T. V.; DE ALMEIDA, A. T. A risk measurement tool for an underground electricity distribution system considering the consequences and uncertainties of manhole events. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 124, n. April 2014, p. 68–80, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.11.007>

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e meta-heurísticas: algoritmos e aplicações**. 1ª ed. ed. Rio de Janeiro, RJ.: Elsevier, 2016.

GU, S.; LI, K.; FENG, T.; YAN, D.; LIU, Y. The prediction of potential risk path in railway traffic events. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 222, p. 108409, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108409>

HAN, Z. Y.; WENG, W. G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment

methods for urban natural gas pipeline network. **Journal of Hazardous Materials**, v. 189, n. 1–2, p. 509–518, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.067>

HASSAN, S.; WANG, J.; KONTOVAS, C.; BASHIR, M. An assessment of causes and failure likelihood of cross-country pipelines under uncertainty using bayesian networks. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 218, p. 108171, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108171>

HELTON, J. C. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 42, n. 2–3, p. 327–367, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(93\)90097-I](https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90097-I)

IDACHABA, F.; RABIEI, M. Current technologies and the applications of data analytics for crude oil leak detection in surface pipelines. **Journal of Pipeline Science and Engineering**, v. 1, n. 4, p. 436–451, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.10.001>

ISO 13623. **Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems**. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.

ISO 31000. **Risk Management: Guidelines**. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.

JO, Y. Do; AHN, B. J. A simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines. **Journal of Hazardous Materials**, v. 97, p. 31–46, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(02\)00261-3](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(02)00261-3)

JO, Y.-D.; AHN, B. J. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. **Journal of Hazardous Materials**, v. 123, n. 1–3, p. 1–12, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.01.034>

JO, Y.-D.; CROWL, D. A. Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 21, n. 6, p. 589–595, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.04.006>

JO, Y. D.; AHN, B. J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 15, n. 3, p. 179–188, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00007-4)

KANG, J.; WANG, Z.; JIN, H.; DAI, H.; ZHANG, J.; WANG, L. Dynamic risk assessment of hybrid hydrogen-gasoline fueling stations using complex network analysis and time-series data. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.212>

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs**. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1976.

KELLERER, H.; PFERSCHY, U.; PISINGER, D. **Knapsack Problems**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24777-7>.

KHAN, F.; YARVEISY, R.; ABBASSI, R. Risk-based pipeline integrity management: A road map for the resilient pipelines. **Journal of Pipeline Science and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 74–87, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.02.001>

- LAM, C. Y.; CRUZ, A. M. Risk analysis for consumer-level utility gas and liquefied petroleum gas incidents using probabilistic network modeling: A case study of gas incidents in Japan. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 185, p. 198–212, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.12.008>
- LI, X.; CHEN, G.; KHAN, F.; XU, C. Dynamic risk assessment of subsea pipelines leak using precursor data. **Ocean Engineering**, v. 178, p. 156–169, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.009>
- LIESIÖ, J. Measurable multiattribute value functions for portfolio decision analysis. **Decision Analysis**, v. 11, n. 1, p. 1–20, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1287/deca.2013.0287>
- LIESIÖ, J.; PUNKKA, A. Baseline value specification and sensitivity analysis in multiattribute project portfolio selection. **European Journal of Operational Research**, v. 237, n. 3, p. 946–956, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.009>
- LIESIÖ, J.; SALO, A.; KEISLER, J. M.; MORTON, A. Portfolio decision analysis: Recent developments and future prospects. **European Journal of Operational Research**, v. 293, n. 3, p. 811–825, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.015>
- LIU, W.; WU, X.; ZHANG, L.; WANG, Y.; TENG, J. Sensitivity analysis of structural health risk in operational tunnels. **Automation in Construction**, v. 94, p. 135–153, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.008>
- LOPES, Y. G.; DE ALMEIDA, A. T. A multicriteria decision model for selecting a portfolio of oil and gas exploration projects. **Pesquisa Operacional**, v. 33, n. 3, p. 417–441, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382013005000011>.
- LOPES, Y. G.; DE ALMEIDA, A. T. Assessment of synergies for selecting a project portfolio in the petroleum industry based on a multi-attribute utility function. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 126, p. 131–140, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.012>
- LÓPEZ-BENITO, A.; BOLADO-LAVÍN, R. A case study on global sensitivity analysis with dependent inputs: The natural gas transmission model. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 165, p. 11–21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.019>
- LU, L.; LIANG, W.; ZHANG, L.; ZHANG, H.; LU, Z.; SHAN, J. A comprehensive risk evaluation method for natural gas pipelines by combining a risk matrix with a bow-tie model. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 25, p. 124–133, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.04.029>
- MANCUSO, A.; COMPARE, M.; SALO, A.; ZIO, E. Portfolio optimization of safety measures for reducing risks in nuclear systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 167, n. May, p. 20–29, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.05.005>
- MANCUSO, A.; COMPARE, M.; SALO, A.; ZIO, E. Portfolio optimization of safety measures for the prevention of time-dependent accident scenarios. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 190, p. 106500, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106500>
- MARINO, A.; ZIO, E. A framework for the resilience analysis of complex natural gas pipeline networks from a cyber-physical system perspective. **Computers & Industrial**

**Engineering**, v. 162, p. 107727, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107727>

MARTÍ, R.; REINELT, G. **The linear ordering problem: exact and heuristic methods in combinatorial optimization**. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Applied Mathematical Sciences). v. 175. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16729-4>

MARTINS, C. L.; DE ALMEIDA, J. A.; DE OLIVEIRA BORTOLUZZI, M. B.; DE ALMEIDA, A. T. Scaling issues in MCDM portfolio analysis with additive aggregation. **Lecture Notes in Business Information Processing**, v. 250, p. 100–110, 2016. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32877-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32877-5_8)

MARTINS, C. L.; LÓPEZ, H. M. L.; DE ALMEIDA, A. T.; ALMEIDA, J. A.; BORTOLUZZI, M. B. de O. An MCDM project portfolio web-based DSS for sustainable strategic decision making in an electricity company. **Industrial Management & Data Systems**, v. 117, n. 7, p. 1362–1375, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2016-0412>

MAVROTAS, G.; DIAKOULAKI, D.; CALOGHIROU, Y. Project prioritization under policy restrictions. A combination of MCDA with 0-1 programming. **European Journal of Operational Research**, v. 171, n. 1, p. 296–308, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.069>

MAVROTAS, G.; DIAKOULAKI, D.; CAPROS, P. Combined MCDA-IP Approach for Project Selection in the Electricity Market. **Annals of Operations Research**, v. 120, n. 1–4, p. 159–170, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1023382514182>.

MAVROTAS, G.; DIAKOULAKI, D.; KOURENTZIS, A. Selection among ranked projects under segmentation, policy and logical constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 1, p. 177–192, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.03.010>

MEDEIROS, C. P.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Hydrogen pipelines: Enhancing information visualization and statistical tests for global sensitivity analysis when evaluating multidimensional risks to support decision-making. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 47, p. 22192–22205, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.09.113>

MEDEIROS, C. P.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk evaluation of natural gas pipelines based on a multicriteria decision model using visualization tools and statistical tests for global sensitivity analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 165, n. April, p. 268–276, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.04.002>

MEDEIROS, C. P.; DA SILVA, L. B. L.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. A new method for managing multidimensional risks in Natural Gas Pipelines based on non-Expected Utility. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 214, p. 107709, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107709>

METE, S.; SERIN, F.; OZ, N. E.; GUL, M. A decision-support system based on Pythagorean fuzzy VIKOR for occupational risk assessment of a natural gas pipeline construction. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 71, p. 102979, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102979>

MISHRA, K. B.; WEHRSTEDT, K.-D. Underground gas pipeline explosion and fire: CFD

based assessment of foreseeability. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 24, p. 526–542, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.04.010>

MOHAMMED, A. I.; OYENEYIN, B.; ATCHISON, B.; NJUGUNA, J. Casing structural integrity and failure modes in a range of well types - A review. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 68, p. 102898, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.05.011>

MOLNAR, G. Economics of Gas Transportation by Pipeline and LNG. *In*: HAFNER, M.; LUCIANI, G. (org.). **The Palgrave Handbook of International Energy Economics**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2022. p. 23–57. *E-book*. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86884-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86884-0_2)

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 7th. ed. [*S. l.*]: John Wiley & Sons, Inc., 2018.

MORAIS, D. C.; DE ALMEIDA, A. T. Water network rehabilitation: a group decision-making approach. **Water SA**, v. 36, n. 4, p. 487–494, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4314/wsa.v36i4.58425>

MUGGLETON, J. M.; HUNT, R.; RUSTIGHI, E.; LEES, G.; PEARCE, A. Gas pipeline leak noise measurements using optical fibre distributed acoustic sensing. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 78, p. 103293, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103293>

MUHLBAUER, W. K. **Pipeline risk assessment: the definitive approach and its role in risk management**. Austin, TX.: Expert Publishing, 2015.

NOGAL, M.; NOGAL, A. Sensitivity method for extreme-based engineering problems. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 216, p. 107997, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107997>

NOWROUZI, A.; PANAH, M.; GHAFARZADEH, H.; ATAIEI, A. Optimizing Iran's natural gas export portfolio by presenting a conceptual framework for non-systematic risk based on portfolio theory. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, p. 100403, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100403>

PHMSA. **Significant incident consequences**. Washington, D.C.: US DOT Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), 2023.

PUERTO, J.; RICCA, F.; RODRÍGUEZ-MADRENA, M.; SCOZZARI, A. A combinatorial optimization approach to scenario filtering in portfolio selection. **Computers & Operations Research**, v. 142, p. 105701, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105701>

RAMÍREZ-CAMACHO, J. G.; CARBONE, F.; PASTOR, E.; BUBBICO, R.; CASAL, J. Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use planning. **Safety Science**, v. 97, p. 34–42, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.01.021>.

RAZAVI, S. *et al.* The Future of Sensitivity Analysis: An essential discipline for systems modeling and policy support. **Environmental Modelling & Software**, v. 137, p. 104954, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104954>

REZAZADEH, A.; TALARICO, L.; RENIERS, G.; COZZANI, V.; ZHANG, L. Applying game theory for securing oil and gas pipelines against terrorism. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 191, p. 106140, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.021>

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Boston, MA: Springer US, 1996. (Nonconvex Optimization and Its Applications). v. 12. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>

RUSKIN, J. **The complete works of John Ruskin: on the old road; volumes one and two**. London, UK: Forgotten Books, 2018.

RUSSO, P.; DE MARCO, A.; PARISI, F. Assessment of the Damage from Hydrogen Pipeline Explosions on People and Buildings. **Energies**, v. 13, n. 19, p. 5051, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13195051>

SACCO, T.; COMPARE, M.; ZIO, E.; SANSAVINI, G. Portfolio decision analysis for risk-based maintenance of gas networks. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 60, n. October 2018, p. 269–281, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.002>

ŞAHİN ZORLUOĞLU, Ö.; KABAK, Ö. A Literature Survey on Project Portfolio Selection Problem. In: TOPCU, Y. I.; ÖZAYDIN, Ö.; KABAK, Ö.; ÖNSEL EKICI, Ş. (org.). **Multiple Criteria Decision Making: Beyond the Information Age**. [S. l.]: Springer, Cham, 2021. p. 387–411. *E-book*. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52406-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52406-7_15)

SAIZ, M.; LOSTUMBO, M. A.; JUAN, A. A.; LOPEZ-LOPEZ, D. A clustering-based review on project portfolio optimization methods. **International Transactions in Operational Research**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12933>

SALTELLI, A.; ALEKSANKINA, K.; BECKER, W.; FENNELL, P.; FERRETTI, F.; HOLST, N.; LI, S.; WU, Q. Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. **Environmental Modelling & Software**, v. 114, p. 29–39, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.01.012>

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis: The Primer**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470725184>

SHIELDS, M. D.; TEFERRA, K.; HAPIJ, A.; DADDAZIO, R. P. Refined Stratified Sampling for efficient Monte Carlo based uncertainty quantification. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 142, p. 310–325, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.023>

SKLAVOUNOS, S.; RIGAS, F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 1, p. 24–31, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.05.002>

SOLA, A. V. H.; MOTA, C. M. D. M. A multi-attribute decision model for portfolio selection aiming to replace technologies in industrial motor systems. **Energy Conversion and Management**, v. 57, p. 97–106, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.013>

SONG, S.; YANG, F.; XIA, Q. Multi-criteria project portfolio selection and scheduling problem based on acceptability analysis. **Computers & Industrial Engineering**, v. 135, p.

793–799, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.056>

SU, H.; ZHANG, J.; ZIO, E.; YANG, N.; LI, X.; ZHANG, Z. An integrated systemic method for supply reliability assessment of natural gas pipeline networks. **Applied Energy**, v. 209, p. 489–501, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.108>

SÝKORA, M.; MARKOVÁ, J.; DIAMANTIDIS, D. Bayesian network application for the risk assessment of existing energy production units. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 169, p. 312–320, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.09.006>

TAHA, H. A. **Integer programming: theory, applications, and computations**. New York, NY.: Academic Press, 2014.

THOMOPOULOS, N. T. **Essentials of Monte Carlo Simulation: Statistical Methods for Building Simulation Models**. New York, NY: Springer, New York, NY, 2013. *E-book*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6022-0>

TLILI, A.; KHALED, O.; MOUSSEAU, V.; OUERDANE, W. Interactive portfolio selection involving multicriteria sorting models. **Annals of Operations Research**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04877-z>

TOPPILA, A.; SALO, A. Selection of risk reduction portfolios under interval-valued probabilities. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 163, n. January 2016, p. 69–78, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.02.005>

URLI, B.; TERRIEN, F. Project portfolio selection model, a realistic approach. **International Transactions in Operational Research**, v. 17, n. 6, p. 809–826, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2010.00762.x>

VAIRO, T.; PONTIGGIA, M.; FABIANO, B. Critical aspects of natural gas pipelines risk assessments. A case-study application on buried layout. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 149, p. 258–268, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.050>

VETSCHERA, R.; DE ALMEIDA, A. T. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. **Computers and Operations Research**, v. 39, n. 5, p. 1010–1020, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.06.019>

VIANA, F. F. C. L.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. e P.; ALMEIDA, A. T. de. Multidimensional risk assessment and categorization of hydrogen pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 42, p. 18424–18440, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.057>

VIANA, F. F. C. L.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk classification with global sensitivity analysis to support planning operations in a transportation network of natural gas pipelines. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 96, p. 104318, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104318>

VIANA, F. F. C. L.; CASADO, R. S. G. R.; DA SILVA, L. B. L.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA, A. T. A hybrid multicriteria decision model for selecting a portfolio of risk-based maintenance actions in natural gas pipelines. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 103, p. 104655, 2022b. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104655>

VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid**. New York, N.Y.: John Wiley & Sons Inc, 1992.

WANG, L.; WANG, X.; DING, Z. Cask Principle of Multi-Attribute Risk Assessment: Non-Weighted Maximal Approach for Production Accidents. **IEEE Access**, v. 9, p. 85543–85555, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089173>

WANG, X.; DUAN, Q. Improved AHP–TOPSIS model for the comprehensive risk evaluation of oil and gas pipelines. **Petroleum Science**, v. 16, n. 6, p. 1479–1492, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00365-5>

WANG, X.; TAN, Y.; ZHANG, T.; XIAO, R.; YU, K.; ZHANG, J. Numerical study on the diffusion process of pinhole leakage of natural gas from underground pipelines to the soil. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 87, p. 103792, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103792>

WU, J.; ZHOU, R.; XU, S.; WU, Z. Probabilistic analysis of natural gas pipeline network accident based on Bayesian network. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 46, p. 126–136, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.01.025>

XIE, M.; TIAN, Z. A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. **Engineering Failure Analysis**, v. 92, p. 222–239, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.010>. Acesso em: 28 jun. 2021.

YOU, Q.; FAN, J.; ZHU, W.; BAI, Y. Multi-attribute Analysis of Consequence Severity in Risk Assessment for Natural Gas Pipelines. **Information Technology Journal**, v. 13, n. 3, p. 583–587, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2014.583.587>

YU, X.; LIANG, W.; ZHANG, L.; RENIERS, G.; LU, L. Risk assessment of the maintenance process for onshore oil and gas transmission pipelines under uncertainty. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 177, n. April, p. 50–67, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.05.001>

YUHUA, D.; DATAO, Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 18, n. 2, p. 83–88, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2004.12.003>

## APÊNDICE A – PSEUDOCÓDIGO DA ENUMERAÇÃO IMPLÍCITA

O Algoritmo abaixo apresenta o pseudocódigo da abordagem do modelo PSIE para o problema de seleção de portfólio aplicado ao Gasoduto de Gás Natural (GGN).

### Algoritmo: Enumeração implícita dos portfólios

Require  $r_{s_i}$ ,  $b_i$  and  $B$

Set  $p' \equiv S$ ;  $p': \{x_i = 1 | i = 1, 2, \dots, n\}$  the unfeasible solution

Rearrange  $x_i$  in  $p'$  in ascending order based on  $b_i$

Set  $|P| = n$  // cardinality of the portfolio set

// Define control variable, distance to unfeasible solution and other variables

Set  $item = 0$ ,  $level = 1$ ,  $optimal = 0$ ,  $count = 0$  and  $j = 1$

// Establish initial set of candidate portfolios

**For** ( $i = 1$ ) **to**  $n$  **do**

    Let  $p'$

    Set  $x_i = 0$  in  $p' \rightarrow p_j: \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$

    Set  $p_j \cup P$

// Checking feasibility and updating candidate portfolios

**Repeat**

**While** ( $item \leq |P| - 1$ ) **do**

        Let  $p_{item} = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\} \in P$

**If** ( $\sum_1^n b_i x_i \leq B$ ; for  $p_{item}$ ) **then**

$optimal = optimal + 1$

            Calculate  $\sum_1^n r_{s_i} x_i$  for  $p_{item}$

            Set  $item = item + 1$

**Else**

**If** ( $optimal > 0$ ) **then**

                // Saving fault position and tracking current level

                Let  $select = item$  and  $trace = level$

**If** ( $select \neq |P| - 1$ ) **then**

**Repeat**

                        // Reconsiders the combination of previously assigned variables, against search levels

                        Set  $level = level - 1$

                        Set  $distance = trace - level$

                        // Use refinement function to explore within set of candidate portfolios the next viable one

                        Backtracking ( $P, distance$ )  $\rightarrow p_k; k > item$

                        Let  $aux = k$

**Until** ( $level = 1$  or  $\sum_1^n b_k x_k \leq B$ )

**End**

```

Set  $level = trace$  and  $item = select$ 
// Update set of candidate portfolios and eliminate those that violate the constraint
While ( $k < |P|$ ) do
    Update  $P$  by making  $p_{item} = p_k$ 
    Set  $item = item + 1$ 
    Set  $k = k + 1$ 
End
Let  $item = select$ 
Let  $k = aux$ 
Set  $|P| = |P| - (k - item)$ 
End
Else
// Copying unfeasible combinations from the current level
Let  $P' \equiv P; P' = \{p'_j\}$  and  $P = \emptyset$ 
// Generate new portfolios towards the next level
For ( $j = 1$ ) to  $|P'|$  do
    Let  $p'_j$  of  $P'$ 
    If ( $x_n \neq 0 \rightarrow p'_j$ ) then
        // Searching for the position of the last excluded section in the current portfolio
        combination
        Let  $zero = n$ 
        Repeat
             $zero = zero - 1$ 
        Until ( $x_{zero} = 0$ )
        // Process of generating new next-level candidate portfolios from previous
        ones
        Set  $|P| = n - zero + count - 1$ 
        Generate  $(p'_j, zero) \rightarrow p_{count} \cup P$ 
        Let  $count = count + 1$ 
    End
End
Set  $level = level + 1$ 
Set  $item = 0$  and  $count = 0$ 
End
End
Until ( $optimal > 0$ )

```

## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES DE PROPORÇÃO

O nível de sensibilidade das seções em relação à distorção do portfólio de referência original, para cada padrão de avaliação, foi definido em função do resultado do teste de proporção para uma amostra. Mais precisamente, esse limiar é estabelecido através da associação feita com a significância da proporção esperada de modificações ( $\varphi_0$ ).

Por exemplo, assumindo que para  $\varphi_0 = 0.01$  ao nível de significância  $\alpha$ , obtenha-se a rejeição da hipótese nula (equação 10, seção 4.3), então para este teste tem-se que a seção  $s_i$  se encontra no nível de sensibilidade 1, o que corresponde a uma proporção de modificações de menos de 1%.

De forma análoga, a alteração entre os níveis ocorre em função da mudança no resultado da regra de decisão, ou seja, não havendo evidências para rejeitar  $H_0$  para um dado  $\varphi_0$ , realiza-se o processo de incremento nesse valor de referência ( $\varphi_0 = \varphi_0 + \phi$ ), e a atualização na inferência estatística do teste (neste caso utilizou-se o valor-p ou nível descritivo ao nível de significância de  $\alpha = 0.05$ ).

Diante disso, as tabelas a seguir apresentam em detalhes os dados dos testes de proporção realizados para todos os padrões de avaliação em relação as seções-chave (vide subseção 3.4.2), considerando para isso 50.000 repetições ( $G$ ).

Tabela A1 – Resultados do teste de proporção para o padrão L-T

Cenário		Baixo (L) - Triangular						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>CDZ</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{s_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>HR</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{s_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SEC</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{s_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SCEN</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{s_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>ALL</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{s_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						

Fonte: O Autor (2023).

Tabela A2 – Resultados do teste de proporção para o padrão M-T

Cenário		Médio (M) - Triangular						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>CDZ</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>HR</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,00006	0,00006	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SEC</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SCEN</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0,00002	0,00002	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>ALL</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,00038	0,00038	0	0,00018	0,00018	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						

Fonte: O Autor (2023).

Tabela A3 – Resultados do teste de proporção para o padrão H-T

Cenário		Alto (H) - Triangular						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>CDZ</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,00556	0,00596	0	0,0004	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>HR</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,0063	0,00902	0	0,00272	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16	0,01463	< 2.2E-16				
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SEC</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,00568	0,0065	0,00002	0,00082	0	0,00002	0
	Valor-p	< 2.2E-16	2,20E-15	< 2.2E-16				
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SCEN</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0,00674	0,00674	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16			1,40E-13		< 2.2E-16	
$\varphi_0 = 0,01$ $\varphi_0 = 0,06$	<b>ALL</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,01888	0,0295	0,00404	0,02162	0,011	0,00404	0
	Valor-p	1	< 2.2E-16		1	0,987	< 2.2E-16	
		< 2.2E-16						

Fonte: O Autor (2023).

Tabela A4 – Resultados do teste de proporção para o padrão L-U

Cenário		Baixo (L) - Uniforme						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>CDZ</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	< 2.2E-16						
	<b>HR</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
$\varphi_0 = 0,01$	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SEC</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	< 2.2E-16						
	<b>SCEN</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
$\varphi_0 = 0,01$	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
	Valor-p	< 2.2E-16						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>ALL</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	< 2.2E-16						

Fonte: O Autor (2023).

Tabela A5 – Resultados do teste de proporção para o padrão M-U

Cenário		Médio (M) - Uniforme						
$\varphi_0 = 0,01$	<b>CDZ</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0	0	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	< 2.2E-16						
	<b>HR</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
$\varphi_0 = 0,01$	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,00828	0,01788	0	0,0096	0	0	0
	Valor-p	6,08E-05	1	< 2.2e-16	0,1904	< 2.2e-16		
$\varphi_0 = 0,01$	<b>SEC</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,00006	0,00006	0	0	0	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	< 2.2E-16						
	<b>SCEN</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
$\varphi_0 = 0,01$	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0,00832	0,00832	0	0
	Valor-p	< 2.2e-16		8,74E-05			< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,01$	<b>ALL</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,00102	0,00158	0,00008	0,01624	0,01568	0,00008	0
$\varphi_0 = 0,06$	Valor-p	< 2.2e-16		1			< 2.2e-16	
		< 2.2e-16						

Fonte: O Autor (2023).

Tabela A6 – Resultados do teste de proporção para o padrão H-U

Cenário		Alto (H) - Uniforme						
<b>CDZ</b>		<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,01398	0,0447	0	0,03072	0	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	1		< 2.2e-16	1		< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,06$		< 2.2e-16	2,86E-08			< 2.2e-16		
<b>HR</b>		<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,04762	0,1058	0	0,05818	0	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	1		< 2.2e-16	1		< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,06$		0,007517	1	< 2.2e-16	0,04417		< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,11$		< 2.2e-16	0,001375			< 2.2e-16		
<b>SEC</b>		<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,0082	0,01508	0,0021	0,00688	0	0,0021	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	2,88E-05	1	< 2.2e-16	1,38E-12		< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,06$					< 2.2e-16			
<b>SCEN</b>		<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0	0	0	0,13558	0,13558	0	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p		< 2.2e-16			1	< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,06$			< 2.2e-16			1	< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,11$			< 2.2e-16			1	< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,16$					< 2.2e-16			
<b>ALL</b>		<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>
	$\hat{\varphi}_{S_i}$	0,01096	0,02912	0,00768	0,1316	0,11344	0,00768	0
$\varphi_0 = 0,01$	Valor-p	0,9836	1	1,04E-07		1	1,04E-07	< 2.2e-16
$\varphi_0 = 0,06$				< 2.2e-16		1	< 2.2e-16	
$\varphi_0 = 0,11$				< 2.2e-16		1	0,9929	< 2.2e-16
$\varphi_0 = 0,16$					< 2.2e-16			

Fonte: O Autor (2023).