



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

CRISTINA PEREIRA MEDEIROS

**MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA GERENCIAMENTO DE
RISCO EM GASODUTO COM BASE EM TEORIA DA UTILIDADE ESPERADA E
*RANK-DEPENDENT UTILITY***

Recife

2020

CRISTINA PEREIRA MEDEIROS

**MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA GERENCIAMENTO DE
RISCO EM GASODUTO COM BASE EM TEORIA DA UTILIDADE ESPERADA E
*RANK-DEPENDENT UTILITY***

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 Doutora em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar.

Recife

2020

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

- M488m Medeiros, Cristina Pereira.
Modelo de decisão multicritério para gerenciamento de risco em gasoduto com base em teoria da utilidade esperada e *Rank-Dependent Utility* / Cristina Pereira Medeiros - 2020.
130 folhas, il., gráfs., tabs.
- 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, 2020.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia de Produção. 2. *Rank-Dependent Utility*. 3. Gerenciamento de riscos. 4. Gasoduto de gás natural. 5. Decisão multicritério. I. Almeida, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Alencar, Marcelo Hazin (Coorientador). III. Título.
- UFPE
- 658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2020-274

CRISTINA PEREIRA MEDEIROS

**MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA GERENCIAMENTO DE
RISCO EM GASODUTO COM BASE EM TEORIA DA UTILIDADE ESPERADA E
*RANK-DEPENDENT UTILITY***

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 Doutora em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 26 / 11 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

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

Prof^a. Dr^a. Ana Paula Cabral Seixas Costa (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Eduarda Asfora Frej (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Florival Rodrigues de Carvalho (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. André Luís Policiani Freitas (Examinador Externo)
Universidade Estadual do Norte Fluminense

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por nos dar a oportunidade da vida e com ela os seus aprendizados. Sem dúvidas o doutorado foi uma fase de aprendizado inestimável, de caráter além daqueles esperados pelo meio acadêmico. Crescimento pessoal e profissional em um turbilhão de acontecimentos paralelos. Agradeço por nunca ter desistido e por ter tido pessoas no caminho que me sustentaram quando eu mais precisei. Agradeço aos meus pais distantes, que apesar da ausência física nunca mediram esforços e mantiveram-se firmes em suas orações por mim. Espero poder compensar toda falta neste tempo. Agradeço a Leonardo, por ter sido meu suporte físico e emocional, na saúde e na doença. Agradeço aos meus colegas de Laboratório, em especial a Lucas que me proporcionou grande ajuda na fase final deste trabalho. Agradecimento também a todos os professores do PPGEP que contribuíram para o meu enriquecimento acadêmico, em especial ao meu orientador Prof. Adiel de Almeida, pelos ensinamentos para além do profissional e acadêmico, e ao meu coorientador Prof. Marcelo Hazin, por embarcar nessa jornada conosco, além das contribuições e paciência empregados neste trabalho. Por fim, mas não menos importante, desejo expressar meu agradecimento ao CNPQ pelos recursos dispostos e que viabilizaram este trabalho.

RESUMO

O Gerenciamento de riscos em gasodutos se faz necessário a fim de identificar regiões de maior risco, ao longo da extensão de um duto, em que possa ocorrer falhas e suas eventuais más consequências. Neste contexto, um novo modelo de avaliação de riscos multidimensionais em Gasoduto de Gás Natural (GGN) é proposto neste estudo, baseado na *Utilidade Não Esperada (non-EU)*. Além da lacuna na literatura quanto a abordagem proposta aplicada ao contexto de GGN, o modelo de avaliação de riscos existente, precursor deste trabalho, tem como base o uso da Utilidade Esperada (*EU*) por meio da *Multi-Attribute Utility (MAUT)*. Tal modelo produz desvios de linearidade da *EU* os quais são estudados e apresentadas contribuições da abordagem de riscos por meio do *Rank-Dependent Utility (RDU)*. São conduzidos estudos matemáticos aplicados a dois gasodutos hipotéticos para verificação do comportamento do modelo proposto. Desvios da linearidade, quanto as preferências de probabilidade de ocorrência de consequências de um prospecto, mostraram necessidade de eliciação de uma função de ponderação de probabilidades além da tradicional função utilidade. Além disso, o RDU proporcionou que as consequências de cenários de perigo pudessem contribuir mais homoganeamente por meio de pesos de decisão, que são obtidos a partir da ordenação da melhor para a pior consequência. Em decorrência disso, as seções são melhor equilibradas quanto ao risco, evitando viés em direção ao valor de consequência do Cenário de Normalidade, como ocorrido no MAUT. As vantagens do gerenciamento de riscos com base na *non-EU* sobre a *EU* são mostradas a partir da hierarquização das seções de riscos de ambos os gasodutos, seguida de uma extensa análise de sensibilidade, produzidos pelo Sistema de Apoio a Decisão GU-M4OMO-DF1 desenvolvido para este fim. Resultados apontam que a abordagem de riscos com base em *non-EU* tem maior suporte na recomendação ao decisor quanto a priorização de seções de um Gasoduto de Gás Natural, quando comparada a abordagem da *EU*. A partir da análise multidimensional se tem uma análise mais estruturada de riscos e contribuição com impacto direto na redução de mortes/injúrias, danos ambientais e financeiros.

Palavras-chave: *Rank-Dependent Utility*. Gerenciamento de riscos. Gasoduto de gás natural. Decisão multicritério.

ABSTRACT

Risk management practices must be used to identify which stretches of a pipeline are most at risk in order to avoid failures or to prevent or mitigate the harmful consequences that failures may cause. Given this context, we propose a new multidimensional model for assessing risk in Natural Gas Pipelines (NGP), by considering non-Expected Utility (non-EU). Although there is a gap in the literature regarding this approach when applied to NGP, the model that has already been published in the literature is based on using Expected Utility (EU) and is underpinned by Multi-Attribute Utility Theory (MAUT). Hence, we focus on the deviations of EU from linearity in preference modeling and put forward other contributions on how to tackle risk by using Rank-Dependent Utility (RDU). And since deviations from linearity, with respect to specific probabilities of the consequences of a prospect occurring, showed the need to elicit both a weighted function of probabilities and the traditional utility function, two numerical examples are given. These show the results of applying our proposals to two different hypothetical NGPs and therefore illustrate the performance of the model and its behavior. Moreover, using RDU saw to it that the consequences of hazards could contribute more homogeneously by means of decision weights, which are obtained by ordering consequences from the best to the worst. As a result, the sections are better balanced in terms of risk, thereby avoiding bias towards the consequence value of the Normality Scenario, as occurred in MAUT. The advantages of risk management based on non-EU over EU are shown by first placing sections at risk of both NGPs in a hierarchical order, followed by conducting a thorough sensitivity analysis, using the GU-M4OMO-DF1 Decision Support System developed for this purpose. Results indicate that the risk approach based on non-EU better supports the recommendation made to the decision maker as to prioritizing sections of an NGP, when compared to the EU approach. By using multidimensional analysis, there is a more structured analysis of risks and the contributions that arise from this have a direct impact on reducing deaths and injuries, damage to the environment and adverse financial outcomes that could arise if accidents occur in an NGP.

Keywords: Rank-dependent utility. Risk management. Natural gas pipeline. Multicriteria analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Paradoxo de Allais	20
Figura 2 - Loterias do método TO	21
Figura 3 - Função Ponderação de Probabilidade	23
Figura 4 - Obtenção da Utilidade pelo método TO	47
Figura 5 - Densidade de massa de probabilidade d sendo distribuída entre as consequências x_2 e x_0	50
Figura 6 - Prospecto para a seção a_i	56
Figura 7 - Fluxograma de funcionalidades do SAD para Cálculo do RDU, análise de sensibilidade e exportação de resultados.....	61
Figura 8 - Tela do SAD referente a parte 2 da Elicitação da Função Utilidade [42] com ajuste de curva dos pontos elicitados	63
Figura 9 - Tela do SAD contendo Exemplo de Resultados da Elicitação da Função Ponderação [42] e ajuste de curva de Prelec [45]	63
Figura 10 - Tela do SAD contendo Exemplo da Parte 1 da Elicitação das Constantes de Escala [16]	64
Figura 11 - Tela do SAD Referente a parametrização da Análise de Sensibilidade	66
Figura 12 - Tela do SAD Referente a Estatística Descritiva obtida das simulações na Análise de Sensibilidade	67
Figura 13 - Tela do SAD Referente a Análise de Sensibilidade da variação das seções do gasoduto.....	68
Figura 14 - Gráficos Função Utilidade e Função Ponderação para os critérios	75
Figura 15 - Número de Simulações que rejeitam H_0 para S8	82
Figura 16 - Número de Rankings Exclusivos obtidos para cada τ para S8	83
Figura 17 - Número de Simulações que rejeitam H_0 para S12	88
Figura 18 - Número de Rankings Exclusivos obtidos para cada τ para S12	89
Figura 19 - Histograma de τ Obtidos para S8 com abordagem RDU	91
Figura 20 - Histograma de τ Obtidos para S8 com abordagem MAUT	91
Figura 21 - Box Plot dos valores de τ para S8 obtidos no MAUT	92
Figura 22 - Box Plot dos valores de τ para S8 obtidos no RDU	93
Figura 23 - Histograma de τ Obtidos para S12 com abordagem MAUT	94
Figura 24 - Histograma de τ Obtidos para S12 com abordagem RDU	95

Figura 25 - Box Plot dos valores de τ para S12 obtidos no MAUT	96
Figura 26 - Box Plot dos valores de τ para S12 obtidos no RDU	96
Figura 27 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var5%	101
Figura 28 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var10%	102
Figura 29 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var15%	102
Figura 30 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var20%	103
Figura 31 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var5%	104
Figura 32 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var10%	104
Figura 33 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var15%	105
Figura 34 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var20%	105
Figura 35 - Resultados de S8 para Variação das seções no Ranking	107
Figura 36 - Resultados de S12 para Variação das seções no Ranking	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Método da Bisseção para obtenção de um ponto da função de Ponderação da Probabilidade $W^{-1}(0,5) \in [0,1]$	51
Tabela 2 - Elicitação da função Ponderação das Probabilidades pelo Método Midweight.....	52
Tabela 3 - Parâmetros da função utilidade e Constantes de Escala para cada critério	73
Tabela 4 - Função Ponderação por Aproximação Prelec para os Critérios	73
Tabela 5 - Priorização das seções dos gasodutos com base no RDU para S12 e S8.....	76
Tabela 6 - Priorização das seções dos gasodutos com base no MAUT para S12 e S8.....	77
Tabela 7 - Resultados obtido no MRDU e MAUT para S8	79
Tabela 8 - Valores de τ obtidos nas simulações de S8	80
Tabela 9 - Grau de Significância para os Valores médios de τ de S8	81
Tabela 10 - Resultados obtido no MRDU e MAUT para S12.....	86
Tabela 11 - Valores de τ obtidos nas simulações de S12	87
Tabela 12 - Grau de Significância para os Valores médios de τ de S12.....	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1.1	Gerenciamento de Riscos	18
2.1.2	Teoria Da Utilidade Esperada (EU) e Teoria da Utilidade não-Esperada (Non-EU).....	19
2.1.3	Rank-Dependent Utility (RDU)	22
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.2.1	Modelos Multicritério para Gerenciamento de Risco em Gasodutos	25
2.2.2	Algumas considerações sobre análise de risco em GGN.....	27
2.2.3	O modelo de Utilidade Não-Esperada (Non-EU) no GGN	28
2.3	SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTA TRABALHO.....	32
3	MODELO DE RISCOS EM GGN COM BASE NA UTILIDADE ESPERADA.....	34
3.1	DESCRIÇÃO DO MODELO DE RISCOS EM GGN BASEADO NA EU.....	34
3.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O MODELO BASEADO NA EU.....	36
4	MODELO PROPOSTO DE RISCOS EM GGN COM BASE NO RANK- DEPENDENT UTILITY	40
4.1	DESCRIÇÃO DO MODELO	40
4.1.1	Identificação dos decisores, individual ou grupo	41
4.1.2	Identificação dos objetivos	42
4.1.3	Estabelecimento dos critérios relevantes	42
4.1.4	Estabelecimento da estrutura do espaço de ações, da problemática e desenvolvimento do processo de geração de alternativas	43

4.1.5	Avaliação e identificação de fatores relevantes que não estão sob controle do decisor.....	44
4.1.6	Modelagem de preferências do decisor.....	44
4.1.7	Avaliação intra-critério.....	45
4.1.7.1	Obtenção da função utilidade.....	46
4.1.7.2	Obtenção da função ponderação das probabilidades.....	48
4.1.8	Avaliação intercritério.....	53
4.1.9	Avaliação global das alternativas.....	53
4.1.10	Análise de sensibilidade e robustez.....	57
4.1.11	Análise dos resultados e elaboração de recomendação para o decisor.....	59
4.1.12	Implementação da decisão.....	60
4.2	SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS BASEADO EM RDU.....	60
4.2.1	Importação dos Parâmetros A, B e C.....	62
4.2.2	Elicitação das preferências do decisor.....	62
4.2.3	Cálculo de Risco e valores RDU.....	64
4.2.4	Análise de Sensibilidade.....	65
4.2.4.1	Parametrização da Análise de Sensibilidade.....	65
4.2.4.2	Estatística descritiva e teste de Hipóteses.....	66
4.2.4.3	Análises da Variação das seções do GGN.....	67
4.2.5	Exportação de Resultados.....	68
5	APLICAÇÃO NUMÉRICA DOS MODELOS DE RISCO PARA GGN.....	70
5.1	CARACTERÍSTICAS DOS GASODUTOS.....	71
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO COM BASE NO RDU.....	71
5.2.1	Elicitação de preferências.....	72
5.2.2	Obtenção das seções de Risco.....	75
5.3	APLICAÇÃO DO MODELO COM BASE NO MAUT.....	77
5.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS RDU E MAUT.....	78
5.4.1	Análises de S8.....	78
5.4.2	Análises de S12.....	85
5.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	89
5.5.1	Geração de Informação para S8.....	90
5.5.2	Geração de informação sobre S12.....	94

5.5.3	Inferências sobre os resultados a partir das comparações obtidos por meio de MAUT e RDU.....	97
5.5.4	Recomendações finais.....	106
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110
6.1	CONCLUSÕES	110
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS.....	114
	APÊNDICE A - DETALHES DA ANÁLISE DE RANKINGS E DE VARIAÇÕES DAS SEÇÕES PARA S8	121
	APÊNDICE B- DETALHES DA ANÁLISE DE RANKINGS E DE VARIAÇÕES DAS SEÇÕES PARA S12	125

1 INTRODUÇÃO

O transporte de gás natural por meio de dutos é utilizado em diferentes pontos da cadeia de suprimentos, desde as instalações de processamento, estocagem até pontos de entrega do gás [1]. Em 2019, o governo brasileiro lançou o Programa Novo Mercado de Gás, objetivando a competição, além de investimentos nacionais e estrangeiros. Este programa prevê que até o ano de 2030 o país se destaque no cenário mundial de produção de gás natural (GN), objetivando ser um dos 5 maiores do setor produtivo [2]. Este programa tem como resultados gerais esperados além da melhoria do gás do Pré-sal descobertos nos últimos anos, também ampliar a infraestrutura de escoamento, transporte e distribuição do GN. Estima-se ainda, que com este aumento, seja retomada a competitividade da indústria no país. Além disso, espera-se crescimento do Produto Interno Bruto com a redução do preço de energia proveniente do GN em uso em termelétricas [3].

O relatório mais recente, o 5º fornecido pelo Programa (julho a setembro de 2020), mostra que apesar do enfrentamento ao Corona vírus no cenário mundial, foi observada a melhora quanto ao trimestre anterior, nos quais os preços do GN apresentaram leve aumento [4].

Para o atingimento dos objetivos do Programa, ressalta que um dos passos para o desenho do novo mercado de GN no Brasil diz respeito ao aperfeiçoamento para o Sistema de Transporte. De acordo com este relatório, para o mês de setembro de 2021 é previsto investimento em gasodutos de transporte com CAPEX de 0,13 R\$ bilhões e um total de 32,82 R\$ bilhões para 21 projetos relacionados ao GN entre os anos de 2021 e 2032 [5].

O projeto de Lei PL 4.476/2020 sobre a Nova Lei do Gás está em tramitação no Plenário do Senado Federal [6], dispondo sobre as atividades concernentes ao transporte de GN. A partir dela, haverá transformação no modelo de transporte na malha dutoviária do GN no Brasil, sendo semelhante ao modelo utilizado na comunidade europeia [7].

Tendo em vista a expansão do volume de GN produzido e seu transporte na malha energética nacional, destaca-se a necessidade constante e periodizada de planos de fiscalização e inspeção dos gasodutos a fim de prevenir e mitigar riscos aumentando a confiabilidade do fornecimento do gás[8]. Ressalta-se ainda que o gerenciamento de riscos aborda diferentes aspectos em sua análise, de maneira a compreender melhor a realidade. De acordo com *European Gas Pipeline Incident Data Group* (EGIG), as fatalidades e ferimentos graves provenientes de um acidente em Gasoduto de Gás Natural (GGN) acontecem

principalmente a empregados e contratados na rede de transporte, a terceiros envolvidos na causa do acidente, equipes de resgate em emergências, além do público em geral [9]. Além disso, a explosão pode ocasionar crateras no solo, devastação de área ambiental e à propriedades de terceiros, a exemplo daquele ocorrido na Bélgica em 2004, com perdas equivalentes a 100 milhões de euros [10]. Além disso, um acidente em gasoduto no Canadá provocou incêndio por 12 horas até ser cessado [11]. Em vista disso, é crucial o estabelecimento de métricas de risco que possam compreender tais aspectos e contribuir, portanto, para o melhor gerenciamento de riscos de trechos ao longo da extensão de um GGN.

Em vista das diferentes perspectivas de risco apresentadas anteriormente e por se tratar de uma avaliação de riscos de eventos raros, abordagem de riscos multidimensionais em GGN baseada em Utilidade Não-Esperada (*Non-Expected Utility: Non-EU*) por meio do *Rank-Dependent Utility* (RDU) é conduzida neste trabalho. Acrescenta-se que a *Non-EU* tem a contribuir na análise multidimensional de riscos em gasodutos, uma vez que este lida com questões financeiras, humanas e ambientais, contextos que podem ser sensíveis a efeitos da Utilidade Esperada (*EU*), além da avaliação matemática de risco ser estabelecida a partir de eventos raros [12]–[14].

A verificação de mudança de percepção para diferentes quantias e suas probabilidades são largamente estudadas. Além disso, há um indicativo de que diversas áreas de interesse de estudos na área de recursos ambientais e econômicos possuem probabilidades ou muito baixas de ocorrência, bem como podem ser caracterizadas por ambiguidade, dois fatores que demonstram que podem violar a *EU* [15].

Anteriormente, os autores Brito & de Almeida [12] propuseram abordagem de riscos multidimensionais para definição de seções de riscos de um Gasoduto de Gás Natural (GGN), incorporando não apenas a perspectiva de riscos humanos, ambientais e financeiros, como também preferências de decisores em seu modelo matemático. Acrescenta-se que este modelo é baseado na *EU* para estabelecimento de preferências, e na Teoria da Utilidade *Multiatributo* (*multi-Attribute Utility-MAUT*) [16].

Por outro lado, abordagem de riscos e suas contribuições baseadas na Utilidade Não-Esperada tem sido amplamente abordadas na literatura, com aplicações em diferentes campos de estudo, como pode-se citar: a avaliação de agricultores na avaliação de seguros e contratos [17]; alocação de recursos em bases militares [18]; avaliação multicritério pra priorizar sistemas de armazenamento de energia [19]; avaliação de consequências financeiras [20]–[22]; ambientais [15], entre outros.

Ressalta-se ainda que perguntas realizadas a exemplo daquelas feitas no paradoxo de Allais [23], indicam violação de *EU* para cerca de 52% dos entrevistados no contexto de saúde humana, com violação da *EU* principalmente quando perguntas são feitas entre um valor certo e uma loteria [24]. Neste contexto, o trabalho visa contribuir com a análise de riscos em GGN à luz do RDU.

1.1 JUSTIFICATIVA

Ao longo dos anos, para a análise de riscos, tem-se considerado a perspectiva financeira como uma parcela de contribuição na avaliação [25], incluindo portanto, outros aspectos ou critérios de risco, a exemplo do exposto em [26], que aborda amplamente a evolução de modelos multicritério no contexto de manutenção e confiabilidade.

A Tomada de Decisão Multicritério (MCDM/A) é extensamente revisada por [27] no contexto da política de energia e nos problemas de tomada de decisão. Esses autores mostram muitas circunstâncias de abordagem multicritério tanto para energias renováveis quanto não-renováveis para avaliação de energia. O MCDM/A pode ser aplicado para problemas de tomada de decisão individuais [28] e de grupo [29] no contexto energético.

A análise de risco Multidimensional de gás natural tem sido realizada na tomada de decisão visando orientar o decisor a dispender melhores esforços para a priorização e seções de gasodutos. A análise anterior a este trabalho compreende a *EU* e a Teoria da Utilidade Multi-Atributo [12], [13] para incluir as preferências do decisor e agregar os atributos de risco, respectivamente. Recentemente, uma melhoria de análise dos resultados de [3] foi feita visando identificar incertezas no modelo dos parâmetros baseados na Análise de Sensibilidade Global [30], cujos níveis de incerteza dos parâmetros do modelo podem afetar a recomendação quanto a priorização das seções de risco do GGN.

Medidas de risco para um conjunto de seções de GGN considerando aspectos humanos, ambientais e financeiros do modelo [12] são baseados em pequenas probabilidades de cenários de risco, caracterizados quando ocorre uma falha em uma seção do duto e por altas probabilidades do cenário de Normalidade, ou seja, quando o gasoduto funciona normalmente. Além disso, a *EU* assume uma percepção linear sobre as dimensões de probabilidade. É sabido que cada indivíduo pensa diferente sobre a possibilidade de consequências e portanto, preferências de linearidade podem não ser verdade [21], uma vez que é ato comum o conservadorismo para avaliação de risco [31].

Quando o modelo de decisão envolve probabilidades pequenas e grandes, *Non-EU* pode ser mais adequada. Para resultados extremos são dados pesos mais elevados do que para os resultados médios [32]. Neste contexto, o RDU analisa uma nova perspectiva, classificando as consequências da melhor até a pior. Esta abordagem permite que as consequências ordenadas sejam analisadas de maneira a ponderá-las considerando sua contribuição com consequências de boas notícias, ou seja, melhor do que elas.

A mitigação de riscos pode ser conduzida por meio de projetos de melhorias e de manutenção [33]. No aspecto de projetos, aplicação da *Non-EU* é também empregada para avaliação de riscos investimentos em projetos de maneira a identificar atitudes de risco e aversão a perda na decisão nesse contexto [34], indicando que esta análise comportamental e cognitiva dos gerentes de projeto constituem uma abordagem essencial para os riscos de investimentos devido a singularidade dos projetos e escolha de decisão pouco frequentes.

Sendo assim, é reduzida consideravelmente a disparidade de avaliação das consequências extremas, para casos específicos, como o abordado neste trabalho. Até o presente momento, com base na pesquisa e análise da literatura realizada, não se verifica a utilização da abordagem da RDU na análise multidimensional de riscos em seções de GGN. Esta lacuna na Literatura e perspectiva de melhoria do modelo existente é trabalhado de maneira a entender as consequências desta nova abordagem para a tomada de decisão. Para isto, pretende-se comparar os resultados obtidos na abordagem tradicional utilizando a *EU* com a *Non-EU*.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste na formulação de um modelo de avaliação multicritério de riscos multidimensionais em GGN incorporando a *Non-EU*, como meio de produzir uma maior assertividade na recomendação de áreas de risco do referido gasoduto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Em vista de alcançar o objetivo geral deste trabalho, busca-se:

Entender os aspectos específicos (intrínsecos) ao modelo que justificam uma nova abordagem na elicitación de preferencias do decisor quanto a utilidade de seus critérios e consequências;

Estabelecer o modelo matemático utilizando a abordagem de *Non-EU* para estimação de riscos em cada critério de decisão;

Comparações sobre a utilização da abordagem considerando *EU* versus *Non-EU* e suas contribuições

Agregação das medidas de risco unidimensionais em uma medida única por agregação multicritério e geração de resultado em uma única medida de risco;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 6 capítulos a seguir:

O Capítulo I, a Introdução, apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos do estudo. O Capítulo 2, apresenta uma breve fundamentação teórica sobre o tema do trabalho, proporcionando entendimento geral sobre o que será discutido. Este capítulo conduz também uma Revisão Bibliográfica referente a análise de riscos em gasodutos de Gás Natural e a implicação dos conceitos de Utilidade Não Esperada. O capítulo 2 é concluído pela Síntese do Estado da arte e Posicionamento deste trabalho. Modelo de Riscos considerando *EU* é então apresentado no capítulo 3, evidenciando as contribuições realizadas para este modelo. Na sequência, o Modelo Proposto de análise de riscos em GGN com base na *non-EU* é apresentado no capítulo 4, descrevendo-o em 12 fases, segundo a Literatura relevante. Em seguida, a aplicação numérica hipotética do modelo é apresentada no capítulo 5 proporcionando meios de analisar os impactos dos resultados obtidos comparando-os com o método de risco com base na *EU*, por meio de discussão dos resultados. A partir deles são feitas inferências sobre o modelo proposto, seguido do Capítulo 6 com as Conclusões e recomendações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados a fundamentação teórica, com apresentação de conceitos referentes ao trabalho de maneira a melhor contextualizar o leitor sobre o tema, bem como a revisão bibliográfica de temas relevantes ao estudo.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base conceitual utilizada para o trabalho é apresentada a seguir e consiste em apresentar compreensão acerca do tema de estudo que compreende gerenciamento de riscos , Teoria da Utilidade e *Non-EU*, sendo esta apresentada sob a forma do *Rank-Dependent Utility*, método de avaliação de riscos com base na ordenação de consequências e da obtenção de funções de ponderação de probabilidades em um prospecto.

2.1.1 Gerenciamento de Riscos

Avaliação e gerenciamento de risco tem sido estudados de forma mais intensa nos últimos 30-40 anos, conforme extensa revisão realizada por [35]. Mesmo obtendo novas abordagens de gerenciamento de riscos, este se baseia em pilares básicos que consistem na estratégia principal de gestão disponível e a estrutura do processo de gestão. Estas estratégias compreendem o tratamento de riscos, prevenção, redução, que podem usar avaliações de risco relativas ou absolutas. Também faz parte do gerenciamento de riscos identificar eventos e estabelecer causas e consequências entre eles, como uso de árvores de falha, árvores de eventos e Métodos Bayesianos, julgamentos de probabilidades, avaliação e tratamento do risco.

Diferentes conceitos de análises e gerenciamento de riscos são abordados na literatura [36]. Além da análise das consequências, as perspectivas de risco devem satisfazer as expectativas do estado e da sociedade, de maneira que o gerenciamento de riscos acarrete benefícios para a sociedade [25]. Acidentes nucleares e terrorismo, por exemplo, são de extrema importância para análise de riscos, apesar das baixas probabilidades associadas. Uma vez ocorrida falha do sistema, altas consequências podem estar diretamente relacionadas, principalmente no que se refere a vidas humanas. Além disso, o valor esperado da perda,

como definição clássica para os riscos, não faz distinção tanto para eventos raros com altas consequências quanto para eventos frequentes com baixas consequências [36].

Acrescenta-se ainda que é preciso ter em mente que em sistemas com grandes incertezas não se pode tomar a melhor decisão pois ela não existe [37]. Sendo assim é necessário um conjunto de ações de maneira a entender o problema de maneira macro e relacionar os possíveis cursos de ação.

O gerenciamento de riscos é aplicado a vários ramos de atuação e podem agregar múltiplas formas de avaliação. Conceitos de Utilidade podem incorporar ao modelo de riscos a avaliação cognitiva de preferências de um agente de decisão [25] que tem como base uma avaliação matemática e probabilística rigorosa [35].

2.1.2 Teoria Da Utilidade Esperada (EU) e Teoria da Utilidade não-Esperada (*Non-EU*)

Por utilidade, pode-se entender como a desejabilidade sobre determinada consequência em um espaço de ações para tomada de decisão [16]. Para obtenção da utilidade, três métodos são comumente utilizados: 1) a obtenção direta, principalmente quando há um conjunto discreto e pequeno de consequências; 2) o equivalente certo, utilizando-se da bissecção para dividir o espaço de consequências e conduzir perguntas ao decisor de loterias com 50% de obter a melhor consequência até um número de perguntas necessárias para atingir determinado nível de precisão [16], e por fim, 3) a probabilidade equivalente, nas quais as perguntas são feitas mediante loterias que fixam os valores das consequências e estimam a desejabilidade com relação as probabilidades [38], [39]. A Utilidade Esperada pode então ser descrita como o valor Esperado da Utilidade, ou seja, o somatório das consequências ponderadas por suas probabilidades de ocorrência.

Na Teoria da Utilidade, pressupõe-se que o decisor é capaz de obedecer a axiomas da teoria [40], apresentados na sequência. Tomando como base as consequências A, B e C, e a relação binária de preferências P (preferência estrita) e I (indiferença), probabilidades p e q, sendo $0 < q < p < 1$, tem-se os seguintes axiomas [41]:

Axioma da completude ou ordenabilidade: tomadas duas consequências A e B para comparação, pode-se dizer que $A \succ B$ ou $A \sim B$ ou $B \succ A$.

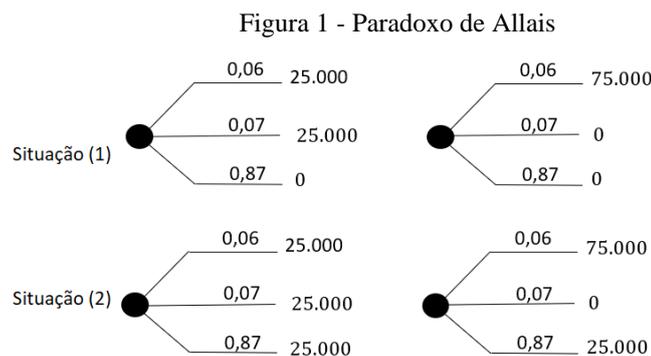
Axioma da transitividade: se $A \succ B$ e $B \succ C \Rightarrow A \succ C$; se $A \sim B$ e $B \sim C \Rightarrow A \sim C$.

Axioma Arquimediano: se $A \succ B$, então existe probabilidades p e q tal que $[A, p; C] \succ B \succ [A, q; C]$.

Axioma da independência: se $A \succ B$, então existe p que para qualquer C : $[A, p; C] \succ [B, p; C]$.

Alguns desvios da *EU* foram verificados ao longo dos anos, destacando-se o efeito certo de loterias e o julgamento de probabilidades de loterias de maneira não linear[23], [39]. Extensa avaliação de desvios da *EU* é apresentada em [39], destacando situações de mudança de preferência que não podem ser explicadas sem violar as propriedades da *EU*, mas que são possíveis e explicáveis a partir do conceito de avaliações que ficaram conhecidas como Utilidade Não Esperada.

Acrescenta-se que a origem do desenvolvimento da *Non-EU* se deu com o objetivo de moldar-se ao Paradoxo de Allais, que é mostrado na Figura 1.

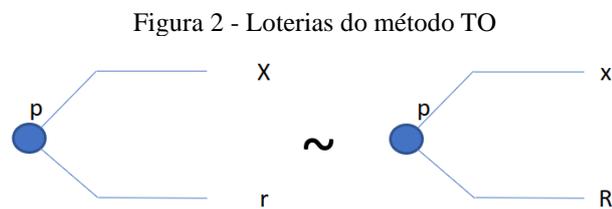


Adaptado de WAKKER (2010).

As situações (1) e (2) apresentam opções de escolha no qual o decisor necessita estabelecer preferência entre o prospecto da direita ou da esquerda. Os estudos de Allais mostraram que o prospecto da direita é preferível à situação da Esquerda para a Situação (1), enquanto na Situação (2) a preferência é invertida, sendo o prospecto da esquerda mais preferível. Estes resultados não deveriam alterar-se, uma vez que, ao retirar o nível mais baixo do prospecto em ambas as situações, as inequações da utilidade seriam exatamente iguais. Sendo assim, ou o decisor deveria escolher o prospecto da esquerda ou da direita em ambas as situações. A mudança de preferência indica violação da *EU*, violando, portanto, o axioma da independência.

Em vista disso, novos métodos de obtenção da função utilidade, foram propostos. O método Trade-Off (TO) [22], [38] é apresentado para os casos de decisão sob risco e sob

incerteza. Para ambos, são definidos dois valores de referência r e R , os quais são definidos fora do intervalo do espaço de consequências. Estes são estabelecidos de maneira que $R > r$ e servem para dar suporte ao processo de perguntas para obtenção dos valores de utilidade. O decisor deve responder entre loterias, como descrito na Figura 2, cujos valores de X e x estão compreendidos no espaço de consequências. Os valores de X são variados até que o decisor revele indiferença entre os prospectos como proposto por [38] enquanto que é definido um número de perguntas específicos para obtenção do valor de X indiferente em [22], [42], delimitando em 6 e 5 perguntas respectivamente para estes autores.



Será apresentada de maneira resumida o processo de obtenção da utilidade pelo Método TO. Da Loteria descrita na Figura 2, pela teoria da utilidade, tem-se que a Loteria do Lado direito e esquerdo possuem a mesma desejabilidade para um certo nível de X , ou seja, quando atinge a indiferença entre elas, sendo portanto possível igualar as utilidades, conforme Equação (2-1). Tomando o lado esquerdo com utilidades de x 's e o lado direito da equação com os termos de r 's, obtém-se a Equação (2-2).

$$pu(X) + (1 - p)u(r) = pu(x) + (1 - p)u(R) \tag{2-1}$$

$$p(u(X) - u(x)) = (1 - p)(u(R) - u(r)) \tag{2-2}$$

Ao substituir os valores de X e x nas loterias da Figura 2 por valores de Y e y , respectivamente e substituindo nas Equações (2-1) e (2-2), tem-se que:

$$p(u(Y) - u(y)) = (1 - p)(u(R) - u(r)) \tag{2-3}$$

Como as Equações (2-2) e (2-3) possuem o lado direito da equação iguais, pode-se igualar o lado esquerdo destas, resultando em Equação (2-4). Essas diferenças de utilidade podem ser utilizadas para elicitación da utilidade. Para mais detalhes e provas matemáticas, consultar a bibliografia relacionada [38].

$$u(X) - u(x) = u(Y) - u(y) \quad (2-4)$$

Por fim, das vantagens de utilização do TO no processo de eliciação da função utilidade, destaca-se o seu emprego para quando probabilidades não são conhecidas, além de ser aplicável se a utilidade depende do estado da natureza [38]. Estes autores fizeram comparações entre os resultados obtidos pelo método TO àqueles obtidos pelo Equivalente Certo e Probabilidade Equivalente. Como resultados, observa-se violação da *EU* de maneira mais evidente para probabilidade próximas de 0 e de 1 conduzindo ao efeito certo. Isto significa dizer que há supervalorização dos valores certos, sem risco (com probabilidade igual a 1), em comparação com as loterias de risco. As loterias sem risco produzem uma consequência com probabilidade p igual a 1 ocorre tanto nas perguntas do Equivalente certo quanto na Probabilidade Equivalente.

2.1.3 Rank-Dependent Utility (RDU)

Em termos formais, um prospecto mapeia estados reais (consequências), que descrevem resultados para cada estado, se este for verdadeiro. Em outras palavras, são variáveis aleatórias, assumindo um número finito de valores, que podem ou não serem definidas com probabilidades especificadas [39].

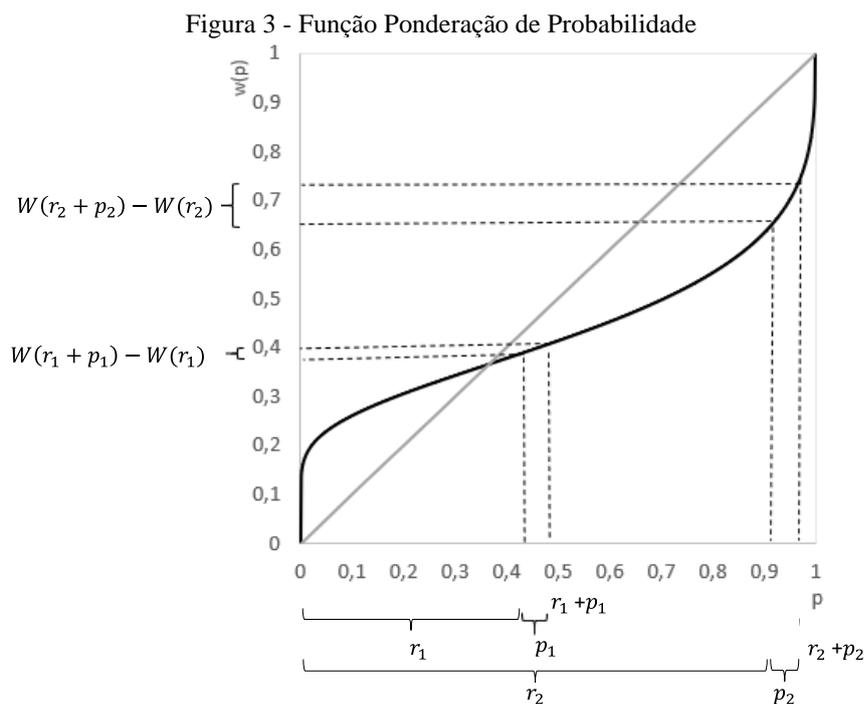
Sob certas condições, desvios da linearidade das probabilidades de um prospecto são encontradas na literatura [43]. Elas acontecem devido a situações no processo de decisão que violam a *EU*: o efeito certeza, a partir do axioma da substituição, tomando como preferível eventos com altas probabilidades de ocorrerem; o efeito possível, nas situações onde ganhar é possível, mas não é provável, tende para um prospecto no qual mais se ganha; efeito reflexão, quando envolve perdas e ganhos; seguro probabilístico e efeito isolamento [43].

Neste sentido, a teoria Prospectiva foi então criada de maneira a identificar a real ponderação destas probabilidades. Esta função é então chamada de função ponderação de probabilidade, na qual a ponderação de uma probabilidade p , é definida por $W(p)$ de maneira que $W(0)=0$ e $W(1)=1$, de acordo com a teoria da probabilidade. Esta função sugere super-ponderação das pequenas probabilidades e sub-ponderação de altas probabilidades para a maioria dos casos [39], [44], [45]. Ao longo dos anos, encontrou-se indícios de que além da não linearidade das probabilidades, existisse também uma relação existente da probabilidade com sua função decumulativa, ou seja, da probabilidade ordenada pela consequência,

tornando o resultado dependente do ranking (*Rank-Dependent Utility RDU*). A Figura 3 apresenta uma função ponderação de probabilidade de forma s-shape invertida evidenciando desvios da linearidade da avaliação de probabilidades. Com esta nova abordagem, são obtidos pesos de decisão que representam contribuições marginais e que dependem do ranking. Da Figura 3 verifica-se que $p_1 = p_2$, no entanto, por p_2 estar em uma posição inferior do rank no prospecto, esta possui uma maior ponderação, representada no eixo de $W(p)$. Desta maneira, quanto maior for a inclinação da curva próximos aos valores extremos, maior será a ponderação destas probabilidades [39].

Na Figura 3 também são observadas as propriedades de subaditividade baixa e alta, refletindo o efeito possível e o efeito certeza do paradoxo de Allais. Dela, observa-se desvios da função linear, principalmente nos extremos. Na baixa subaditividade, um evento tomado como impossível de acontecer, com probabilidade aproximadamente zero, torna-se possível, optando por esta escolha. Por outro lado, na alta subaditividade, um evento que já era possível, torna-se certo (ou quase) com probabilidade próxima de um. Ambos os casos violam o axioma da independência da *EU*. Desta forma, a propriedade da subaditividade pode então ser entendida como a inclinação média da função ponderação entre duas probabilidades.

Quando a inclinação é maior para probabilidades próximas de zero do que para aquelas próximas de um, tem-se que o efeito possível excede o efeito certeza e, o efeito certeza excede o efeito possível, caso contrário [46].



Adaptado de WAKKER (2010).

Outra abordagem também considera características semelhantes com o RDU. A teoria Prospectiva Cumulativa (*Cumulative Prospect Theory -CPT*) [21], além de basear a decisão na ordenação dos resultados e ponderação das probabilidades, esta obtém duas funções ponderação das probabilidades, sendo uma para ganhos e outra para perdas.

Há relação entre *CPT*, *RDU* e *EU*. Para o caso em que ambas as funções da *CPT* são simétricas (duais), com relação a um ponto de referência, a *CPT* é reduzida ao *RDU*. De maneira análoga, se $W(p)=p$, verifica-se a lineariedade da probabilidade e, portanto, *RDU* é reduzido a *EU* [39].

É possível entender a ordenação do *RDU* como a probabilidade de receber uma boa notícia, ou seja, a probabilidade de obter um resultado melhor do que na atual consequência (obtida pela ordenação do melhor para o prior). Os passos para obtenção do Valor *RDU* de um prospecto apresentados na sequência são obtidos em [39].

Passo1-Dado um prospecto, reescrevê-lo ordenando suas consequências da melhor para a pior;

Passo 2- para cada consequência, calcule o rank r , que é a probabilidade de receber uma consequência melhor;

Passo e- para todos os ranks calcule o seu valor w correspondente. Ponderação do rank;

Passo 4- para cada consequência, calcule a contribuição marginal w para a probabilidade da consequência par o seu rank;

Passo 5-determine a utilidade de cada consequência

Passo6- multiplique a utilidade da consequência por seus pesos de decisão e some os resultados.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente estudo tem contribuição na análise de risco em gasodutos de gás natural, que visa obter um modelo matemático de estimação de riscos multidimensionais, gerar informação ao decisor e contribuindo para a mitigação de riscos. São apresentadas na sequência a perspectiva de análise multicritério para estabelecimento de riscos em gasodutos, bem como uma breve avaliação das medidas de risco geralmente abordadas na literatura. Em

seguida, são feitas considerações sobre a estimativa de riscos abordada e a contribuição da Utilidade Não Esperada para este estudo.

2.2.1 Modelos Multicritério para Gerenciamento de Risco em Gasodutos

O conceito de risco pode variar de acordo com a literatura [36], [47]. No entanto, as diferentes definições sempre compreendem os seguintes elementos: eventos, consequências e probabilidades. A probabilidade é usada como meio de exprimir incertezas, mas [36] questiona a qualidade de sua obtenção. A fim de estabelecer a probabilidade de eventos junto a especialistas, considerando múltiplos desastres naturais, os autores [48] apresentam um modelo de análise Fuzzy aplicado a árvore de falhas na análise de gasodutos. Ressaltam ainda que esta análise se faz necessária uma vez que há dificuldades de obter dados históricos de ocorrências de acidentes.

À luz das consequências decorrentes de falhas em gasodutos, extensa revisão de literatura sobre políticas de manutenção é realizada [49] e aponta avaliações internas e externas do gasoduto, por meio de avaliação de temperaturas, monitoramento acústico, avaliação de corrosões. Ressaltam ainda que apesar de melhorias significativas nos processos de inspeção e manutenção dos dutos, há incerteza na no processo de inspeção, citando o exemplo da identificação de pequenos furos na estrutura do duto. Para a detecção destes furos, faz-se necessário segmentar o duto em partes menores, causando altos montantes financeiros na inspeção, tornando-a inviável.

Além disso, dados de causas de acidentes, com base no relatório do *European Gas Pipeline Incident Data Group* (EGIG) entre os anos de 2004 a 2013, indicam que interferência externa e corrosão, juntos, correspondem a mais de 50% das causas apontadas de acidentes em gasodutos de gás natural [50]. Causas externas podem incluir escavações próximas ao gasoduto, bem como interferências humanas de atividades de manutenção.

Isso posto, o presente trabalho aponta a importância do gerenciamento de riscos em gasodutos de gás natural de maneira a estabelecer segmentos do gasoduto que apresentem maior risco, reduzindo esforços de inspeção, além da intenção de reduzir a intervenção nestes dutos, gerenciando os recursos financeiros de manutenção de maneira mais eficiente e mitigando riscos.

Como pôde-se evidenciar nos parágrafos anteriores, a análise de risco em gasodutos é realizada ainda hoje, em sua maioria, considerando apenas um aspecto por vez. Geralmente,

estudo de riscos em gasodutos consideram características físicas [51], e sistemas de identificação de vazamentos da quantidade de gás nos dutos [52].

No modelo [12], pela primeira vez, foi apresentada uma abordagem multicritério aplicada a riscos em gasoduto de gás natural, destacando sua importância na tomada de decisão em termos de risco. Graças à melhoria de seu modelo, perspectivas de risco além dos aspectos financeiros puderam ser realizadas. Proposição de modelos utilizando classificação das seções do gasoduto [13] e abordagem multicritério para análise em gasodutos de hidrogênio [14] foram verificados posteriormente.

Os autores [53] apresentam aplicação do método TODIM (*Interactive and Multicriteria Decision Making*), método que utilizam conceitos da Teoria Prospectiva juntamente com outras abordagens multicritério, para estabelecer regiões de destinação de gás natural produzido no Brasil.

Recentemente, o Comitê de promoção da concorrência no mercado de gás do Brasil, apresentou análise multicritério das propostas relacionadas com o Novo Mercado de Gás no país. Foi construída uma árvore de decisão mediante método MACBETH, considerando critérios de decisão relacionados a infraestruturas essenciais, transporte, distribuição, além de uma dimensão estratégica. Os resultados mostraram que havia benefícios na ação do Novo Mercado do Gás, na qual o referido projeto se sobressaia com relação às demais alternativas na fronteira de eficiência [54]. Desta maneira, verifica-se a os impactos positivos sobre a tomada de decisão com base em uma abordagem multicritério a nível de projeto nacional. Diante disso, ressalta-se que o gerenciamento de riscos com base em abordagem multicritério em GGN pode também assumir papel promissor na avaliação de riscos na malha dutoviária em expansão.

Análise multicritério aplicada a uma companhia de construção de gasodutos com base em abordagem multicritério no Egito é conduzida por meio do *Analytic Hierarchy Process* (AHP). A partir desta análise, a tomada de decisão proporcionou alocação de recursos e gerenciamento de projetos de construção [55].

Pela ótica da Teoria Prospectiva, [56] configurou o comportamento de aversão ao risco para eventos raros no contexto de expansão de gasoduto de gás natural nos EUA. Os autores buscaram verificar se os indivíduos entrevistados conseguem expressar suas preferências com relação a segurança e aos benefícios trazidos pela expansão da malha dutoviária após terem ciência dos seus riscos e benefícios respectivamente.

Por fim, os autores [30] apresentaram análise de sensibilidade global para o modelo [12], mostrando que a recomendação final ao decisor pode ser afetada por diferentes níveis de incerteza dos parâmetros do modelo.

Acrescenta-se que os trabalhos acima referidos constituem a totalidade dos resultados obtidos para esta pesquisa, quando realizada nas principais bases de dados indexados com o contexto de riscos em gasodutos de gás natural e modelos multicritério conjuntamente. Desta maneira, evidencia-se a relevância do modelo proposto no trabalho, em vista de lacunas existentes na literatura.

2.2.2 Algumas considerações sobre análise de risco em GGN

Diferentes métodos podem ser aplicados [16], [38] para o estabelecimento da função utilidade, mas todos eles envolvem consequências e suas probabilidades de ocorrência. Normalmente o decisor é questionado para escolher entre uma certa consequência e uma loteria ou estabelecer algum valor de consequência que ele/ela é indiferente a uma probabilidade. A principal preocupação deste processo é que a *EU* é admitida como sendo linear [39]. No entanto, como provado pelo paradoxo de Allais [23], quando o contexto de tomada de decisão envolve probabilidades altas e baixas e / ou consequências altas e baixas, a *EU* se desvia da linearidade, super ou sub estimando estes aspectos extremos, caracterizando a utilidade *Non-EU*.

A exemplo do que foi citado no parágrafo anterior, no contexto do gasoduto pode-se destacar que os eventos de falha são raros, e que a ocorrência de alguma anomalia pode ocasionar uma catástrofe, onde muitas vidas são comprometidas, causando consequências negativas, como pessoas feridas ou mesmo levadas a morte [12]. À medida que se aumenta o número de pessoas na zona de risco, apesar da probabilidade de fatalidade ser pequena, alguns decisores podem ponderar estas consequências de maneira a supervalorizá-las considerando apenas suas consequências e isolando a baixa probabilidade de ocorrência [57], conforme peculiaridades de decisão abordadas por Allais [23].

Outra característica intrínseca ao modelo matemático de riscos é a operação do duto em conformidade com os padrões operacionais na maior parte do tempo, sendo, portanto, o cenário de Normalidade, representado por altas probabilidades de ocorrência [12]. No caso oposto, cada um dos cenários de perigo pode ocorrer com baixas probabilidades [58], supervalorizando então a não ocorrência, mesmo considerando que, uma vez ocorrida a falha,

um cenário de ocorrência é constatado e graves efeitos podem decorrer disso. O mesmo pensamento pode ser expandido para os outros dois critérios nesta análise de risco.

Em ambos os exemplos, o valor esperado, que é em resumo, a soma ponderada das consequências por suas probabilidades, irão enviesar o valor médio obtido (valor esperado) para um dos extremos, conforme os valores que suas consequências e respectivas probabilidades podem assumir. Sendo assim, o valor esperado não representa de maneira eficiente os resultados e uma abordagem que trate de *Non-EU* é então indicada para reduzir estes desvios [38], [45], [59].

Finalmente, é razoável supor que essas consequências podem usar uma função de ponderação para generalizar as probabilidades, evitando que medidas de risco sejam concentradas em um dos extremos de análise [39].

2.2.3 O modelo de Utilidade Não-Esperada (*Non-EU*) no GGN

A proposição da abordagem de riscos em GGN com base em *Non-EU*, necessita da avaliação dos desvios da lineariedade para posterior definição da utilidade de um dado critério. Para isto, a estrutura de modelagem de preferências do decisor deve então ser conduzida de maneira diferente daquela por [12].

São necessários mais tempo e esforços para elicitare funções de ponderação, uma vez que um novo passo é adicionado ao processo de tomada de decisão para cada critério. Mediante um modelo complexo de análise de riscos, a adição de uma etapa de elicitação de preferências junto ao decisor pode ser vista como uma desvantagem do uso da *Non-EU*.

Por outro lado, a verificação de suposição de *Non-EU*, pode ser conduzida inicialmente para a verificação de sua possível contribuição. Primeiramente, perguntas são conduzidas junto ao decisor, e em seguida, um teste estatístico pode verificar a suposição de lineariedade com relação as probabilidades do prospecto em questão. É necessário acrescentar que, para casos específicos, como aqueles previsto por [23], a estrutura do problema de decisão, bem como as suas características particulares, podem então conduzir a certos desvios de lineariedade, como é o caso do presente estudo, conforme apresentado no item 2.2.2.

Para verificação destes desvios, análises preliminares podem ser conduzidas ou ainda realizadas comparações entre contextos de aplicação de um dado problema. A exemplo disto, verifica-se o ensaio de prospectos relacionados a dinheiro no contexto de ganhos e perdas, amplamente utilizadas na Economia, cujos desvios da lineariedade são evidentes para a

grande maioria das pessoas participantes de estudos, e que deu origem a Teoria Prospectiva [43].

Neste sentido, a relação dos desvios da linearidade para a decisão considerando o status-quo [60] encontra fundamentos do paradoxo de Allais para o contexto, bem como verifica a obtenção de utilidades mais sutis, e diferentes daqueles obtidos pela *EU*. Em acréscimo, [61] aplicaram questionários a gerentes federais dos EUA, sendo estes responsáveis por decisões relacionadas a riscos de incêndios florestais. Foram considerados o efeito potencial de incêndios, além de probabilidades relacionadas as consequências dos incêndios. Para definição de escala e posterior análise de utilidade, considerou-se por exemplo a composição da área, contendo a densidade de arvores, número de casas e presença de área ribeirinha. Os autores comprovaram desvios da linearidade das probabilidades e que os gerentes são mais avessos para baixas probabilidades quando mais casas estão presentes na área e quando a probabilidade de queimadura for maior.

Ressalta-se que a exemplo do trabalho acima mencionado, na perspectiva ambiental de risco [12] são consideradas áreas de devastação em torno do gasoduto que podem conter diferentes características. Na dimensão humana são consideradas a probabilidade de fatalidade, bem como a probabilidade de pessoas serem feridas sem virem a óbito. Além disso, para definição das seções do gasoduto, áreas urbanas são consideradas, onde evidentemente se observa uma maior quantia de casas e conseqüente aumento do número de pessoas.

Por estas razões, pressupõe-se que o estabelecimento de riscos das seções de gasodutos de gás natural pode ser mais assertivo e melhor ponderado considerando a abordagem da *Non-EU*.

Nos últimos anos, algumas abordagens têm tentado reduzir estes esforços, elicitando tanto a função utilidade quanto a função de ponderação simultaneamente [62]. Em [42] e [46] a função de ponderação foi elicitada com base em algumas medidas de utilidade sem hipótese prévia sobre a forma de utilidade ou função de ponderação, ou seja, sem estabelecer qual tipo de função estas poderiam assumir. Outras abordagens não-paramétricas para ponderar a elicitación da função ponderação em [63] e coeficientes de aversão à perda foram estudadas por [20], [64].

Como principal vantagem do uso de métodos paramétricos em detrimento dos não paramétricos destaca-se que os primeiros tem formas específicas de funções pré-estabelecidas para certos parâmetros matemáticos, porém precisam de um esforço prévio para obtenção da

função, uma vez que os métodos paramétricos têm especificações próprias, por meio de elicitação de parâmetros específicos de forma, conforme elucidado por [42]. Além disso, para alguns dos métodos, as formas de funções obtidas pelos métodos matemáticos pré-estabelecidos na literatura podem não compreender a natureza cognitiva do decisor, cuja função ponderação elicitada necessitaria de formas alternativas da função. Uma das principais famílias de funções paramétricas encontradas na literatura é obtida por [45], que utiliza-se de dois parâmetros α e β dada pela Equação (2-5), conhecida como função de Prelec que captura o grau em que o comportamento é sensível a mudanças em probabilidade; e o grau de otimismo ou pessimismo, respectivamente. Este autor demonstra em seu trabalho que um valor pequeno de α indica mais sub-proporcionalidade e mais regressivo, obtendo-se em decorrência disso, uma função s-shape. Além disso, esta função é adequada para probabilidades muito pequenas ou muito grandes, de acordo com a propriedade de sub-proporcionalidade de [43] e portanto, de acordo com as características deste trabalho, que apresenta altas probabilidades para cenários de Normalidade e probabilidades muito pequenas para os cenários de ocorrência de risco.

$$W(p) = e^{-\beta(-\ln(p))^\alpha} \quad (2-5)$$

Adiciona-se, porém, que os métodos não paramétricos também possuem vantagens a serem consideradas, cuja principal delas baseia-se na não necessidade de suposição de formas anteriores [39]. Sendo assim, estes métodos iniciam geralmente a partir de uma sequência de perguntas feitas junto ao decisor, de forma estruturada e distinta conforme sua abordagem encontrada na literatura, mas realizada de maneira a obter pontos no espaço de consequências que relacionem uma dada consequência e sua probabilidade. Feito isto, uma função aproximada pode ser estabelecida reduzindo os erros quadrados mínimos por algum método estatístico.

Comparar essas diferentes abordagens não é o foco deste trabalho. No entanto, é crucial identificar avanços na forma como a tomada de decisão multicritério no gerenciamento de GGN é afetada usando uma função de ponderação.

Para isto, deseja-se utilizar um método que possa proporcionar benefícios gerais na estimação de riscos ao passo que seja o menos custoso possível do ponto de vista de agregação de esforços e de tempo necessário de elicitação de um decisor. Mais do que isso, o

método deve estar de acordo com os pressupostos do problema. Alguns estudos observados na literatura são resumidos a seguir.

Os autores [65] apresentam um novo método de obtenção da função ponderação sem requerer avaliação prévia da função utilidade correspondente. A análise é conduzida sob risco e sob incerteza para múltiplos atributos, considerando principalmente que reduz uma etapa de avaliação demorada no processo de obtenção das utilidades. Os autores utilizaram comparação com método paramétrico observado em [45] e mostraram que os resultados obtidos para a função de ponderação elicitada possui valores mais pronunciados (mais côncava e mais convexa) para ambiguidade do que para risco. Uma extensa verificação desta característica é conduzida em [38] e parece ser este um padrão comum entre o e métodos elicitados. A incerteza sobre a probabilidade que um dado evento pode ocorrer pode causar principalmente maior aversão ao risco. No entanto, não pode ser tomada como uma verdade que cabe a todos os métodos, mas apenas um direcionamento que parece natural nos diferentes estudos conhecidos sobre o tema. [66] mostrou em experimentos que os decisores preferem risco a ambiguidades. Este seria um indício da maior concavidade(convexidade) da curva.

Comparação de [57] realizada entre os métodos de obtenção da função ponderação obtidos por [67] e aquele apresentado por [38] mostra que ambos possuem avaliações diferentes de ponderação das probabilidades médias. Tendo isso em vista, é preciso fazer uma extensa avaliação matemática dos achados dos autores e seus métodos antes de conduzir a própria abordagem em um contexto aplicado, uma vez que atitudes de risco podem interferir na decisão [59].

O estudo mais recente encontrado nesta pesquisa na literatura para obtenção da função ponderação de probabilidade trata de um Método não paramétrico, com forma predominantemente s-shape, proposto por [68]. Os autores comparam seu método como sendo concorrentes daqueles propostos por [42] e [22], sendo o primeiro a abordagem mais avançada não paramétrica e o segundo a mais usada dentre as disponíveis.

Por fim, a melhoria na análise multicritério no contexto de GGN é apresentada, sobre aspecto principal dos riscos estimados para cada seção do gasoduto, cuja ponderação será realizada pela ordenação de suas consequências, reduzindo efeitos de desvios da utilidade.

2.3 SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTE TRABALHO

Pesquisas recentes da Literatura evidenciam lacuna de estudo sobre o entendimento da estimação de riscos em gasodutos com base na *Non-EU*, sobretudo sobre a ótica da abordagem multiatributo, fundamentos deste trabalho. O modelo proposto por [12] considera avaliação de seção de riscos do gasoduto a partir da estrutura axiomática do MAUT. As características de formação dos prospectos do modelo de decisão possuem altas probabilidades, muito próximo de um para um Cenário de normalidade de operação do gasoduto e, em contrapartida, probabilidades muito pequenas, próximas de zero para os cenários acidentais. Problemas de decisão sob risco ou incerteza com eventos raros tem sido apontados na literatura como situações que violam o paradoxo de [23]. [69] afirma que o *RDU* é compatível com os comportamentos previstos por Allais, bem como com outras que não podem ser explicadas no modelo da Utilidade Esperada. Na análise de eventos raros no contexto de expansão de gasoduto de gás natural nos EUA, [56] baseia-se na possibilidade de que os indivíduos dão mais ênfase ao evento e seu impacto potencial do que na probabilidade desse acontecimento ocorrer, como o presente estudo que analisa eventos raros.

Sob nova perspectiva de análise, o presente estudo tem a contribuir com a estimação de riscos de gasodutos, sobretudo, com a incorporação da *Non-EU* para a recomendação ao decisor quanto a priorização de trechos do gasoduto, do maior ao menor risco. [69] adiciona que o modelo *RDU* leva em consideração a relação entre probabilidades e consequências e que para a mesma probabilidade, a percepção do risco depende do problema de decisão. Sendo assim, para cada atributo sob a perspectiva ambiental, humana e financeira de análise deste trabalho, uma função de ponderação das probabilidades diferente é obtida, configurando que a percepção das probabilidades não é linear, violando a *EU*. Para tanto, a contribuição das consequências dos cenários provenientes de modos de falha de um gasoduto será agregada considerando a ordenação das consequências da maior para a menor, em cada seção e em cada critério. Sob a perspectiva do *RDU*, o risco é então estimado considerando a probabilidade superior de ter uma consequência melhor para dado nível de análise do prospecto. Com isso, reduz a disparidade de contribuição de consequências de maneira que os eventos raros possam ter contribuições reais para a estimação dos riscos.

Para evidenciar as contribuições do trabalho, são feitas comparações entre os resultados de estimação de riscos e posterior análise de sensibilidade para comparar os resultados frente a níveis de incerteza. Aplicação de métodos estatísticos estimam o grau de

confiança dos resultados. As análises obtidas pelo *RDU* são promissoras, tornando a hierarquização das seções do gasoduto mais robusta do que àquela produzida pelo *MAUT*.

3 MODELO DE RISCOS EM GGN COM BASE NA UTILIDADE ESPERADA

O modelo de riscos descrito neste capítulo corresponde àquele inicialmente apresentado por [12]. Serão apresentadas as principais características de análise de riscos deste modelo, além da contribuição de trabalhos seguintes para a avaliação de riscos do GGN, baseado na Análise de Sensibilidade dos parâmetros que compõe o modelo e de visualização gráfica de seções de risco.

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO DE RISCOS EM GGN BASEADO NA EU

Para o modelo de Riscos em GGN baseado na *EU* [12], a extensão total do gasoduto é dividida em partes menores sendo, em seguida, estimado o risco associado a cada uma delas. O risco total estimado pode ser entendido como a soma das consequências com base na análise de três critérios: financeiro, ambiental e humano.

Levando em consideração uma seção particular do gasoduto, algumas suposições são feitas, tais como, o número de pessoas presentes ao redor do gasoduto, a área de vegetação e suas principais características (área de preservação, fauna e flora, área da fazenda e assim por diante).

Para a dimensão financeira pode ser citado o preço de venda de gás, multas e penalidades de um desastre no gasoduto ou interrupção de gás, além de outros aspectos. Um conjunto mais extenso de parâmetros é necessário para estimar as consequências, onde mais detalhes podem ser vistos em [12].

A consequência em si é avaliada com base na ocorrência de um modo de falha no duto, o que significa que um furo ou uma ruptura está presente no duto e é responsável por causar alguma anomalia em seu funcionamento. [69] afirma que o decisor tem crenças subjetivas distintas para cada contexto de decisão. Ressalta que decisões no contexto de investimento, seguro, portfólio, saúde, transporte etc., são feitas sob incertezas. Acrescenta ainda que o conjunto de estados da natureza deve ser definido com precisão suficiente para o problema de decisão abordado.

Os estados da natureza são obtidos de acordo com o modo de falha. Alguns cenários de ocorrência são estimados, tais como, bola de fogo, detonação / deflagração de gás, jato de fogo, correspondendo a uma árvore de eventos conforme observado em [58], [70].

A próxima etapa consiste em avaliar as consequências dos cenários de ocorrência para a zona crítica, que é uma área limitada ao redor do gasoduto. Em seguida, é aplicada a abordagem de riscos utilizando a agregação multicritério de análise e posterior tomada de decisão.

Inicialmente, a análise unidimensional deve ser conduzida avaliando as consequências de risco para cada critério e seção no modelo. Um modelo de múltiplos atributos requer presenças do decisor para avaliar a sua probabilidade sobre as consequências. Suas preferências são consideradas para cada critério (humano, ambiental e financeiro) como um único atributo no tempo. Sua probabilidade é medida por uma função de *EU*, cujo objetivo é obter uma função que traduza seu pensamento sobre as consequências em um conjunto fechado.

O limite inferior e superior da função de utilidade representa as consequências mais e menos desejáveis, respectivamente. O limite superior corresponde à pior consequência, pois este representa a perda máxima no conjunto fechado citado anteriormente e, portanto, com utilidade igual a zero. Por outro lado, o limite inferior corresponde à consequência zero, onde nenhum modo de falha ocorre e, portanto, tem-se um cenário de normalidade como resultado. Isso significa dizer que o gasoduto opera normalmente, sendo esta a situação ideal de operação, onde não há perdas, e por isso a maior desejabilidade de utilidade.

Assim sendo, a teoria da Utilidade Multi-Atributo incorpora as três perspectivas de risco a partir da Equação (3-1) por meio da utilização das constantes de escala para os três critérios, representada por K_c . O valor de risco é então obtido pela soma das consequências nos três critérios c , ponderados por suas constantes de escala e adicionada probabilidade do Cenário de Normalidade.

$$r_{a_i} = \sum_{c=h,e,m} \left[\left[- \left(\sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 f(c)\theta_{jkl}, a_i \cdot u(c) \right) \cdot \pi_i \theta_{jk} \right] \cdot K_c \right] - \pi_i \theta_N \quad (3-1)$$

Onde i representa a seção a_i , k representa o modo de falha, furo ou ruptura ($k=1$ e $k=2$, respectivamente), j é o cenário ocorrido, $f(c)\theta_{jk}, a_i$ representa a função consequência para cada critério c , e $u(c)$, representa a utilidade de cada consequência nos critérios correspondentes.

Na etapa final da análise multicritério, uma ordem decrescente é obtida, correspondendo a uma recomendação ao decisor quanto as seções de maior risco estimado

pelo modelo matemático, a fim de nortear o decisor a estabelecer seus esforços na mitigação de riscos.

3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O MODELO BASEADO NA EU

A seção 3.1 apresentou o modelo de riscos para GGN com base na EU. A priorização das seções do gasoduto é obtida para recomendação ao decisor. Além disso, é possível obter diferenças em utilidade entre seções adjacentes, estabelecendo uma ordem de grandeza que quantifique a contribuição dos riscos entre elas. Pode-se acrescentar ainda que o decisor muitas vezes necessita de mais informações para basear a sua decisão, sendo necessário, portanto, conduzir uma análise de sensibilidade.

Diante do exposto, [30] conduziram análise de Sensibilidade Global para verificação de níveis de incertezas dos parâmetros e suas implicações na priorização das seções. A este respeito, algumas considerações são necessárias, conforme exibido a seguir.

Primeiramente, o modelo de riscos proposto pelos autores [12] é constituído de muitos parâmetros, sendo estes relacionados a características físicas do gasoduto, mas também de variáveis que representam a sua operação, distribuição do gás, bem como informações das regiões em que o gasoduto está localizado. Além destes, parâmetros relacionados a eventos de falha do gasoduto também estão presentes na abordagem de riscos. Faz-se necessário empenhar esforços na determinação destes parâmetros, que representam características distintas em suas três perspectivas de risco para modelagem matemática e posterior estimação dos riscos para cada seção.

Ademais, tais parâmetros são estimados com base em observação, ou ainda a partir de especialistas. Sendo, assim pode-se admitir uma faixa de valores possíveis que estes parâmetros podem assumir, representados por intervalos a partir do valor médio ou do próprio valor assumido para o parâmetro.

Outro aspecto de relevância fundamenta-se na dependência da obtenção dos parâmetros do modelo com base na definição do conjunto de alternativas do problema, representadas pelas seções do gasoduto. Com isto, verifica-se que uma seção maior ou menor do que um dado valor assumido de extensão, pode incorporar mais ou menos vegetação, pessoas, densidades demográficas etc., como consequência da sua delimitação.

Além disso, o estabelecimento das preferências do decisor corresponde a um fator de avaliação cognitiva de suas preferências, guiadas sobre um método de obtenção que o traduz

em um valor quantificável. Neste sentido, a estrutura axiomática do MAUT reduz inconsistências do decisor, principalmente na etapa de verificação de consequências, por meio de diferentes perguntas para faixas distintas no espaço de ações a fim de verificar se a ordem de preferências é mantida, examinando a consistência do decisor. No entanto, grande esforço é necessário para definir os valores de indiferenças para obtenção dos pontos de utilidade, a partir da verificação dos pontos de indiferença entre uma consequência certa e uma dada loteria. Este ponto pode ser obtido em uma região de indiferença, cuja obtenção mais a direita ou à esquerda no eixo das consequências, exprime valores distintos de utilidade, tornando a concavidade da curva mais ou menos acentuada.

Em decorrência das características acima expostas sobre os parâmetros do modelo de riscos baseado na EU, [30] verificaram que a recomendação ao decisor quanto a priorização das seções de risco do gasoduto dependerá do nível de incertezas que estes parâmetros podem assumir. Sendo assim, os autores dividiram os parâmetros em categorias afins, sendo elas: 1) os parâmetros que variam por seção, 2) os que variam por cenário de ocorrência, e por fim 3) aqueles relacionados às preferências do decisor.

Breve explicação será realizada para estes tipos de parâmetros. Os do tipo 1, correspondem àqueles que permanecem os mesmos independentemente de ocorrência dos cenários de perigo, como por exemplo, a extensão do gasoduto, o número de pessoas em torno do gasoduto, vegetação, preço de venda do gás, pressão de operação, entre outros. Aqueles do tipo 2, por sua vez, dependem diretamente do cenário de perigo, como as probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais,

Diante da divisão dos parâmetros em categorias, estas foram transformadas em *Patterns* de simulação, submetidos a variações de 5%, 10%, 15% e 20% segundo uma distribuição de probabilidade triangular e uniforme. Por apresentar resultados mais variados de ordenações das seções para a distribuição triangular em comparação à uniforme, os resultados discutidos na sequência correspondem àqueles obtidos pela distribuição triangular, como uma forma mais conservadora de análise dos resultados, onde os piores casos são analisados.

Os principais *Patterns* simulados são: A) dos parâmetros do tipo 1, B) parâmetros do tipo 2 e C), parâmetros 1, 2 e 3 conjuntamente. Os resultados mostraram que B produziu resultados com maior desordenamento das seções do que A para todos os níveis de incerteza simulados. Além disso, todos os Parâmetros do modelo analisados conjuntamente em C

mostraram que produziu resultados menos correlacionados com o ranking obtido originalmente na recomendação do modelo do que em B.

Em virtude destes resultados, verifica-se especial atenção a B, pois constituem o grupo de parâmetros mais sensíveis do modelo de risco. Acrescenta-se que todos os parâmetros deste *pattern* são estimados principalmente com ajuda de especialistas, e possuem incertezas associadas à sua natureza. No entanto, a sua combinação com os demais parâmetros constituem análise necessária pois reduz o nível de significância da recomendação e, por conseguinte, mais dificuldade na priorização das seções.

Além do estabelecimento de uma análise estatística para avaliar os resultados obtidos, [30] apresentaram uma classificação quanto a robustez dos resultados. Sendo α o erro do tipo I e p a probabilidade da estatística de teste τ de Kendall, $p \leq \alpha$ representa a Rejeição de H_0 , na qual não há correlação entre o ranking original e o ranking simulado. Para $\alpha < 0,05$, o resultado é avaliado como muito robusto (*MR*), robusto (*R*) para $\alpha < 0,05$, sensível (*S*) para $\alpha < 0,10$ e muito sensível (*MS*) para valores superiores. Esta classificação representa, em outras palavras, a robustez dos resultados na direção da redução de α .

Visualização gráfica é um meio eficaz de análise dos resultados de risco [25], sendo portanto necessária como etapa final de análise dos resultados a fim de estabelecer a priorização final das seções com base na sua distribuição ao longo do ranking. Para condução dos resultados de risco e posterior análise de sensibilidade e análise gráfica, foi desenvolvido o Sistema de Apoio a Decisão (SAD), de código GU-MXOMMD-F1, posteriormente registrado no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI).

Considerando que o presente trabalho tem como objetivo principal propor uma nova abordagem de riscos multidimensionais para GGN, deve-se estabelecer meios para conduzir a análise em sua total abrangência. Em outras palavras, deve-se verificar a contribuição da nova abordagem tanto para um gasoduto cuja priorização das seções são mais sensíveis a níveis de incerteza, quanto para aqueles que são mais robustas.

Os resultados da Análise de Sensibilidade conduzida por [30] apontam os Patterns de simulação que resultam em menores valores de τ , identificando, portanto, os parâmetros de maior sensibilidade do modelo.

Por fim, ressalta-se a importância desta análise para a geração de informação a respeito do modelo matemático de [12], não apenas para a recomendação ao decisor, mas também para o desenvolvimento de abordagens futuras. Desta forma, as informações sobre a recomendação ao decisor baseado no modelo de [12], proporcionam meios de comparação

com a abordagem proposta de avaliação de riscos multiobjetivo para GGN com base no RDU apresentada no capítulo 4. Além disso, estes resultados também deram origem a simulação de dois gasodutos hipotéticos apresentados para análise no Capítulo 5.

4 MODELO PROPOSTO DE RISCOS EM GGN COM BASE NO RANK-DEPENDENT UTILITY

O modelo proposto neste trabalho consiste na agregação dos pontos fortes de cada método apresentado no capítulo 2, em especial 2.1.2 e 2.1.3, a fim de proporcionar um modelo de decisão que seja capaz de tratar de maneira mais eficiente os desvios da utilidade quando baseado somente no MAUT. São analisados os desvios da linearidade das probabilidades [43], [45], tendo como consequência a obtenção da função ponderação de probabilidades [42] com base nos valores de consequências obtidas previamente na elicitación das utilidades [22]. O modelo proposto visa agregar esta nova perspectiva de análise de riscos para GGN de maneira a verificar as possíveis vantagens do uso da abordagem *Non-EU* com relação à *EU*.

A base matemática para estimação das perdas nos diferentes cenários acidentais é o mesmo daquele utilizado no modelo baseado no MAUT [12], garantindo que os resultados obtidos pelas abordagens da *EU* e *Non-EU* possam ser comparados posteriormente.

São assumidas independência entre os atributos de decisão, bem como independência entre as diferentes seções do gasoduto e dos cenários de perigo analisados [12]. Ademais, os pressupostos da teoria Prospectiva foram previamente validados na proposição do modelo, como por exemplo a verificação da manutenibilidade dos resultados para o caso em que o prospecto obtenha consequências colapsadas e não colapsadas. Isso significa que diferentes níveis de um prospecto pode ser relacionado considerando diferentes probabilidades. Desta forma, ao reduzir a quantidade de níveis do prospecto (forma colapsada), mostrando apenas uma consequência, a soma das probabilidades dos respectivos níveis agregados do prospecto é realizada sem qualquer alteração do Valor RDU calculado. De igual modo, a simplificação do RDU para a *EU* quando a função ponderação de probabilidade assume linearidade foi verificada para cada critério.

A seguir serão apresentadas as principais características do problema, bem como a descrição do modelo proposto.

4.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo de decisão para estimação de riscos multidimensionais mediante *Non-EU* aplicados a GGN baseiam-se nas 12 etapas de construção de um modelo de apoio a decisão proposto por [25], [41]. Cada uma das etapas é detalhada a seguir e constam de fatores

primordiais para o estabelecimento de um método de apoio a decisão capaz de representar a realidade do problema a que se destina.

4.1.1 Identificação dos decisores, individual ou grupo

Os decisores são aqueles responsáveis diretamente pela decisão associada ao gerenciamento/manutenção do gasoduto em toda a sua extensão. Para o contexto de análise de riscos em gasodutos, os decisores exercem geralmente cargos nas companhias que atuam que possibilitam o conhecimento técnico operacional do duto, além de conhecimentos estratégicos de decisão, que envolvem desde a sua idealização, fase de operação e posterior acompanhamento de atividades de mitigação de riscos, como por exemplo atividades de manutenção.

Todos aqueles que auxiliam na coleta de dados e ou de informações necessárias para input do modelo de decisão proposto ou para o acompanhamento diário de suas atividades rotineiras, podem ser considerados facilitadores ou especialistas ao longo do processo, dependendo diretamente do grau de interação com o modelo e do nível de informação requerido.

É importante diferenciar os primeiros dos últimos pois, somente aquele que tem poder de fazer mudanças ou de destinar esforços, sejam eles humanos, de capital, de alocação de trabalho, entre outros, podem de fato ser considerados como decisor do modelo multicritério.

À luz da expertise de suas funções e da autonomia da decisão, estes podem tomar decisões conjuntas, para o caso de múltiplos decisores, ou ainda um único decisor. Salienta-se que, para o primeiro caso, técnicas de decisão em grupo que considerem consenso, votação ou ainda decisão conjunta em todo o processo são as mais indicadas para este modelo, devido a sua configuração inicial. O software desenvolvido para dar suporte matemático a este modelo proposto permite apenas uma única avaliação por vez. Para o caso de múltiplos, decisores, o modelo matemático pode ser conduzido separadamente para cada decisor e a recomendação final da hierarquização dos resultados pode ser feita partir de métodos de agregação de rankings [71]. Uma alternativa de análise é estimar os valores de ponderação e de utilidade e tomar como entrada matemática no modelo os valores médios obtidos, desde que estes não sejam muito diferentes. Para tal é necessário definir um nível e um intervalo de confiança destes parâmetros para posterior análise dos seus impactos a partir da análise de sensibilidade.

É sempre importante ter em mente que, se as respostas obtidas por um dado decisor diferem significativamente entre si para um mesmo contexto, devem ser conduzidas etapas de

verificação de consistência para apurar qualquer aresta referente ao entendimento. Esta torna-se uma etapa fundamental principalmente para modelos de análise multidimensionais que são afetados grandemente pela elicitación de preferências de um ou mais decisores.

Por fim, diferentes abordagens podem ser inseridas como trabalhos futuros, melhorando o modelo atual.

4.1.2 Identificação dos objetivos

Assim como no modelo proposto por [12], o objetivo macro do modelo proposto é proporcionar ao decisor uma ordem prioritária em termos de valores de risco de seções do gasoduto a fim de que os esforços de manutenção sejam melhor empregados, considerando múltiplos objetivos, caracterizados por critérios. Baseado no exposto, é verificada a contribuição de análise de riscos baseada no *RDU* e seus desdobramentos quanto ao atingimento dos objetivos.

Por se tratarem de objetivos com características distintas de análise, tanto no que diz respeito ao espaço de consequências, quanto na escala de seus valores, e tendo em vista que para todos eles deseja-se reduzir as perdas, estes são então comutados em critérios de avaliação do modelo multiatributo de riscos em GGN, conforme apresentado a seguir.

4.1.3 Estabelecimento dos critérios relevantes

Os critérios relevantes consistem naqueles já consagrados por [12], e são eles: humano, ambiental e financeiro. Tendo em vista a ampla abrangência destes critérios para a elucidação das consequências face a ocorrência de modos de falha ao longo do gasoduto, estes critérios são considerados por ora suficientes para a estimação dos riscos.

O espaço de consequências de cada um dos critérios de decisão compreendem ao conjunto compreendido entre a mínima e máxima perda estimada para as seções. Sendo assim, para cada uma das seções do gasoduto estima-se as consequências ambiental, humana e financeira.

Na dimensão de riscos ambiental, estima-se a partir da área ao redor do trecho do gasoduto o percentual de área ambiental contida naquela área.

A avaliação de perdas humanas, considera-se um número de pessoas possíveis de sofrer queimaduras de 1º e 2º graus devido a exposição ao fluxo de calor em decorrência de um cenário acidental, bem como o de fatalidades.

Para os atributos humano e ambiental, são estimadas as perdas e obtidas o maior valor de maneira que este compreenda a máxima perda na perspectiva de risco, delimitando o espaço de consequências entre 0 e o máximo estimado.

A estimativa financeira é inserida pelo decisor como um valor máximo de perdas aceitáveis a ser comparado para a delimitação do espaço de consequências. Entre a perda nula e a perda máxima estipulada, é estabelecida o espaço de consequências para posterior elicitación de preferencias por parte do decisor. No entanto, considera-se possível que as perdas calculadas para cada algumas seções ultrapassem o espaço de consequências estimado anteriormente, tendo, portanto, uma utilidade zero para o decisor, pois as perdas superiores estariam além do desejado pelo decisor.

Além disso, buscando uma linha base de comparação futura como o modelo proposto, a utilização dos mesmos critérios de análise permite uma comparação mais fidedigna. A partir da análise de resultados, pode-se, porém, incluir subcritérios ou ainda agregação de outros critérios que julgarem importantes para a avaliação. Contudo, este não é o foco de discussão deste trabalho.

4.1.4 Estabelecimento da estrutura do espaço de ações, da problemática e desenvolvimento do processo de geração de alternativas

A longa extensão de um gasoduto pode dificultar o estabelecimento de áreas específicas de risco e posterior tomada de decisão sobre ele. Para isto, sua extensão total é dividida em segmentos menores, cujas delimitações são compostas por presença de características comuns, tais como a área em torno da seção, que pode compreender extensões urbanas, industriais, reservas ambientais, florestas, campos de agricultura, estradas, altas e baixas densidades populacionais ou até mesmo de fauna, etc.

A definição das perdas máximas mostradas no item anterior compreendem os valores máximos estimados para toda a extensão do gasoduto. No entanto, cada uma delas contém a sua característica particular e homogênea, diferindo, portanto, umas das outras. A estimação das perdas para cada uma delas é obtida com base em diversos parâmetros de funcionamento do gasoduto, tais como características de operação, características físicas, entre outros.

Uma vez segmentado o duto, suas principais características são então avaliadas e estas irão compor um conjunto de parâmetros necessários para a estimação dos riscos para cada uma delas. As alternativas são então estabelecidas e delimitadas por seções que compreendem um conjunto discreto a ser analisado separadamente. Juntas, compreendem

toda a extensão do gasoduto. Suas consequências são estabelecidas de maneira independente umas das outras para os três critérios de avaliação de riscos. Ao final, com base no risco calculado para estas, será obtida a hierarquização de seções, tratando-se, portanto, de uma problemática de ordenação.

4.1.5 Avaliação e identificação de fatores relevantes que não estão sob controle do decisor

Devido a baixa frequência de acidentes, além de uma malha dutoviária muito inferior quando comparada a dos Estados Unidos e da Europa, no Brasil ainda não está disponível uma base de dados que compreenda probabilidades de ocorrência de modos de falha e suas consequências. Desta maneira, pode-se utilizar aproximações de bases de dados internacionais¹ para estimação das probabilidades, no entanto, deve-se considerar que diversas características tais como o clima, e as condições de operação podem influenciar nestes valores.

Em vista disso, é necessário estimar junto a especialistas a determinação das probabilidades e de outros parâmetros do modelo. Quando obtidos a partir de experiências próprias, especialistas podem contribuir significativamente para obtenção dos dados. Além disso, a fim de entender e minimizar níveis de incerteza referentes aos parâmetros de análise que compõem o modelo matemático, uma análise de sensibilidade é conduzida a fim de minimizar estes impactos na avaliação de riscos.

4.1.6 Modelagem de preferências do decisor

Como dito anteriormente, o problema trata de consequências probabilísticas, onde o MAUT foi empregado anteriormente a fim de agregar as preferências do decisor frente a estimação de riscos nos critérios analisados. No entanto, os desvios da *EU*, característicos deste modelo, são a força motriz para a implementação do RDU e estudo das consequências para a tomada de decisão final. O decisor é convidado a pensar em cada uma das dimensões de risco separadamente, tomando como base julgamentos sobre a desejabilidade frente a

¹ European Gas Incident Data Group (EGIG) [9]

French Ministry For Sustainable Development (FMSD) [10]

Major Hazard Incident Data Service (MHIDAS) [78]

consequências sofridas nos cenários de ocorrência e de suas probabilidades. Para tal, detalhes serão descritos nos itens 4.1.7 e 4.1.8.

4.1.7 Avaliação intra-critério

A avaliação intra-critério é realizada a partir do estabelecimento da delimitação do espaço de consequências, sendo estimada com base em um raio de abrangência de danos.

Deste modo, verifica-se para cada seção do gasoduto, a estimação do número de pessoas feridas em um acidente, a área máxima em metros quadrados atingida em torno dele para a dimensão ambiental e o valor máximo financeiro de danos envolvidos em multas de interrupção de contratos, indenizações à vítimas, multas ambientais, entre outros, para a dimensão de riscos financeira.

O número máximo de perdas obtido em cada um dos critérios é então considerado como a máxima perda, sendo a mínima perda corresponde a zero para as três perspectivas de risco. Isso significa dizer que, em uma situação ideal, nenhum modo de falha ocorre e que o gasoduto opera normalmente. Este cenário é denominado de Normalidade.

No MAUT utiliza-se a teoria da utilidade unidimensional para estimar a desejabilidade das consequências a partir de loterias. Consideram-se loterias $\langle m, 0,5; p \rangle$ onde m e p correspondem a melhor e pior consequência respectivamente em um dado critério. O Analista conduz o decisor em uma série de perguntas onde este deve ser indiferente a um valor certo e a loteria. Ou seja, o decisor fica indiferente em obter um dado resultado com probabilidade igual a 1 e a loteria apresentada. Inicia-se o processo de perguntas considerando os limites do espaço de consequências para cada critério e ao passo que os equivalentes certos são encontrados, novos limites são perguntados a fim de se obter um conjunto de pontos a partir dos quais se possa traçar uma curva que represente a desejabilidade do decisor com relação àquele critério, ou seja, obtém-se a $u(c)$, conforme [16].

A fim de reduzir esforços do decisor no processo de eliciação de preferências, bem como utilizar dos benefícios apontados na literatura a respeito dos métodos disponíveis para obtenção da função ponderação, identificou-se o Método Trade-Off (TO) para obtenção das utilidades das consequências como uma abordagem promissora a ser seguida, pois esta além de estar de acordo com as premissas do modelo de riscos de gasodutos, tem relação direta com métodos de obtenção da função de ponderação a partir dos seus resultados. Sendo assim, são explicados na sequência, a obtenção da função utilidade e função ponderação.

4.1.7.1 Obtenção da função utilidade

A elicitação da função utilidade do modelo de riscos em GGN de [12] é conduzida com base em [16].

O Método TO pode ser aplicado para o caso que as probabilidades são conhecidas, a partir de loterias ou ainda para o caso em que as probabilidades não são conhecidas, utilizando-se ao invés de incertezas de probabilidades numéricas por incertezas de eventos, baseados no cálculo do modelo esperado subjetivo. Algumas observações quanto a concavidade deste método é realizada pelos autores [22], [38], [42]. A utilidade derivada do equivalente certo é mais côncava, ou seja, uma maior grau de aversão do que as derivadas do TO. Além disso as utilidades obtidas pela Probabilidade Equivalente sugerem aversão ao risco mais acentuada, mais côncava sob utilidade esperadas.

Como nas questões de equivalente certo, os decisores são conduzidos a responder em termos de consequências e no método de elicitação das probabilidades equivalentes em termos de probabilidades, levando a um efeito de compatibilidade de escala. Ressalta-se ainda que os decisores prestam mais atenção às probabilidades no método de probabilidade equivalente e tendem a escolher menos a opção de risco, sendo, portanto, mais averso ao risco.

É mostrado em [42] que o método TO quando aplicado a *RDU* elimina completamente as distorções da medida de utilidade devido a não linearidade da probabilidade.

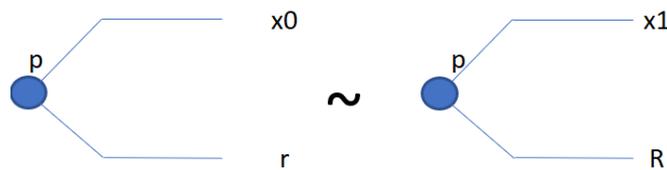
Quanto a Teoria Prospectiva, x_1 é o ponto médio de utilidade entre x_0 e x_2 . Uma vez que as medidas de utilidade referentes a x_1 e x_2 são utilizados posteriormente para elicitação da função ponderação, os autores [42] conduziram em seus experimentos a elicitação destes pontos duas vezes e em seguida utilizaram o valor médio de cada um para as demais comparações. Enquanto [22] utiliza o valor de x_6 para elicitação da função ponderação, [42] utiliza os valores de x_1 e x_2 , reduzindo a propagação de erro, uma vez que a obtenção de x_2 . Depende de x_1 , x_3 depende de x_2 e assim sucessivamente até x_6 .

Neste trabalho, faz-se necessário elicitar tanto a função utilidade quanto a função ponderação de probabilidades. Sendo assim, serão obtidos pontos de utilidade de x_1 a x_6 , conforme método em [22], e posteriormente conduzida regressão estatística a fim de obter uma curva de utilidade que represente as preferencias do decisor para um dado critério, obtidos pelo método TO. No entanto, apenas os valores de x_1 e x_2 serão utilizados para obtenção das ponderações das probabilidades, conforme [42], ao invés de x_6 . Como mostrado

por estes autores, o TO baseado nos valores de x_1 e x_2 evita a propagação de erros em cadeia, pois são os primeiros valores obtidos na elicitación da utilidade. Acrescenta-se que o método de bissecção utilizado por estes autores é muito parecido com aquele previsto por [22], diferindo apenas no número de perguntas necessárias a obtenção da função utilidade. Primeiramente é definido um valor Δ que representa a máxima diferença admitida para obtenção de uma indiferença. Ambos os autores utilizaram avaliações piloto para estimação destes parâmetros. Sendo assim, cada intervalo de elicitación de preferencias é realizado com base no valor de $x_0 + \Delta$.

Adicionalmente, o TO pode ser usado em *RDU* se os valores de referência R e r da Figura 2, estão fora do domínio das consequências, onde a utilidade será elicitada. Por esta razão, r e R são uniformemente maiores ou menores do que as consequências de maneira que $r < R < x_0$ ou $x_n < r < R$, sendo x_0 a menor consequência (zero para os três critérios) e x_n a máxima consequência, definido pela máxima perda entre todas as seções do gasoduto. O decisor é levado a responder questões sobre suas preferências entre dois prospectos. A Figura 4 é equivalente àquela da Figura 2, com substituição dos valores de X e x , por x_0 e x_1 , respectivamente representando a primeira iteração. Os valores x_0, r e R são fixos, cujo valor de x_1 busca ser encontrado dentro de um intervalo previamente definido por $[l_i^1, l_s^1] = [x_0, x_0 + \Delta]$. Se o decisor escolhe o prospecto da esquerda, a pergunta $j=2$ será realizada no intervalo $[l_i^2, l_s^2] = [\frac{l_i^1 + l_s^1}{2}, l_s^1]$ e no intervalo $[l_i^2, l_s^2] = [l_i^1, \frac{l_i^1 + l_s^1}{2}]$, caso contrário. São realizados 5 iterações, terminando o processo com x_1 igual ao ponto médio de $[l_i^6, l_s^6]$. Para obtenção de x_2 , são substituídos na Figura 4 os valores de x_0 por x_1 no prospecto da esquerda e x_1 por x_2 no processo da direita. O mesmo procedimento é realizado para os demais valores de x_j .

Figura 4 - Obtenção da Utilidade pelo método TO



Adaptado de VAN DE KUILEN E WAKKER (2011).

Uma vez obtidos os pontos da elicitaco pelo TO,   obtida uma curva de utilidade para cada critério, ajustada por uma funo utilidade exponencial ou logística conforme Equaco (4-1) e (4-2), respectivamente. Estas equaces foram estabelecidas de maneira a delimitarem o espaço de consequências.

$$u(x) = b * \exp(a * x) + c \quad (4-1)$$

$$u(x) = b * \exp(a / x) + c \quad (4-2)$$

Os métodos de elicitaco de utilidade que se baseiam em probabilidade equivalente e equivalente certo e métodos de loterias equivalente assumem *EU* e então estão suscetíveis a violaco de utilidade. Além disso, os autores adicionam que quando estes métodos são usados, os decisores requerem conhecimento preciso de probabilidade e que geralmente assumem que os decisores percebem as probabilidades corretamente. Sendo assim, esta   fonte de muitas violaces da *EU* e conseqentemente, estes métodos não podem ser usados para eventos não conhecidos ou com probabilidades ambíguas.

Os resultados do TO servirão para elicitaco da funo ponderaco e conseqentemente a funo de transformaco de probabilidade, explicada a seguir.

4.1.7.2 Obteno da funo ponderaco das probabilidades

Na avaliaco das consequências considerando RDU, as consequências são ponderadas por suas probabilidades de ocorrência e isso reduz efeitos de que estas sejam super ou sub julgadas. De maneira prática, busca-se evitar que aquelas seções que possuam consequências localizadas nas extremidades do espaço de consequências sejam isoladas no processo de julgamento de sua importância para a decisão. Por exemplo nos casos em que a consequência mais desejável seja zero com alta probabilidade de ocorrência (assumindo o valor de π_N) e para o caso da consequência menos desejável, a maior perda com menor probabilidade de ocorrência (quanto maior geralmente mais próxima de zero). O ideal é que o decisor possua meios de entendimento sobre as consequências meio, considerando a partir de um certo nível de referência, a probabilidade de receber boas notícias, ou seja, poder de fato ter uma consequência melhor do que aquela antes esperada por ele em uma loteria.

Neste sentido, adicionalmente a etapa anterior com o estabelecimento das funes utilidades, uma funo ponderaco   então elicitada.

Este trabalho usa a nomenclatura W_c na (4-3) em vez de π_c (muito frequentemente usada na literatura) para denotar o peso da decisão, evitando mal-entendidos entre o peso da decisão e as probabilidades de cenários de perigo, respectivamente. A ponderação da probabilidade $\pi_i \theta_{jkl}$ para uma seção a_i no critério c , modo de falha k e cenário de ocorrência j , será dada pela soma das ponderações de cada uma das consequências ordenadas da melhor para a pior, cuja posição na hierarquia é representada por l na (4-4). Sob RDU, o peso da utilidade é a diferença entre dois rankings transformados. O primeiro rank transformado (primeira parte da indiferença) é a probabilidade de receber um resultado com a utilidade considerada ou qualquer resultado melhor (superior no ranking); o segundo rank transformado (segunda parte da indiferença) é a probabilidade de receber qualquer resultado melhor. Esse peso é chamado de peso de decisão. É a contribuição marginal da probabilidade do resultado para com a probabilidade total de obter melhores resultados.

$$W_c = w_l(\pi_i \theta_{jkl} + \pi_i \theta_{jkl+1} \dots + \pi_i \theta_{jk1}) - w_l(\pi_i \theta_{jkl-1} + \dots + \pi_i \theta_{jk1}) \quad (4-3)$$

$$W_{c_{ijk}} = w_l \cdot (\pi_i \theta_{jkl}) \quad (4-4)$$

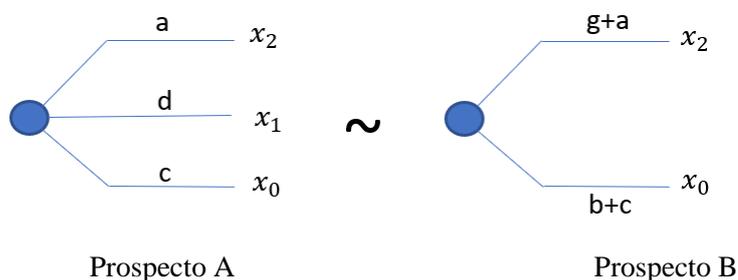
A função de ponderação de probabilidade é definida entre 0 e 1, e cresce estritamente. Em outras palavras, a ponderação da probabilidade de $W(0) = 0$ e $W(1) = 1$. Valores de probabilidade entre 0 e 1 são ponderadas a partir de uma curva que denota o desvio da linearidade das probabilidades, geralmente em forma de uma função s-shape. No entanto, funções côncavas ou convexas podem ser estabelecidas, uma vez que se trata de um processo de interpretação cognitivo de um decisor, cuja forma dependerá diretamente da sua desejabilidade quanto as questões abordadas. A letra l representa a posição do resultado ordenado e será igual ao maior número de cenários estimados a partir dos modos de falha acrescido de 1, que representa a existência necessária do cenário de normalidade N . Essa suposição da posição é baseada no posto do RDU [21], [38].

Dos métodos disponíveis para obtenção das funções de ponderação discutidos na seção 2.2.3, verifica-se que os métodos não paramétricos podem ser promissores e contribuir satisfatoriamente para uma elicitación de funções ponderação de maneira simples, além de utilizar-se das medidas obtidas na função utilidade dos critérios em 4.1.7.1. O método Midweight [42] é um método não paramétrico e pode ser aplicado a situações em que avaliem risco e incertezas. Além disso, este método reduz esforços na elicitación da função ponderação pois não exige a obtenção de uma medida extensa de probabilidades, como àquela prevista em

[22], por exemplo. Ressalta-se porém que a medida de utilidade fornecida por [22], [42] possuem a mesma base teórica, cujas diferenças na elicitação de preferências é encontrada praticamente na quantidade de perguntas feitas. No entanto, uma maior vantagem é encontrada do segundo com relação ao primeiro no estabelecimento da função ponderação visto que necessita apenas dos valores de x_0, x_1, x_2 estabelecidos na etapa de utilidade, que além de reduzir o número de perguntas na primeira etapa, reduz a propagação de possíveis erros na segunda parte da elicitação, uma vez que as perguntas são feitas em cadeia e os valores de x_j dependem daqueles obtidos em x_{j-1} , no qual j denota o índice de todos os possíveis pontos elicitados no processo. No método proposto por [22], é necessário obter o ponto x_6 de utilidade e todos os pontos da função ponderação são obtidos a partir desta medida.

O método Midweight será exposto resumidamente a seguir. Obtendo valores de $r < R < x_0 < x_1 < x_2$ é obedecida a ordem natural como no método TO de [38], [42] ou $x_0 > x_1 > x_2 > R > r$, uma vez r e R devem estar fora do domínio das consequências. Para um valor de probabilidade a e uma probabilidade $d+a$, é possível encontrar um valor médio de probabilidade $g+a$, com $0 < g < d$, representados na Figura 5. No Prospecto A, d representa a massa de probabilidade de x_1 que será dividida entre duas consequências no prospecto B. Portanto, g pode ser entendido como a porção de d que é adicionado a a e b a porção restante de d que é adicionado a c . A prova matemática pode ser consultada na referência correspondente [42].

Figura 5 - Densidade de massa de probabilidade d sendo distribuída entre as consequências x_2 e x_0



Adaptado de VAN DE KUILEN E WAKKER (2011).

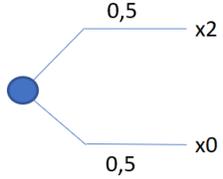
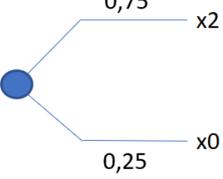
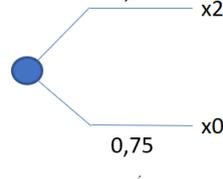
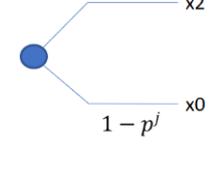
Os valores de g são obtidos por meio da bissecção dos resultados de consequência em cada critério. A Tabela 1 apresenta de maneira simplificada o método de obtenção de x_1 . São realizadas até 5 iterações até o intervalo $[l_i^6, l_s^6]$, sendo j o número de iterações e $j=6$ o intervalo máximo a ser conduzido no processo de perguntas. Os valores de x_0, x_1, x_2 foram

obtidos no processo de obtenção da função utilidade e o decisor é questionado a escolher o Prospecto A ou o Prospecto B. O valor $W^{-1}(0,5)$ representa a probabilidade equivalente ao ponto médio do intervalo $\in [0,1]$. Se para uma dada pergunta o decisor escolhe o Prospecto A, é feita a inferência de que $W^{-1}(0,5) > 0,5$ e portanto, o limite inferior l_i^j do Intervalo de indiferença para a questão $j+1$ é então obtido de maneira que o limite inferior é aumentado conforme Equação (4-5). Caso tenha sido escolhido o Prospecto B, o limite superior do intervalo da pergunta $j+1$ é reduzido pela (4-6). As perguntas são conduzidas de maneira a obter p^6 , que é a probabilidade obtida pelos resultados da quinta iteração.

$$[l_i^{j+1}, l_s^{j+1}] = \left[\frac{l_i^j + l_s^j}{2}, l_s^j \right] \tag{4-5}$$

$$[l_i^{j+1}, l_s^{j+1}] = \left[l_i^j, \frac{l_i^j + l_s^j}{2} \right] \tag{4-6}$$

Tabela 1 - Método da Bissecção para obtenção de um ponto da função de Ponderação da Probabilidade $W^{-1}(0,5) \in [0,1]$

Questão (j),	Inferência	Intervalo Indiferença $[l_i^j, l_s^j]$	p^j Bissecção = $\frac{l_i^j + l_s^j}{2}$	Prospecto A	Prospecto B
j=1	$W^{-1}(0,5) \in [0,1]$	$[l_i^1, l_s^1] = [0,1]$	$p^1 = 0,5$	$x_1 \sim$	
j=2, Se escolheu A na questão 1	$W^{-1}(0,5) > 0,5$	$[l_i^2, l_s^2] = [0,5, 1]$	$p^2 = 0,75$	$x_1 \sim$	
j=2, se escolheu B na questão 1	$(0,5) < 0,5$	$[l_i^2, l_s^2] = [0, 0,5]$	$p^2 = 0,25$	$x_1 \sim$	
(...)	$W^{-1}(0,5)$	$[l_i^j, l_s^j]$	p^j	$x_1 \sim$	
Conclusão	$W^{-1}(0,5) = p^6$	$[l_i^6, l_s^6]$	$p^6 = \frac{l_i^6 + l_s^6}{2}$		

Adaptado de VAN DE KUILEN E WAKKER (2011).

Em seguida, o valor obtido de $W^{-1}(0,5)$ é utilizado na obtenção das demais probabilidades, sendo estas elicitadas neste trabalho na sequência mostrada na Tabela 2. Nela são apresentados os prospectos A e B referentes aos pontos de cada probabilidade $W^{-1}(0,5)$, $W^{-1}(0,25)$, $W^{-1}(0,125)$, $W^{-1}(0,75)$ e $W^{-1}(0,875)$. O espaço dos prospectos é delimitado pelos valores de x_0, x_1, x_2 . Para cada ponto de probabilidade ponderada elicitado, tem-se a sequência de 5 perguntas, como demonstrado na Tabela 1 sendo então obtida a probabilidade equivalente para o intervalo $[l_i^6, l_s^6]$.

Tabela 2 - Elicitação da função Ponderação das Probabilidades pelo Método Midweight

Ponto Elicitado	Intervalo Indiferença	Prospecto A	Prospecto B	a+g =
$W^{-1}(0,5)$	$\in [0,1]$	x_1		$W^{-1}(4/8)$
$W^{-1}(0,25)$	$\in [0, W^{-1}(0,5)]$			$W^{-1}(2/8)$
$W^{-1}(0,125)$	$\in [0, W^{-1}(0,25)]$			$W^{-1}(1/8)$
$W^{-1}(0,75)$	$\in [W^{-1}(0,5), 1]$			$W^{-1}(6/8)$
$W^{-1}(0,875)$	$\in [W^{-1}(0,75), 1]$			$W^{-1}(7/8)$

Adaptado de VAN DE KUILEN E WAKKER (2011).

4.1.8 Avaliação intercritério

A avaliação Inter critério segue o modelo de agregação de utilidades unidimensionais a partir das constantes de escala obtidas pelo processo de elicitação proposto por [16]. São consideradas a suposição de independência aditiva e em utilidade entre os atributos e, portanto, utilizada uma forma aditiva de agregação dos critérios. Além disso, a obtenção das constantes de escala são obtidas pelo método tradicional de Keeney & Raiffa [16], uma vez que a extensão deste uso é diretamente aplicável para o RDU [62]. Para a agregação aditiva basta apenas que a função ponderação tenha sido obtida no intervalo [0,1] e que a utilidade seja decomposta da forma aditiva, ambos pressupostos atendidos, conforme discutido anteriormente.

A soma das constantes de Escala é igual a 1 (um) conforme (4-7) e estas são obtidas com base nos valores de utilidade unidimensional. A Função aditiva de agregação dos atributos pode ser utilizada com soma de constantes igual a um, a partir da verificação da múltipla independência em utilidade para conjuntos de prospectos ordenados dos critérios [72]. O software GU-M4OMO-DF1 desenvolvido proporciona ao decisor o estabelecimento desta etapa a fim de elicitar os *Tradeoffs* entre as loterias e posterior definição das constantes de escala K_c para cada critério c .

$$\sum_{c=h,e,m} K_c = 1 \quad (4-7)$$

4.1.9 Avaliação global das alternativas

Primeiramente são analisadas as perdas em cada uma das seções do gasoduto individualmente por meio de uma função consequência $f(c)\theta_{j,k}, a_i u(c)$. A partir dela, verifica-se a perda estimada para uma seção a_i , dado um modo de falha k e um cenário de perigo j . Para isto, são considerados aspectos físicos do gasoduto, além daqueles relacionados a operação.

Os parâmetros correspondentes às características físicas do gasoduto são: o diâmetro do gasoduto (m), o comprimento da seção (m), a distância da seção da estação de compressão (m), a taxa de vazão regular do gás na seção (m³/s).

O valor da pressão de operação constante (Kgf/cm²), pressão de vapor de água saturada (N/m²), a umidade relativa (%) correspondem a características de operação do gasoduto.

A fim de estabelecer as perdas a partir da função consequência nas dimensões de risco, ainda são adicionados como dados de entrada no problema: o preço de venda do gás (R\$/m³/s), o percentual de vegetação na zona de perigo crítica (%), número máximo de pessoas feridas (unidades), probabilidade de ter ao menos uma pessoa afetada pela radiação térmica, o fator que mostra quantas vezes mais provável que uma pessoa exposta a radiação térmica tenha queimaduras de 1º e 2º grau ao invés de fatalidades, o inverso do tempo médio para o apagamento das chamas (1/s), uma constante que relaciona o tempo de restaurar o fluxo do sistema com o tempo de apagar as chamas, a vazão de liberação do gás a partir do modelo de falha ocorrido (m³/s), e por fim, a relação entre o furo e a área transversal do gasoduto (adimensional)².

Dito isso, é necessário fazer uma análise global por meio da junção das perdas estimadas pela função consequência, além da obtenção da métrica de risco total para cada seção.

A avaliação global das alternativas é então conduzida para estimação dos riscos multidimensionais de cada seção, através da agregação dos riscos unidimensionais, da função utilidade e ponderação estabelecidas nas etapas anteriores.

O risco multidimensional para cada seção com base no RDU é obtido conforme apresentado na (4-8), que representa a soma dos valores RDU (representado por $VRDU_{a_i c}$), ponderado pela constante de escala K_c [16] de cada critério (h, e, m).

$$r_{a_i} = \sum_{c=h,e,m} [VRDU_{a_i c} \cdot K_c] \quad (4-8)$$

O $VRDU_{a_i c}$ é o “valor do RDU” obtido por meio da (4-9), dependendo da probabilidade da função de ponderação w_c e da função de utilidade $u(c)$, anteriormente elicitada para cada critério.

São feitas suposições semelhantes àsquelas realizadas por [12] no tocante à obtenção das consequências nos critérios, por meio das funções de probabilidade, sendo estas aleatórias

² Para detalhes sobre os parâmetros do modelo de riscos e verificação dos cálculos das consequências detalhadamente por meio de equações, consultar [12]

e de maneira independente. Considera-se também que o cenário de normalidade bem como os cenários acidentais não ocorrem simultaneamente, de forma que haja correlação insignificante. Além disso, assume evento aleatório, pois necessitam das características do ar exposto no momento do acidente, bem como de características de temperatura, da velocidade de propagação do gás entre outros [58]. À luz destes pressupostos, o prospecto é analisado em termos discretos de agregação da ponderação dos pesos de decisão.

O peso de decisão W_c representa a diferença entre as ponderações das consequências ordenadas, da melhor para a pior, do prospecto analisado para cada seção, conforme Figura 6.

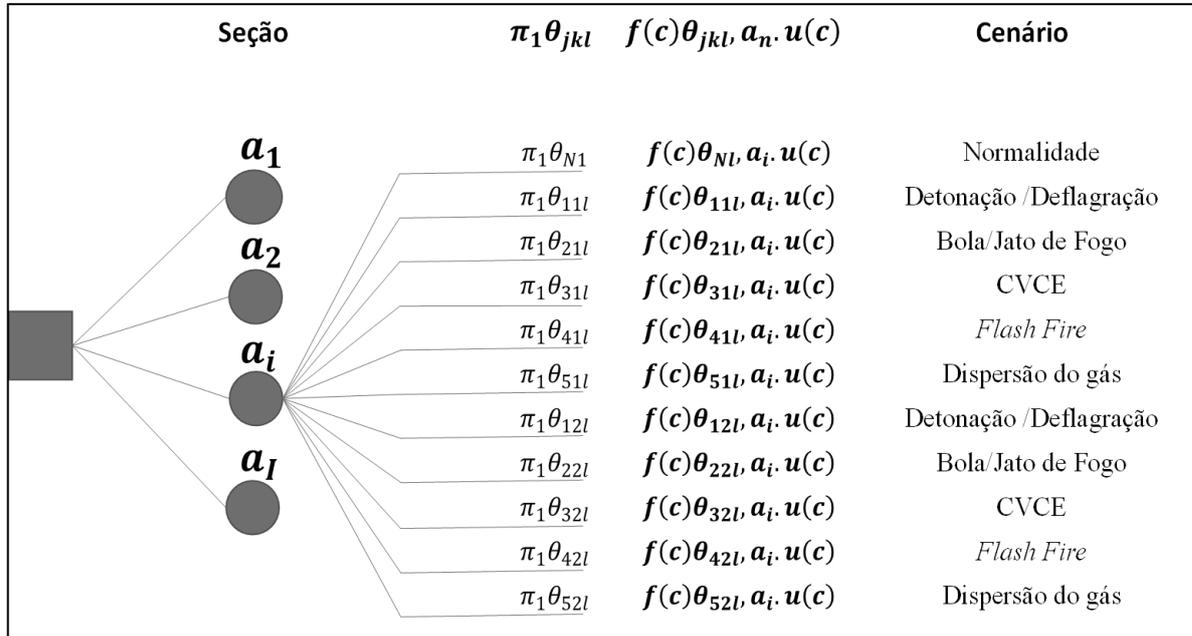
Para cada uma das posições do rank apresentadas na Figura 6, tem-se a consequência estimada conforme modo de falha e os cenários de perigo estimados. Uma vez estimadas as consequências, estas são ordenadas da melhor até a pior, sendo a consequência do cenário de Normalidade sempre igual a 1, representando o máximo em utilidade, ou seja, não há cenários acidentais e o gasoduto opera normalmente. Cada uma das seções obtém o seu próprio prospecto, uma vez que as consequências são calculadas de acordo com as particularidades de cada uma delas. Além disso, seções com um mesmo número máximo de pessoas feridas, por exemplo, na dimensão de risco humana, pode ter prospectos distintos, pois o cálculo das consequências depende de outros parâmetros para sua obtenção, como por exemplo a distância que a seção se encontra da estação de compressão. Em outras palavras, cada prospecto analisado entre as seções e entre os atributos de decisão tendem a ser únicos e dependem diretamente das características físicas e operacionais, do modo de falha e consequentemente dos cenários, conforme discutido anteriormente.

A ponderação W_c do rank é dado pela (4-3), que substituída na (4-9), pode-se obter outra forma de visualização da equação do $VRDU_{a_{i_c}}$, conforme (4-10), com o cálculo do peso de decisão expandido. A variável l varia de 1 a 11, correspondendo ao total de cenários considerados na análise de risco, incluindo o Cenário de Normalidade.

$$VRDU_{a_{i_c}} = \sum [W_c \cdot u(c)] , \text{ para } c = h, e, m \quad (4-9)$$

$$VRDU_{a_{i_c}} = \sum_{l=1}^{11} \left[[w_l (\pi_i \theta_{j_{kl}} + \pi_i \theta_{j_{kl+1}} + \dots + \pi_i \theta_{j_{k1}}) - w_l (\pi_i \theta_{j_{kl-1}} + \dots + \pi_i \theta_{j_{k1}})] \cdot u(c) \right] , \text{ para } c = h, e, m \quad (4-10)$$

Figura 6 - Prospecto para a seção ai



Fonte: A Autora (2020).

O risco estimado $r_{a_{i_c}}$ para cada dimensão c na seção a_i é equivalente ao $VRDU_{a_{i_c}}$ da seção. Além disso, a perda pode ser definida como o negativo da utilidade, sendo portanto, o risco, o valor esperado da perda [73]. Assim sendo, o risco é obtido pelo somatório das perdas da função consequência $f(c)\theta_{j,k}$. Substituindo esta informação na (4-9), e $VRDU_{a_{i_c}}$ por $r_{a_{i_c}}$, obtém-se o risco da seção a no critério c em termos da função consequência, como mostrado na Equação (4-11).

$$r_{a_{i_c}} = - \left[\sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 f(c)\theta_{j,k}, a_i u(c) \right] W_{a_{i_c}} \quad (4-11)$$

Assim, é possível resumir que a consequência para cada seção é obtida a partir de uma função consequência que soma todas as consequências estimadas a partir da árvore de eventos, multiplicada por sua utilidade correspondente, como mostrado na (4-11). Detalhes sobre a estimação das funções pode ser encontrada no trabalho de [12].

E, finalmente pela substituição da (4-11) na (4-8), obtém-se o risco multidimensional reescrito conforme (4-12):

$$r_{a_i} = \sum_{c=h,e,m} \left\{ \left[- \left(\sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 f(c)\theta_{j,k}, a_i u(c) \right) W_{a_{i_c}} \right] K_c \right\} \quad (4-12)$$

De posse dos valores de r_{a_i} , uma ordem decrescente das seções é obtida, sendo esta a recomendação inicial ao decisor com base no RDU, também chamada de ranking original ao longo do texto.

Para geração da informação sobre os riscos obtidos, pode-se comparar os ganhos ao se passar de uma seção para outra de priorização. Esta medida pode ser entendida como a distância entre um par de alternativas [25] e é dada pela (4-13), representando a razão das diferenças. Nesta equação, r_{a_n} representa uma seção genérica ordenada na posição n do ranking, e $r_{a_{n+1}}$ uma seção distinta na posição seguinte. É possível fazer $N-2$ comparações, sendo N o número de seções e consequentemente o número de posições total.

$$\text{Razão das diferenças} = \frac{r_{a_n} - r_{a_{n+1}}}{r_{a_{n+1}} - r_{a_{n+2}}} \quad (4-13)$$

4.1.10 Análise de sensibilidade e robustez

A fim de entender sobre a mudança de priorização das seções a partir de incertezas dos parâmetros de entrada do modelo matemático, a análise de sensibilidade é conduzida. Estudos, recentes do modelo de riscos de GGN pela abordagem da *EU* foram realizados em [30], apontando para uma condução de análise de incertezas para o contexto. Primeiramente os parâmetros foram divididos em grupos de simulação (*Patterns*), onde estes consistiam em um subconjunto de parâmetros do modelo de risco. Para cada um deles, foram realizadas simulações considerando percentuais de variação de 5%, 10%, 15% e 20%. Além disso, foram também consideradas variações de todos os parâmetros do modelo de riscos e das constantes de escala elicitadas pelo decisor.

Para a comparação dos resultados, foram obtidos os valores de τ de Kendall, um método não paramétrico para estimar associação entre dois conjuntos de dados ordenados. A obtenção da estimativa de correlação τ entre o ranking original e o ranking simulado é obtido a partir da (4-14). As seções do gasoduto são dispostas em ordem natural de ordenação para o ranking simulado é então comparado com o primeiro. Para os postos que obtiverem a ordem natural, ou seja, 1, 2, ..., N recebem valor 1 e -1 caso contrário. A soma destes fatores é igual a S na (4-14), sendo N o número total de posições do ranking. Para $N \geq 8$, aproximação Normal é feita conforme (4-15), a fim de estimar a probabilidade associada ao τ obtido.

$$\tau = \frac{S}{\frac{1}{2}N(N-1)} \quad (4-14)$$

$$z = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}}} \quad (4-15)$$

Para cada uma das 100.000 simulações são obtidos o valor de τ . Ao final das simulações, é calculado o valor médio destes para cada percentual de variação simulado foram utilizados para definir o grau de confiança da correlação. De posse dos resultados de τ médios, foi possível identificar os *Patterns* que mais influenciaram na variação dos resultados. Verifica-se que a sensibilidade da recomendação é mais afetada quando todos os parâmetros são considerados globalmente na simulação como possíveis entradas de incertezas no modelo de riscos. Além disso, entre os grupos isolados de parâmetros do modelo, aqueles que estão ligados a ocorrência de cenários acidentais mostraram maiores variações das seções do GGN na saída.

A partir da avaliação anterior e levando em conta a base matemática de estimação das consequências deste trabalho ser a mesma utilizada para estimação das consequências do modelo de [12], conclui-se que a Análise de Sensibilidade Global dos parâmetros deve ser conduzida, pois esta corresponde a maior influência possível na saída dos resultados. Isso posto, considerando a pior perturbação possível das seções do GGN, tem-se uma melhor condução de análise das implicações obtidas pelo modelo de risco baseado na *Non-EU* em comparação com aquele de *EU*.

Portanto, a análise de sensibilidade será conduzida para 100.000 casos para cada percentual de variação (5%, 10%, 15% e 20%) e método de análise de risco utilizando RDU e MAUT, totalizando 8x100.000 simulações.

Por fim, ressalta-se que os estudos previamente realizados por [30] foram de fundamental importância para a identificação dos principais parâmetros que afetam a incerteza da recomendação para o decisor. Além disso, a variação destes parâmetros foram utilizados principalmente para gerar bases de dados que obtivessem recomendações robustas e outras mais sensíveis. Em seguida, estas bases puderam servir de análise para o estudo conduzido na (seção 5), para verificação dos impactos da abordagem de riscos multidimensionais utilizando o RDU em comparação com aqueles obtidos pelo MAUT.

4.1.11 Análise dos resultados e elaboração de recomendação para o decisor

A partir da avaliação dos valores médios de τ obtidos na etapa anterior, os resultados são submetidos a métodos estatísticos para definir o grau de associação entre as variáveis.

Em seguida, são verificados os efeitos das razões das diferenças para entendimento do comportamento da contribuição de um par de seções ordenadas do GGN. Para tal, a análise gráfica tem papel fundamental, uma vez que esta medida depende diretamente: 1) da ordenação do ranking e 2) dos valores de risco calculados para uma dada replicação da simulação. Sendo assim, não é possível obter uma métrica que estabeleça as relações entre as 100.000 simulações de um nível de incerteza avaliado, mas é possível analisar os resultados obtidos pelo MAUT e RDU por meio de gráficos de dispersão.

O trabalho de [74] dedica uma seção para destacar a importância da visualização de riscos para a tomada de decisão por parte de decisores, gerentes, usuários, entre outros. Pode contribuir de diversas maneiras, tais como no gerenciamento, na identificação, verificação e análise dos riscos bem como na comunicação e redução do risco.

Sendo assim, o processo de geração de informação e recomendação do decisor depende diretamente desta etapa tão importante de análise e posterior gerenciamento de riscos. Seguindo trabalhos anteriores [30], [75], uma análise gráfica é conduzida, sendo dividida em duas etapas principais.

A primeira, com relação a visualização dos valores de τ e consequente geração de informação sobre a dispersão dos dados, formas de distribuição características, possíveis assimetrias e valores discrepantes de análise. Esta etapa dá subsídios para um melhor entendimento sobre os diferentes valores que τ pode assumir, estando este relacionado a variação das seções. Quanto maior o valor de τ , maior a correlação com o ranking original, e quanto mais replicações da simulação tenham correlação alta com o ranking original, maior é a inferência quanto a priorização das seções. São adicionados ainda a comparação entre os valores médios obtidos, de maneira a identificar diferenças significativas entre elas. Para este propósito, o teste *t-student* [76] é aplicado, comparando-se os resultados obtidos entre os percentuais de incerteza analisados. Os testes não paramétricos correspondentes são menos robustos para amostras grandes.

A segunda compreende a avaliação de recomendação da priorização das seções de risco ao decisor, mediante um grau de significância previamente estabelecido por meio dos testes estatísticos. São apresentadas as variações em percentual da distribuição das seções ao longo das posições do ranking. Quanto maior a sua permanência em uma posição, maior a

indicação da sua posição relativa ao ranking. Sendo assim, o decisor tem mais informações para priorizar esforços às seções que tendem a permanecer nas primeiras posições do ranking em detrimento daquelas posicionadas nas últimas. Esta parte de análise é primordial, a exemplo de diferentes configurações que as seções podem assumir, uma vez que o ranking original pode não ser a melhor recomendação a ser seguida.

4.1.12 Implementação da decisão

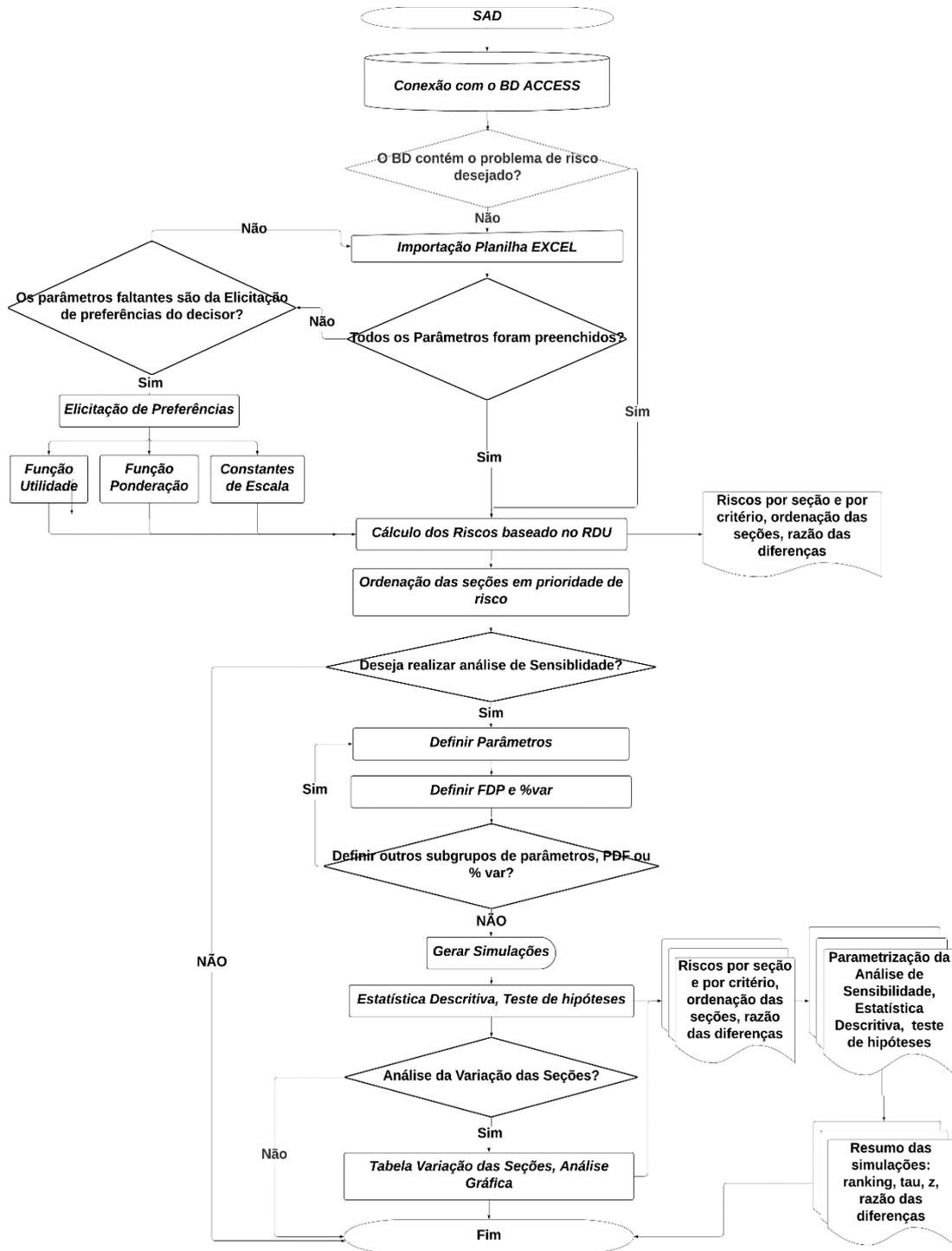
A implementação da decisão não é possível de ser verificada para os dados do trabalho, visto que se trata de uma avaliação matemática hipotética. No entanto, ao longo dos passos anteriores, é conduzida uma sequência de passos para entendimento das preferências dos decisores frente a avaliação de riscos em GGN, além de possibilitar análises de sensibilidade para nortear a decisão. Os passos representados em 4.1.10 e 4.1.11 servem como guia de análise para validação dos resultados na aplicação real do modelo.

4.2 SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS BASEADO EM RDU

Foi desenvolvido Sistema de Apoio a Decisão (SAD) para estabelecimento da priorização de riscos multidimensionais baseado na *non-EU*, seguida da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de risco e geração de resultados da avaliação das seções. O SAD de código GU-M4OMO-DF1 e nome *Decision Support System for Risk Assessment in Natural Gas Pipelines using Multi-attribute Rank-Dependent Utility* está em processo de registro no está em processo de registro, no aguardo de retorno de publicação.

O SAD é composto de cinco módulos principais, sendo estas compostas pela conexão com o Bando de Dados (BD) e importação dos parâmetros que compõem o modelo de riscos; a elicitação de preferências do decisor, que compreendem as funções utilidade unidimensionais, as funções ponderação de probabilidades e o estabelecimento das constantes de escala; o cálculo de riscos para cada seção do gasoduto; análise de sensibilidade dos resultados, mediante simulações e; Exportação dos Resultados para planilha EXCEL. As principais funcionalidades do SAD GU-M4OMO-DF1 são apresentadas na Figura 7 demonstrando as relações entre os diversos módulos de análise, bem como a sequência de funções a serem implementadas até a etapa final, de análise gráfica da variação da seção.

Figura 7 - Fluxograma de funcionalidades do SAD para Cálculo do RDU, análise de sensibilidade e exportação de resultados



Fonte: A Autora (2020).

4.2.1 Importação dos Parâmetros A, B e C

O módulo de importação corresponde a entrada de dados do modelo para os cálculos de risco. A entrada é feita por meio de Planilha EXCEL e importada para o banco de dados ACCESS. O SAD está inicialmente configurado para um decisor por vez. No EXCEL devem conter obrigatoriamente os parâmetros do tipo 1 (que variam por seção) e 2 (que variam por cenário), obtendo o SAD uma verificação de preenchimento de todos os campos forçando o usuário a completar todo o cadastro na planilha antes de completar a importação. Os Parâmetros referentes às preferências do decisor podem ser importadas na planilha, se anteriormente obtidos por meio externo, desde que de acordo com as equações de utilidade (4-1), Prelec (2-5) e constantes de escala (4-7) para cada critério.

4.2.2 Elicitação das preferências do decisor

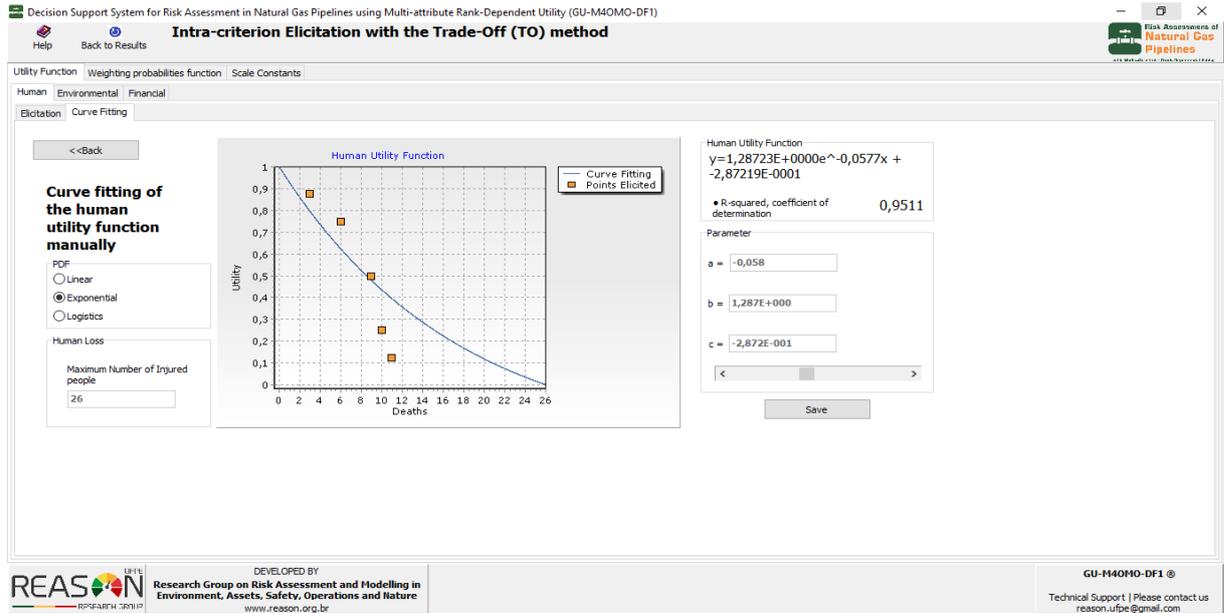
O segundo módulo contém as informações das preferências do decisor. Este é automaticamente habilitado para que o decisor possa expressar suas preferências, uma vez verificada que estes dados não estão contidos na planilha de importação. Além disso, o decisor pode acioná-lo sempre que necessário, se desejar estabelecer nova condução de análise de suas preferências ou ainda se fez alteração no espaço de ações das consequências do problema em análise. Este módulo contém elicitación separada para cada critério, contendo informação na tela de como proceder para obtenção dos resultados. O algoritmo descreve a sequência de perguntas

do método TO [42], de maneira a obter os pontos de utilidade. Ajuste fino de curva é conduzido a fim de obter o menor coeficiente de determinação (R^2) para os dados, aumentando assim a representação da utilidade estabelecida pelo decisor para um critério (Figura 8).

Em seguida, a elicitación da função ponderação das probabilidades é conduzida, mediante método Midweight [42] cujo algoritmo conduz a um processo interativo com o usuário, que finaliza o processo de perguntas após estabelecer os pontos necessários para plotar a curva que represente suas probabilidades. O ajuste de curva é feito de maneira a estabelecer, a exemplo da elicitación anteriormente descrita, o menor valor de R^2 , segundo a curva de Prelec por meios de seus parâmetros α e β (Figura 9). Além disso, as propriedades de subaditividade e superaditividade (ver 4.1.7.2) são testadas, de maneira a verificar se o decisor viola uma destas, todas ou nenhuma. Estas verificações são importantes para realizar

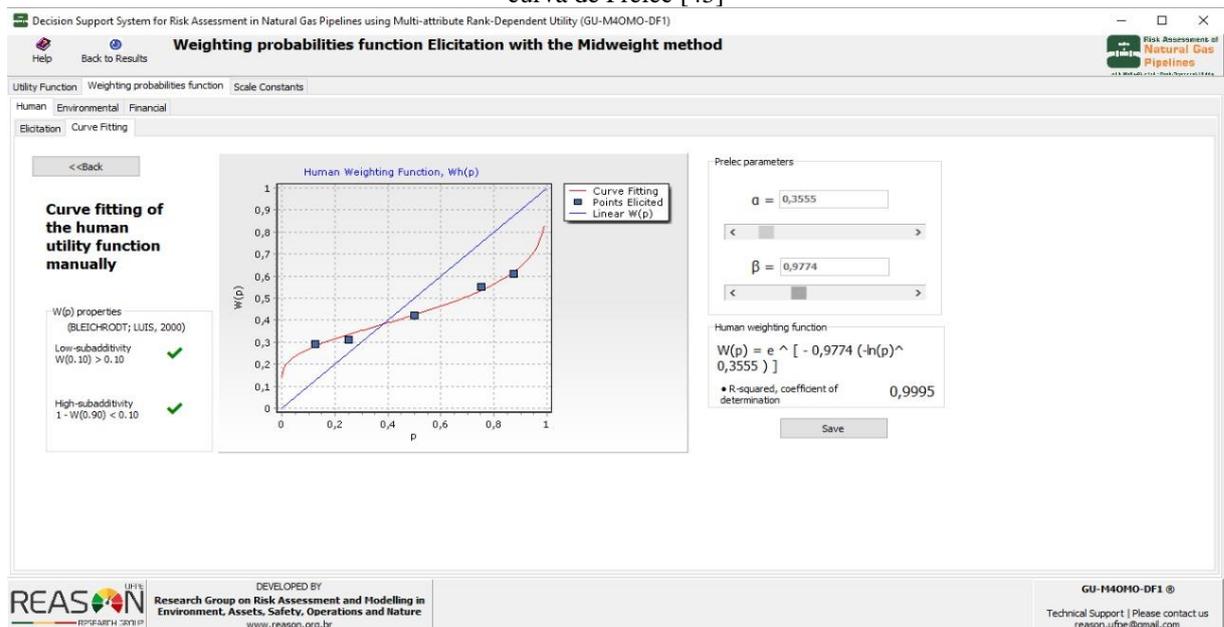
inferências quanto a concavidade (convexidade) da função de ponderação. Da Figura 9 verifica-se que o decisor não violou as propriedades referidas (verificadas pelo símbolo ✓, e ✗ caso contrário), além de obter ajuste de curva de Prelec com bom ajuste de curva ($R^2 = 0,9995$).

Figura 8 - Tela do SAD referente a parte 2 da Elicitação da Função Utilidade [42] com ajuste de curva dos pontos elicitados



Fonte: A Autora (2020).

Figura 9 - Tela do SAD contendo Exemplo de Resultados da Elicitação da Função Ponderação [42] e ajuste de curva de Prelec [45]



Fonte: A Autora (2020).

Por fim, a elicitación de preferências é finalizada com a obtenção das constantes de escala por meio de procedimento interativo, que é iniciado a partir do estabelecimento da relação de preferências entre os critérios, seguida da obtenção dos *pay-offs* que estabelecem o valor de consequência para um dado critério que o torna indiferente a loteria apresentadas, seguindo os passos das constantes de escala para problema de decisão multicritério conforme [16] (Figura 10).

Figura 10 - Tela do SAD contendo Exemplo da Parte 1 da Elicitación das Constantes de Escala [16]

The screenshot displays the 'Inter-criteria Elicitation with MAUT' interface. It features three lottery selection screens for different criteria: 'Lives', 'm2', and '\$'. Each screen shows a gamble between two outcomes with probabilities p and $1-p$. The 'Lives' lottery compares 0 Deaths (with 1760 m2 and \$150,000,000) against 26 Deaths (with 1760 m2 and \$150,000,000). The 'm2' lottery compares 26 Deaths (with 0 m2 and \$150,000,000) against 26 Deaths (with 1760 m2 and \$150,000,000). The '\$' lottery compares 26 Deaths (with 1760 m2 and \$0) against 26 Deaths (with 1760 m2 and \$150,000,000). The 'Human' criterion is selected. The interface includes input fields for 'Lives' (26), 'm2' (1759), and '\$' (15000000). Buttons for 'Choose' and 'Reset' are visible.

Fonte: A Autora (2020).

4.2.3 Cálculo de Risco e valores RDU

O terceiro módulo é referente ao cálculo de perdas, consequências e riscos associados a cada seção em seus respectivos critérios. O risco para cada seção é obtida a partir da obtenção do valor RDU para cada dimensão ((4-9)) que considera o prospecto obtido pelas consequências calculadas, e da ordenação destes valores ponderados por seus respectivos pesos de decisão ((4-3)). São apresentados os valores RDU para cada seção em todos os critérios ((4-12)), bem como do valor de risco para a seção, conforme o decisor queira visualizar.

4.2.4 Análise de Sensibilidade

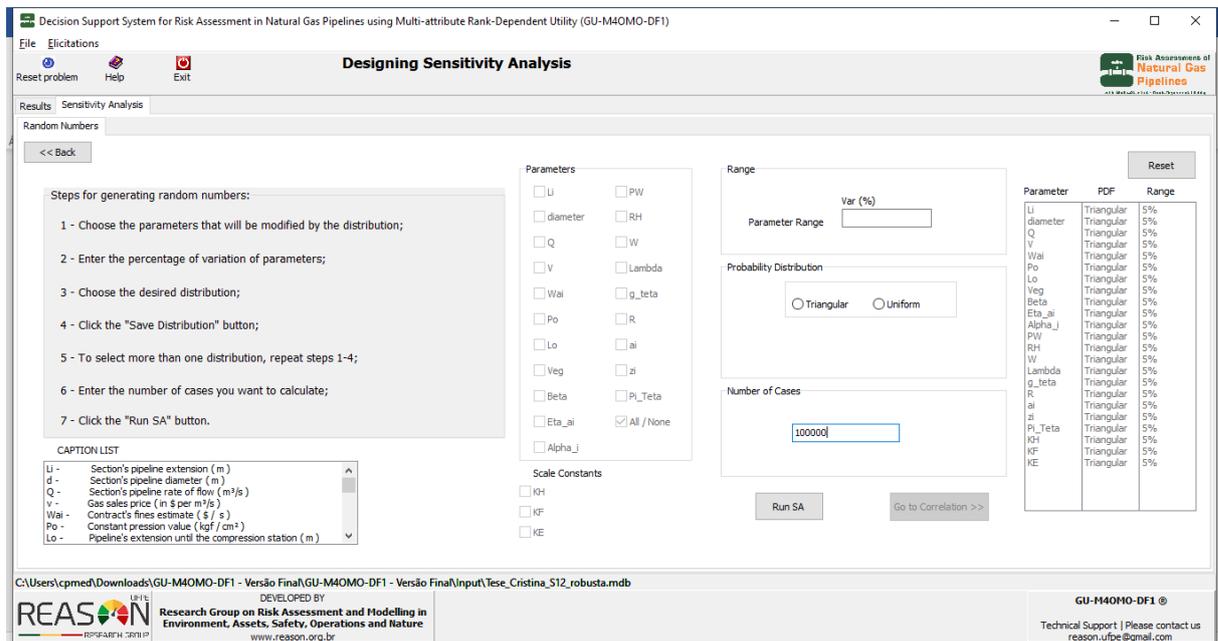
O módulo de Análise de Sensibilidade é então apresentado, uma vez o decisor tenha necessidade de prosseguir com a análise dos resultados. Ela é dividida em três partes, sendo a primeira relacionada a definição dos parâmetros que irão compor o conjunto de variações segundo distribuição triangular ou uniforme, seguida análise descritiva dos valores de τ obtidos nas simulações e, por último, avaliação da variação das seções.

4.2.4.1 Parametrização da Análise de Sensibilidade

Diferentes grupos podem ser considerados com combinações de percentuais de variação e distribuição de probabilidades. Sendo assim, uma diversa gama de combinações possíveis pode ser realizada para parametrização da simulação. A Figura 11 apresenta a parametrização da Análise de Sensibilidade a ser executada em 100.000 casos, apresentando no lado direito da figura, um resumo contendo o parâmetro que será modificado, a distribuição de probabilidade relacionada e o percentual de variação. Todos os parâmetros referentes a características físicas e de operação dos gasodutos, bem como as características da área ao seu redor são representadas com sua descrição e unidade de medida no canto inferior esquerdo da tela de maneira que o usuário possa recordar o significado deles sempre que necessário.

Finalizada a definição dos parâmetros, deve-se estabelecer o número de simulações a que se propõe analisar e em seguida aguardar a geração de resultados. Estes podem ser analisados em duas etapas, compondo a estatística de testes e posterior análise de sensibilidade da variação das seções. As etapas são acessadas pelo decisor se necessário, sempre nesta ordem. Detalhes de ambas as etapas são apresentadas na sequência.

Figura 11 - Tela do SAD Referente a parametrização da Análise de Sensibilidade



Fonte: A Autora (2020).

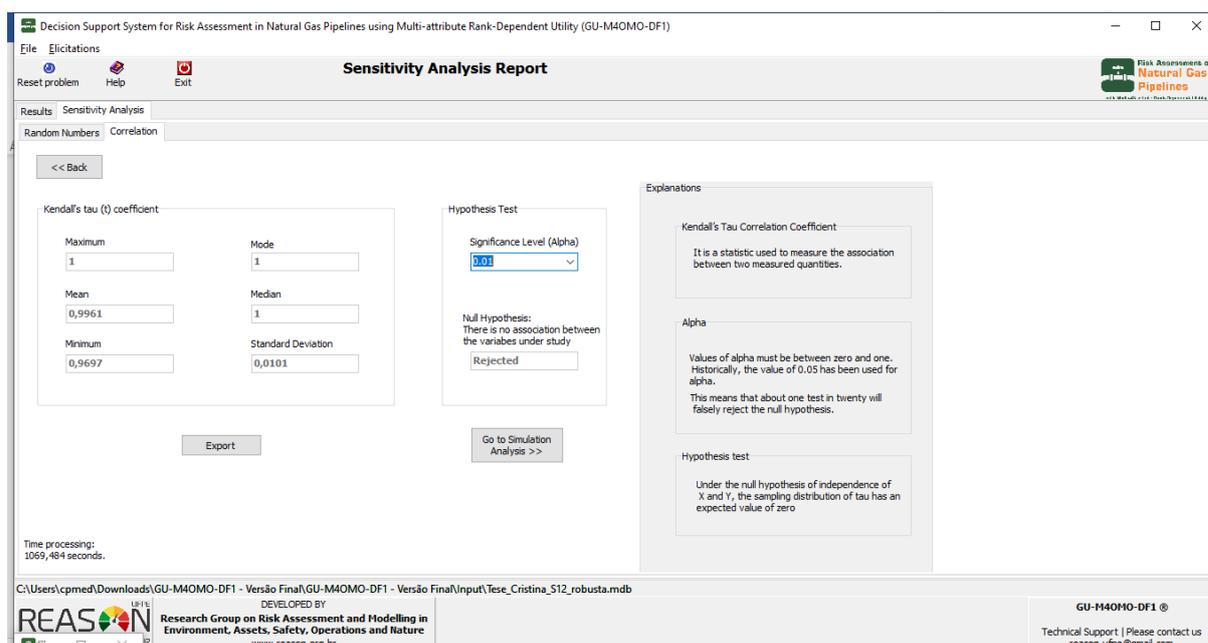
4.2.4.2 Estatística descritiva e teste de Hipóteses

Por se tratar de uma simulação e, considerando que diversas configurações de parâmetros do gasoduto podem estar mais ou menos influenciados por seus níveis de incerteza, é necessário verificar se o número de simulações realizadas serão necessárias para atingir o grau de convergência necessário para análise. Desta maneira, as análises realizadas neste trabalho consideram 100.000 simulações para cada nível de incerteza analisado e em seguida verificado o seu nível de atingimento. Para isto, são analisadas duas simulações com as mesmas parametrizações para um certo nível de incerteza.

Após isto, verifica-se se o mesmo valor de correlação é obtido, sendo o resultado da primeira simulação não diferente estatisticamente do primeiro. Além disso, ambos devem rejeitar H_0 ao mesmo nível de significância.

Ao fim desta análise, são obtidos os valores da estatística descritiva, tais como moda, mediana, desvio padrão, valores mínimo e máximos e o valor médio da estatística de teste de correlação de Kendall, sendo a partir deste, analisado o nível de significância dos resultados da simulação, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Tela do SAD Referente a Estatística Descritiva obtida das simulações na Análise de Sensibilidade



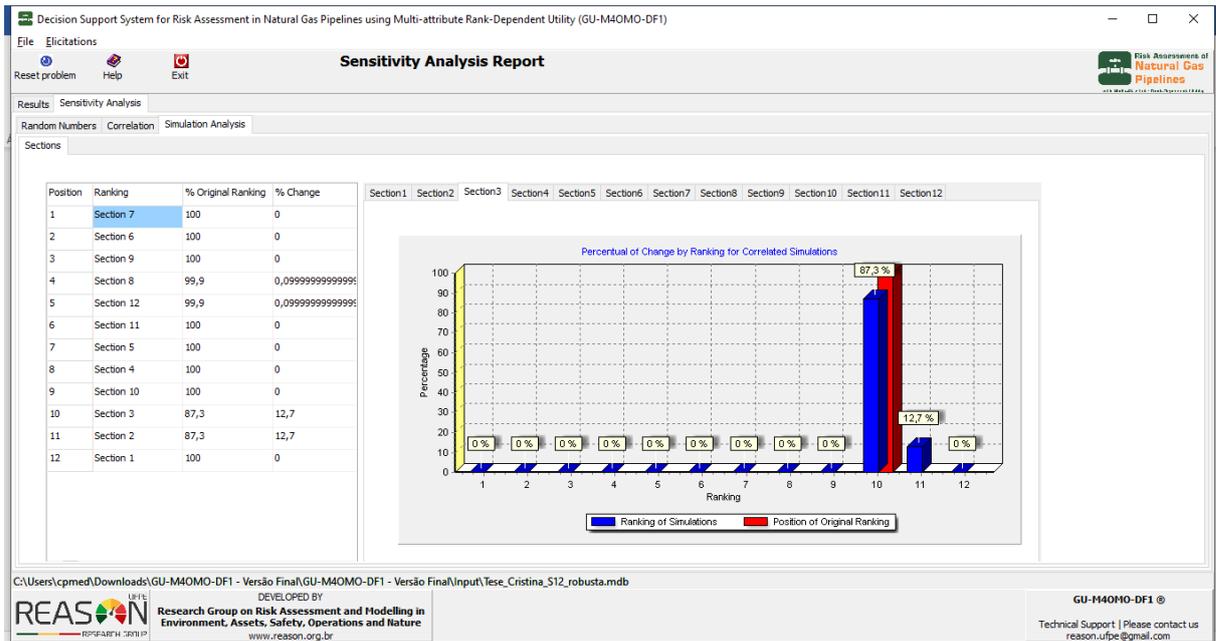
Fonte: A Autora (2020).

4.2.4.3 Análises da Variação das seções do GGN

A etapa final da análise de sensibilidade é constituída por geração de informações referentes aos rankings obtidos nas simulações. Para isto, apresenta-se a informação para todas as seções, sua posição original no ranking seguida do percentual de vezes em que os resultados mostraram que a seção permaneceu em sua posição original e, conseqüentemente, o percentual em que esta variou (ver tabela representada no lado esquerdo da Figura 13).

Também é disponibilizada análise gráfica por meio de gráfico de barras (Figura 13) para cada seção individualmente. Nela contém a informação detalhada da variação de cada seção, que servirá de guia para definir a recomendação final ao decisor com base na variação das seções ao longo das posições do ranking.

Figura 13 - Tela do SAD Referente a Análise de Sensibilidade da variação das seções do gasoduto



Fonte: A Autora (2020).

4.2.5 Exportação de Resultados

A exportação dos resultados pode ser realizada em diferentes etapas de análise (ver Figura 7), para planilha EXCEL, iniciando na etapa de cálculo dos riscos, seguida da parametrização da Análise de sensibilidade, a estatística descritiva e por fim, a avaliação do percentual da variação das seções.

A exportação completa dos resultados obtidos no cálculo de risco e posterior análise de sensibilidade são realizados em abas distintas do mesmo arquivo Excel, sendo elas:

- Exportação dos resultados de riscos para todas as seções em cada critério, o risco total, o ranking original e a razão das diferenças;
- Parametrização da análise de sensibilidade contendo os parâmetros e suas funções de probabilidade e percentuais de variação correspondentes
- Análise Descritiva dos resultados, além de teste de hipóteses para grau de significância pré-estabelecido 99%, 95%, 90%, 85% e 80%.
- O ranking da simulação, acompanhado do valor de τ e z correspondentes, além da N-2 razão das diferenças;
- Análise da variação das seções com resumo da variação e dados completos da variação da seção por posição no ranking

Os dados de d) e e) são disponibilizados de maneira que o usuário do SAD possa manipular os dados em software estatístico ou gere gráficos complementares conforme desejo do decisor de complementar a informação.

5 APLICAÇÃO NUMÉRICA DOS MODELOS DE RISCO PARA GGN

São considerados GGN hipotéticos para estimação dos riscos. Acrescenta-se que é comum usar o tipo de terreno ao redor do tubo para delimitar cada seção, compondo o conjunto de alternativas de ação [12]. Por esta razão, neste trabalho, estas seções são delimitadas por área residencial, área comercial, ambiental conservação e/ou área industrial. Cada uma delas corresponde a um conjunto discreto de seções, que serão ordenadas de acordo com o total de risco estimado.

A fim de evidenciar os benefícios da nova abordagem de riscos dimensionais utilizando o RDU, foram simuladas bases de dados para posterior análise. O trabalho de [30] utilizou o conceito de *Patterns* para definir o(os) conjunto(s) de parâmetros sensíveis do modelo. Tendo como base esta análise, foram realizadas simulações em laboratório de pesquisa com auxílio de software GU-M4OMO-DF1 computacional desenvolvido para este fim e apresentado na seção 4.2. Diversas combinações de parâmetros foram estudadas, evidenciando preferencialmente aqueles apontados como sensíveis na análise de sensibilidade global de *patterns* desenvolvida pelos autores citados. Os *insights* gerados a partir desta análise prévia puderam nortear a construção de bases de simulação para o estudo atual.

Primeiro buscou-se entender as principais diferenças encontradas nos resultados gerados entre os modelos MAUT e RDU. Para tanto, um conjunto de parâmetros iniciais do modelo foi estudado e a partir deles geradas bases que utilizavam fontes de incerteza representadas por um percentual de variação. Os resultados de risco para as seções são então comparados mediante análises iniciais. Assim como em [30], valores de τ de Kendall foram usados para inferir sobre a robustez dos resultados obtidos. Mediante este parâmetro, para certo grau de confiança conhecido, a robustez da recomendação quanto a priorização das seções é realizada. Uma análise de riscos multidimensionais de GGN, é considerada robusta quando o nível de incertezas gerados por seus parâmetros não afeta drasticamente a recomendação ao decisor, ou seja, quanto menor for a ocorrência de mudanças de posição das seções no ranking gerado como prioridade de risco, maior o valor de τ de Kendall, que representa uma maior correlação entre os resultados obtidos.

5.1 CARACTERÍSTICAS DOS GASODUTOS

Para melhor avaliar os resultados obtidos no modelo multidimensional de risco baseado em RDU, bases de dados chamadas robustas e não robustas foram consideradas, conforme [30], [75]. A justificativa deste uso é evidenciar os impactos obtidos nas situações extremas, pois assim abrangeria os aspectos intermediários, com bases resultantes em valores medianos de robustez/sensibilidade. A hipótese inicial é de que a introdução do conceito do valor de utilidade dependente do ranking pode contribuir favoravelmente para a recomendação final ao decisor.

Dito isto, das diversas bases estudadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, escolheu-se duas para gerar insights das contribuições do RDU para o contexto. A fim de que sejam comparadas, ambas possuem o mesmo espaço de consequências, ou seja, as mesmas perdas máximas nos critérios humano, ambiental e financeiro. Além disso, a elicitación das preferências do decisor são iguais para ambas para não haver vieses nas comparações. Sendo assim, o que diferencia estas bases são as características físicas do gasoduto, o número de seções em que o duto é dividido, bem como valores monetários diferentes de distribuição do gás, de multas e indenizações provenientes de perdas, entre outras.

A partir desta etapa do trabalho, as bases (gasodutos hipotéticos analisados) serão referidas como S12, com extensão total de 36.900m e S8 com extensão de 26.680m, com os gasodutos contendo 12 seções e 8 seções respectivamente. As perdas máximas de ambos são consideradas como sendo 25 pessoas no critério Humano, 1.800m² de área no critério ambiental e R\$15.000.000,00 no critério financeiro. A partir deste espaço de ações, a elicitación de preferências é conduzida junto ao decisor pelo analista.

Serão apresentadas a seguir os resultados das aplicações matemáticas com base nos modelos de risco RDU e MAUT respectivamente.

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO COM BASE NO RDU

Com base nas características descritas na seção anterior, o gasoduto é submetido então a avaliação de riscos para estimação dos riscos individuais de cada seção. O RDU é conduzido mediante estabelecimento prévio das preferências do decisor, que foram estabelecidas por meio do SAD GU-M4OMO-DF1.

Foram primeiramente elicítadas a função Utilidade, uma vez que o estabelecimento da função ponderação das probabilidades para cada critério e as constantes de escala dependem

da obtenção dos pontos x_1 e x_2 , e das funções utilidade unidimensionais, respectivamente. Os principais parâmetros obtidos na eliciação de preferências são mostrados na seção 5.2.1.

5.2.1 Eliciação de preferências

Como uma das principais etapas de uma abordagem multicritério de decisão, a eliciação de preferências junto ao decisor foi feita a partir de uma estrutura axiomática que conduz a uma sequência de perguntas interativas, cujas resposta futura depende diretamente da anterior respondida pelo decisor. Como já discorrido na seção 4.1.7.1 para a obtenção dos valores de utilidade a partir do método TO, são necessárias definições sobre os valores de referências r e R para cada critério. Estes podem ser obtidos tomando como base valores inferiores ou superiores ao valor mínimo e máximo, respectivamente, estando, portanto, fora destes limites. Sua escolha deve ser feita de maneira que não haja predileção clara do decisor a escolher sempre perguntas que favorecem o pensamento entre os dois prospectos apresentados, evitando preferências estrita pelo Prospecto A ou B. Desta maneira, foram escolhidos valores inferiores a máxima perda, caso, contrário, se fossem escolhidos valores positivos, o decisor estaria apto a escolher sempre ganhar algo a perder. A Tabela 3 apresenta os valores de referência adotados para os critérios, seguido dos parâmetros a , b , c da aproximação da função exponencial dada pela (4-1). Esta representa a utilidade para cada critério pelo método TO.

Para definição de x_1 e x_2 (ver seção 4.1.7.1), a eliciação destes dois valores foi realizada duas vezes cada e tomado o seu valor médio deles como os valores finais de x_1 e x_2 posteriormente utilizados na eliciação da função ponderação de seu critério correspondente. Os valores das constantes de escala K foram obtidos por meio de procedimento de eliciação de [16], obtendo para o decisor em questão, $K_h > K_a > K_f$. Para os três critérios foram encontradas funções utilidade que demonstram aversão ao risco, porém com aproximação linear para o critério financeiro.

Tabela 3 - Parâmetros da função utilidade e Constantes de Escala para cada critério

Critério	a^3	b^3	c^3	K^4	r^5	R^5	Δ^6
Ambiental	-0,00088	1,23009	-0,2479	0,3146	-1.800,00	-2.000,00	-400
Financeiro	-3,62E-08	2,42417	-1,4226	0,1127	-16.000.000	-20.000.000	-4.000.000
Humano	-0,0637	1,29457	-0,2794	0,5727	-26	-30	-8

Fonte: A Autora (2020).

A função Ponderação das probabilidades elicítadas pelo método Midweight foram obtidas com base nos valores de x_1 e x_2 provenientes do TO. Em seguida, os parâmetros α e β (Tabela 4) da Equação de Prelec (2-5) definida anteriormente e estabelecidos por meio de Regressão Logística com Grau de confiança de 99% para os três critérios.

Tabela 4 - Função Ponderação por Aproximação Prelec para os Critérios

Critério	Constantes de Prelec	
	α	β
Ambiental	0,3451	1,3090
Financeiro	1,3975	2,6803
Humano	0,3655	0,9772

Fonte: A Autora (2020).

Para verificação da não lineariedade da probabilidade, aplicou-se o teste estatístico t-pareado para verificar a diferença entre as médias com $H_0: \mu_{w(p)} - \mu_p = 0$ e $H_1: \mu_{w(p)} - \mu_p \neq 0$. Para os três critérios, a hipótese nula foi rejeitada com $p \leq 0,01$.

Os desvios de $w(p)$ com relação a p também são confirmados pela aplicação do Teste de Sinais Unilateral à esquerda, para Hipótese Nula $H_0: Mediana_{w(p)} = Mediana_p$ e Hipótese Alternativa $H_1: Mediana_{w(p)} < Mediana_p$ que rejeita H_0 para $\alpha \leq 0,01$.

Além disso, conforme estabelecido por [46], as propriedades de baixa-subaditividade e alta-subaditividade podem ser analisadas por meio da verificação se $w(0,10) > 0,10$ e $1 - w(0,9) > 0,10$, respectivamente. Os autores afirmam que este método é comparável com aquele medido por [44]. O decisor apresentou baixa-subaditividade e alta-subaditividade para ambos os critérios humano e ambiental e alta-subaditividade para critério financeiro. Estas propriedades confirmam novamente os desvios da lineariedade. Pela classificação dada pelos autores, o critério financeiro tem comportamento pessimista, por apresentar função convexa e

³ Aproximação exponencial Equação (4-1)

⁴ Constantes de escala [16]

⁵ Parâmetros de referência para elicitação da função utilidade unidimensional [22]

⁶ Incremento para definição dos limites de cada interação na obtenção da função utilidade [22]

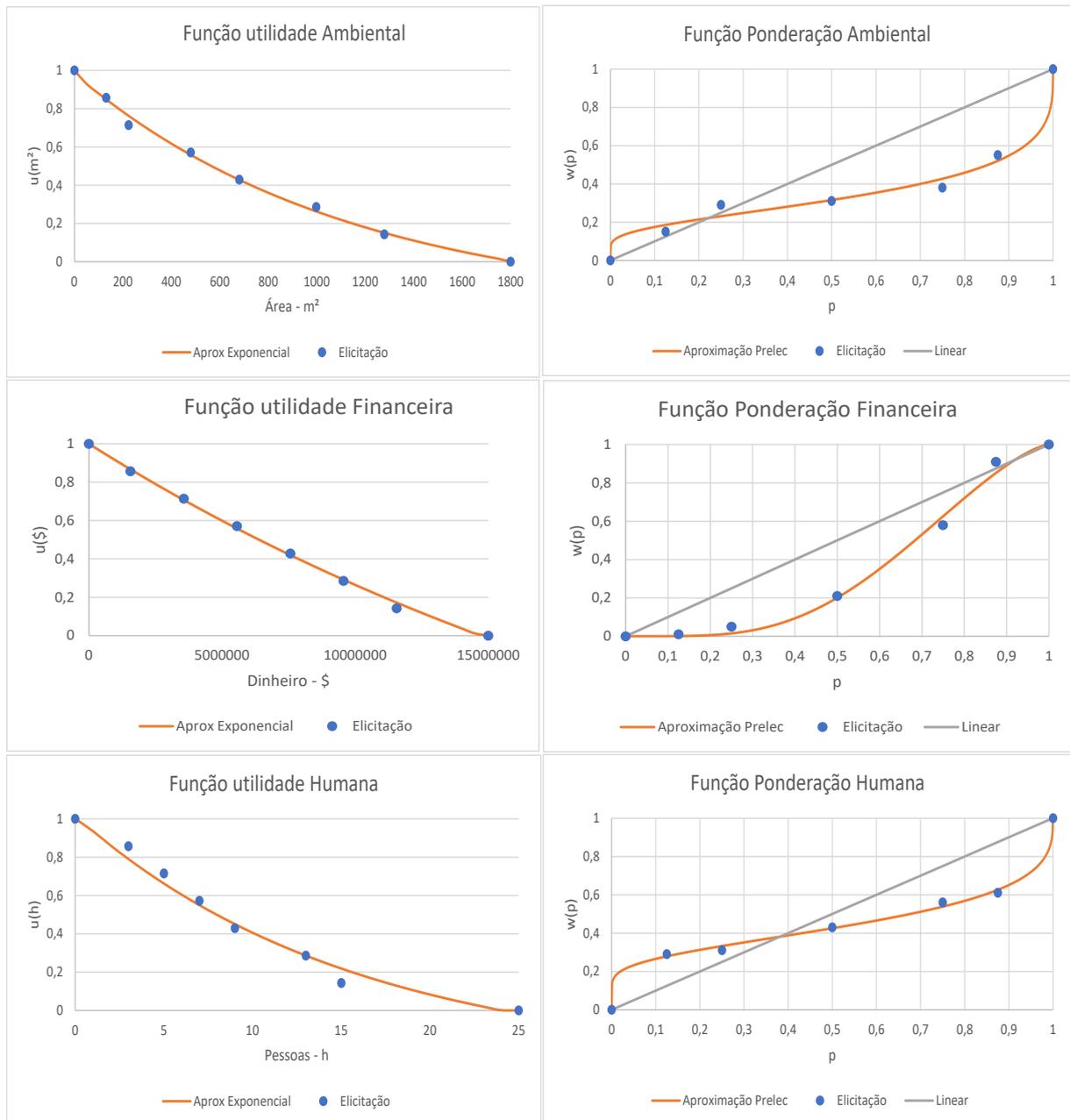
não apresentar baixa-subaditividade. Os demais critérios são mistos, configurando uma curva s-shape invertida [45].

Estas propriedades mostram que um intervalo mais baixo de probabilidade (de zero a uma probabilidade q de referência) tem maior impacto do que probabilidades intermediárias, bem como probabilidade mas próximas de 1 também possuem mais impacto do que aquelas obtidas no meio [22].

A Figura 14 apresenta os gráficos de Utilidade e de Ponderação das probabilidades para cada critério. A partir dela verifica-se a nítida diferença dos desvios da lineariedade da probabilidade, conforme mostrado matematicamente pelos testes estatísticos, sendo majoritariamente convexa para dimensão de riscos financeira. A mudança de concavidade entre côncava e convexa na função ponderação é encontrada para $p < 0,4$ como previsto nos testes executados por [77].

Nela, verifica-se que valores de p próximos de 1 assumem ponderação $w(p)$ aproximadamente igual a 1.

Figura 14 - Gráficos Função Utilidade e Função Ponderação para os critérios



Fonte: A Autora (2020).

5.2.2 Obtenção das seções de Risco

De posse das preferências do decisor e da definição dos parâmetros do gasoduto, são calculadas as consequências para cada seção em um dado critério. A árvore de eventos é considerada para estabelecer o modo de falha k , os possíveis cenários de risco j e suas probabilidades $\pi\theta_{jk}$. Então, as consequências $f(c)\theta_{jk}$, a_i são estimadas para a seção para os critérios c .

Para estimação do valor RDU, as consequências de cada cenário são ordenadas da maior para a menor, e realizada a aplicação da (4-8). O processo é repetido para os demais critérios, considerando as suas próprias funções utilidade e ponderação. Por fim, a estimação do risco total em cada seção é obtida pela multiplicação das constantes de escala de cada critério e seu valor RDU relacionado. As seções são então ordenadas em prioridade de risco, conforme Tabela 5. Uma vez que os resultados são apresentados em uma escala de intervalo, a proporção representa o quanto é ganho de escolha para uma alternativa para outra em termos de risco [25].

O ranking original obtido para S12 e S8 serão posteriormente comparados com os resultados obtidos na análise de sensibilidade para cada gasoduto, separadamente, estabelecendo assim correlação entre o valor obtido na simulação e o ranking original.

Tabela 5 - Priorização das seções dos gasodutos com base no RDU para S12 e S8

Posição no Ranking	S12			S8		
	Ranking Original	Risco da Seção	Razão das Diferenças	Ranking Original	Risco da Seção	Razão das Diferenças
1	7	-0,8196	0,5183	1	-0,9322	5,0593
2	6	-0,8322	3,1766	6	-0,9423	13,1894
3	9	-0,8564	1,5778	7	-0,9443	0,2027
4	8	-0,8640	0,5445	4	-0,9444	0,8507
5	12	-0,8689	0,2268	2	-0,9452	0,4206
6	11	-0,8778	3,3727	8	-0,9460	0,641
7	5	-0,9169	3,9478	3	-0,9481	-
8	4	-0,9286	0,5032	5	-0,9514	-
9	10	-0,9315	8,7003	-	-	-
10	3	-0,9373	0,1491	-	-	-
11	2	-0,9380	-	-	-	-
12	1	-0,9425	-	-	-	-

Fonte: A Autora (2020).

5.3 APLICAÇÃO DO MODELO COM BASE NO MAUT

Aplicação do modelo de riscos para ambos os gasodutos S8 e S12 é conduzida nesta seção. A fim de obter resultados que possam ser comparados sem viés de análise, as mesmas funções utilidade e constantes de escala obtidas na seção anterior e apresentadas na Tabela 3. A obtenção dos riscos para cada critério é obtidos pela soma das perdas estimadas para cada modo de falha e cenário de perigo estimados, cuja agregação de riscos para cada seção é dada pela (3-1).

Para S12, o ranking original é composto por {7,6,11,9,8,12,5,4,2,10,1} e para S8 é obtido o ranking {1,6,7,4,8,2,3,5}. De maneira análoga à aplicação do modelo com base no RDU, o ranking original de ambos os gasodutos S12 e S8 serão submetidos a análise de sensibilidade para posterior geração de informação sobre os resultados obtidos em ambos os métodos.

Ressalta-se ainda que não serão realizadas comparações diretas entre o ranking obtido pelo RDU e MAUT uma vez que o modelo matemático difere em ambos. No entanto, serão comparados os valores da estatística de correlação obtidos no item 5.4 e 5.5.

Tabela 6 - Priorização das seções dos gasodutos com base no MAUT para S12 e S8

Posição no Ranking	S12			S8		
	Ranking Original	Risco da Seção	Razão das Diferenças	Ranking Original	Risco da Seção	Razão das Diferenças
1	7	-0,9878	1,5937	1	-0,9991	37,4232
2	6	-0,9895	1,3157	6	-0,9993	9,4309
3	11	-0,9905	2,8292	7	-0,9993	0,02
4	9	-0,9913	1,5373	4	-0,9993	0,5169
5	8	-0,9916	0,0264	8	-0,9993	9,6944
6	12	-0,9918	48,2369	2	-0,9994	0,0777
7	5	-0,9988	1,3152	3	-0,9994	-
8	4	-0,9989	5,9595	5	-0,9995	-
9	3	-0,9990	30,3142	-	-	-
10	2	-0,9990	0,008	-	-	-
11	10	-0,9990	-	-	-	-
12	1	-0,9991	-	-	-	-

Fonte: A Autora (2020).

5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS RDU E MAUT

A fim de identificar a robustez das recomendações iniciais, bem como identificar possíveis sensibilidades da avaliação das seções com relação umas às outras, uma análise de sensibilidade criteriosa é conduzida. Para S12 e S8 são geradas perturbações de seus parâmetros globalmente, mediante percentuais de 5%, 10%, 15% e 20%.

A identificação de *Patterns* de simulação que mais interferem nos resultados de riscos multidimensionais conduzida em [30] foi utilizada para originar as bases S12 e S8 e portanto, não serão apresentados detalhes sobre os parâmetros neste estudo. Análises de sensibilidade conduzidas em [30] e [75], para os modelos de risco multidimensionais em gasodutos de [12] e [14], mostraram que as maiores perturbações de resultados seriam aquelas advindas da variação ampla dos parâmetros do modelo, incluindo as constantes de escala.

Sendo assim, as análises conduzidas neste trabalho focam no aspecto global de simulação. São conduzidas 100.000 simulações para cada combinação de S12 e S8 e suas variações percentuais tanto para o modelo matemático contemplado pelo MAUT quanto pelo RDU, totalizando 16x100.000 simulações.

Ao longo da apresentação dos resultados obtidos, as comparações serão conduzidas entre os valores obtidos MAUT x RDU a fim de ter subsídios para sustentar a hipótese de melhorias nos resultados de análise de riscos em gasodutos.

A seguir são apresentados os resultados separadamente para os gasodutos hipotéticos simulados com 8 e 12 seções respectivamente e posteriormente realizados comentários quanto ao impacto das avaliações, comparando os resultados obtidos.

5.4.1 Análises de S8

Um gasoduto hipotético contendo 8 seções foi simulado com características distintas ao longo de suas seções. Análises preliminares mostraram sensibilidade nas ordenações obtidas para o modelo de riscos usando a *EU* e portanto, escolhido para representar uma base dita como sensível. Tem como objetivo verificar se há vantagens em se usar o RDU com relação ao MAUT para diferentes níveis de incerteza de parâmetros.

Busca-se analisar as consequências de utilização do RDU quando um GGN obtiver seções mais distintas umas das outras ou ainda quando seus parâmetros forem estimados de maneira que uma maior variação de seus parâmetros possa interferir mais diretamente na

ordenação as seções de risco, causando assim maior dificuldade na estimação do ranking a ser recomendado ao decisor, direcionando seus esforços relativos a mitigação de riscos.

Para avaliação dos resultados obtidos, primeiramente serão apresentados os valores de τ de Kendall obtidos nas 100.000 replicações obtidas para cada uma das avaliações globais considerando 5%, 10%, 15% e 20%. O Ranking original obtido para as duas abordagens de risco, MAUT e RDU são apresentadas na Tabela 7, além de mostrar a ordenação das seções do gasoduto que ocorreu com maior frequência. A partir dela, verifica-se que a primeira posição do ranking tende a permanecer com a mesma recomendação de priorização para seção 1 em ambos os métodos. Em seguida, os valores sumarizados de τ são mostrados na Tabela 8.

Como tendência natural de análise, quanto maior a incerteza presente nos parâmetros do gasoduto, menor são os valores de τ obtidos. Esta diminuição é apresentada tanto para os resultados médios de τ , tanto quanto para o modelo adotando o RDU quanto o MAUT. Além disso, os valores médios e medianos para cada variação apresentam semelhança entre ambos, mostrando forte tendência central dos resultados analisados, fato este corroborado pela semelhança também pelos valores de moda.

No entanto, o desvio padrão das análises tende a aumentar quanto ao aumento de percentual de variação com o RDU e este fato parece não ter sido evidenciado no MAUT, cujos desvios-padrão são mais uniformes.

Tabela 7 - Resultados obtido no MRDU e MAUT para S8

Posição no Ranking	Ranking Original		Ranking com maior frequência obtido nas Simulações							
			MAUT				RDU			
	MAUT	RDU	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
2	6	6	7	4	4	1	6	4	2	2
3	7	7	4	7	8	7	4	6	4	4
4	4	4	2	2	2	6	7	7	6	6
5	8	2	6	3	3	3	8	2	7	7
6	2	8	8	6	6	4	2	8	8	8
7	3	3	3	8	7	8	3	5	3	3
8	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5
Total	-	-	130	58	33	22	1452	400	258	155

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 8 - Valores de τ obtidos nas simulações de S8

<i>Estatística Descritiva</i>	<i>RDU</i>				<i>MAUT</i>			
	var5%	var10%	var15%	var20%	var5%	var10%	var15%	var20%
Média	0,6880	0,5244	0,4326	0,3566	0,4519	0,2608	0,1901	0,1456
Erro padrão	0,0005	0,0006	0,0007	0,0007	0,0006	0,0008	0,0008	0,0008
Mediana	0,7143	0,5714	0,4286	0,3571	0,4286	0,2857	0,2143	0,1429
Modo	0,7143	0,5714	0,4286	0,3571	0,5000	0,2857	0,2143	0,1429
Desvio padrão	0,1437	0,1912	0,2100	0,2235	0,2033	0,2535	0,2649	0,2647
Variância da amostra	0,0207	0,0366	0,0441	0,0499	0,0413	0,0643	0,0702	0,0701
Curtose	0,0819	0,0322	-0,0614	-0,1188	-0,0613	-0,2158	-0,2693	-0,2468
Assimetria	-0,3834	-0,3356	-0,2556	-0,1942	-0,2841	-0,1838	-0,1197	-0,0841
Mínimo	-0,0714	-0,3571	-0,5000	-0,5714	-0,4286	-0,7143	-0,7857	-0,8571
Máximo	1	1	1	1	1	1	1	1
Contagem	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Nível de confiança da Estat. Desc. (95,0%)	0,0009	0,0012	0,0013	0,0014	0,0013	0,0016	0,0016	0,0016

Fonte: A Autora (2020).

Sabe-se que, quanto maior a variação das seções sofridas entre as seções de risco, menor será o valor de τ obtido. Para o aspecto positivo de análise destes parâmetros, ou seja τ^+ , significa que quanto mais próximo de 1, maior a correlação com o ranking original. Por outro lado, quanto mais próximo de zero, menor a correlação. Para a avaliação negativa τ^- dos valores de τ obtidos, tem-se que estes representam não só muita variação das seções de risco, como principalmente rankings invertidos que seriam o pior caso de análise, quando a perturbação dos parâmetros é tão grande, que recomendaria uma prioridade de seções exatamente oposta àquela obtida inicialmente, para o caso em que τ é igual a -1.

Neste sentido, pode-se analisar o nível de perturbação das seções ao longo do ranking. A variação de 5% para o RDU mostrou valores τ mínimo negativo, porém muito próximo a zero (-0,0714). No entanto, para variações de 10%, 15% e 20%, valores negativos mais acentuados foram encontrados para o RDU.

Quando avaliados os valores mínimos obtidos para o MAUT, todos os percentuais analisados apresentaram valores τ^- sendo estes em piores resultados quando comparados ao mesmo nível de variação com o RDU. Ainda cabe salientar, que o valor mínimo obtido na variação de 5% no MAUT é ainda inferior ao valor mínimo de τ encontrado para o percentual de 10%, indicando assim uma primeira suposição de maior robustez quando comparados os resultados obtidos por RDU e MAUT. Para testar esta hipótese, demais avaliações são

necessárias. Neste sentido, faz-se necessário identificar o comportamento destes parâmetros a partir de testes estatísticos.

Para valores de postos em um ranking maiores ou iguais a 8, os valores de τ fazem correspondência ao valor de z da distribuição normal padrão (ver análise completa em [30]). Sendo assim, fez-se esta equivalência dos valores de τ para obter o valor de z e consequente p-valor associado ao grau de significância desta análise, cujos resultados são mostrados na Tabela 9.

De acordo com estes resultados, é verificado que o Grau de significância do valor médio de τ é de cerca de 99,14% para variação de 5% no RDU, mostrando resultados muito robustos. Com isto, pode ser entendido que o ranking original é de fato uma recomendação segura ao decisor. Além disso, conforme avaliações feitas em [30], foram consideradas que valores médios de τ com grau de significância superiores a 90% poderiam ser considerados robustos quanto a recomendação ao decisor, reduzindo a variação das seções ao longo do ranking. Sendo assim, as variações de 10% e 15% no RDU também são consideradas robustas, com grau de significância de 96,54% e 0,9330% respectivamente. O valor médio de τ para variação de 20% merece destaque pois este fica muito próximo de ser classificada como robusta (0,8916).

Por outro lado, os valores de τ resultantes de variações do MAUT se mostraram mais sensíveis quanto aqueles comparados aos valores de RDU. Apenas a variação de 5% mostrou-se robusta, mas ainda assim com grau de significância (94,15%) inferior àqueles obtidos nas variações menores ou iguais a 10% no RDU, apontando mais uma evidência de que os valores obtidos por este último tendem a ser mais robustos. Além disso, valores iguais ou superiores a 10% de variação produziram uma maior sensibilidade, com graus de significância na ordem de 82%, 75% 70%.

Tabela 9 - Grau de Significância para os Valores médios de τ de S8

Estatística do Teste	RDU				MAUT			
	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
z	2,3835	1,8166	1,4985	1,2352	2,3835	0,9036	0,6587	0,5045
p-valor	0,0086	0,0346	0,0670	0,1084	0,0086	0,1831	0,2550	0,3069

Fonte: A Autora (2020).

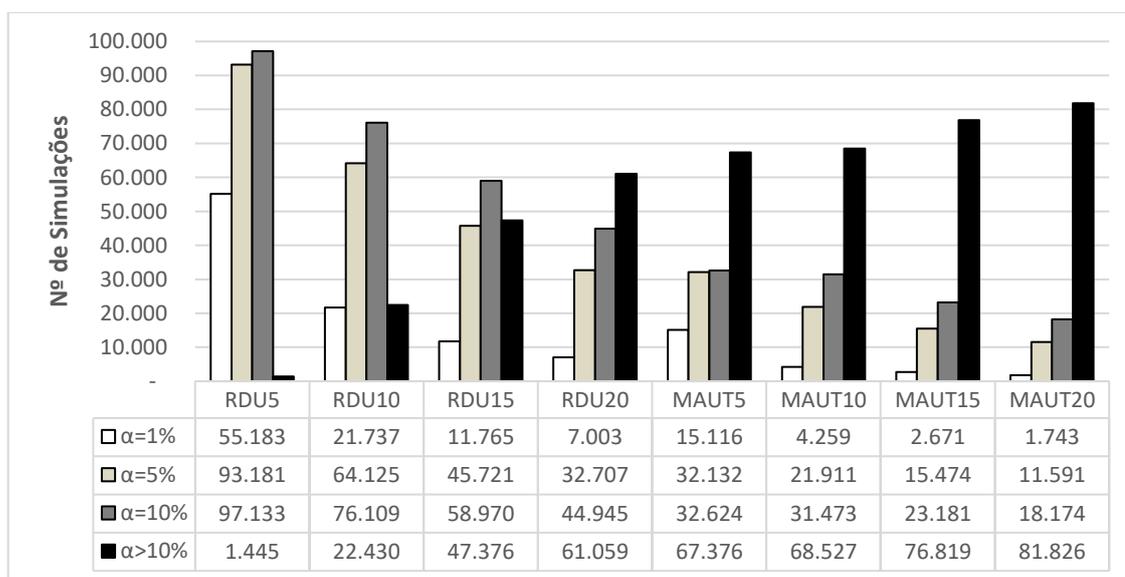
A fim de identificar de forma quantitativa o número de simulações que rejeitam H_0 , mostrando que há de fato correlação entre os valores simulados e o ranking original, de maneira robusta, estes valores são apresentados na Figura 15. Os resultados foram divididos

em graus de confiança geralmente utilizados na literatura, sendo eles 99%, 95% e 90%. Das 100.000 simulações de cada percentual de variação, contou-se o número de simulações que seriam consideradas robustas. Uma vez que as simulações que rejeitam H_0 para $p\text{-valor} \leq 0,1$, rejeitam também para $p\text{-valor} \leq 0,05$ e para $p\text{-valor} \leq 0,01$, fez-se necessário mostrar também o número de simulações exclusivas nestes intervalos. Sendo assim, o número de simulações que rejeitam H_0 para $p \leq 0,05$ incluem aqueles para $p \leq 0,01$ e, portanto, o intervalo $1\% < p \leq 5\%$ pode ser facilmente obtido pela subtração entre o limite superior e inferior. De maneira análoga, obtém-se o intervalo $5\% < p \leq 10\%$.

De posse destes resultados, verifica-se que cerca de 97,13% das simulações são robustas para var5% no RDU, sendo aproximadamente 93% do total de simulações, rejeitadas ao nível de significância de $\alpha \leq 0,05$. Estes resultados demonstram em números absolutos o que foi mostrado anteriormente com relação aos valores de τ médios. Ainda com respeito aos resultados obtidos no RDU, cerca de 76% e 59% e 39% das simulações foram consideradas robustas para var10% e 15% e 20% respectivamente.

Com relação ao Número absoluto de simulações robustas obtidas pela análise de risco considerando o MAUT, este é bem menor quando comparado com os respectivos valores obtidos pelo RDU. Cerca de 32,6% do total de simulações foram consideradas robustas para var5%, seguidas de 31,5%, 23,2% e 18,2%. Além disso, o maior número de simulações rejeitadas encontram-se no intervalo de $1\% < p \leq 5\%$ para ambos RDU e MAUT, embora em números absolutos estes valores sejam discrepantes quando comparados entre si.

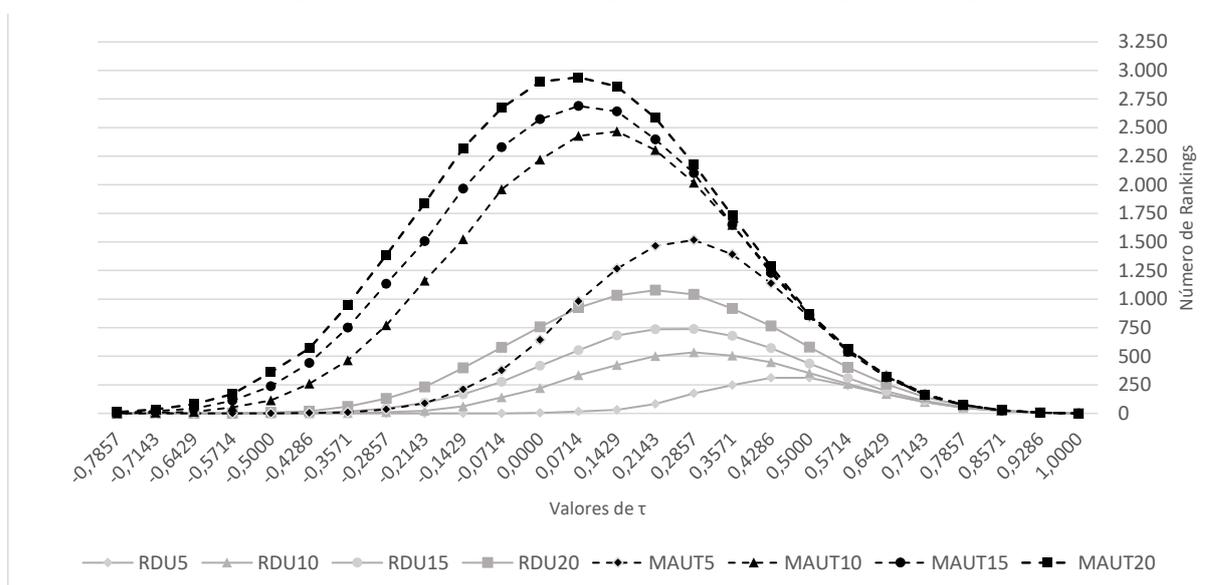
Figura 15 - Número de Simulações que rejeitam H_0 para S8



Fonte: A Autora (2020).

Ainda com relação aos valores de τ obtidos, é importante salientar que, por se tratar de um método estatístico que mede o grau de correlação entre dados ordenados, diferentes rankings podem obter o mesmo valor de τ . Sendo assim, estes significam a razão entre o número efetivo que ocorreu, somando os seus scores em ordem natural (com relação ao ranking original) e subtraindo aqueles em ordem não natural. Sendo assim, é ainda importante verificar se para um mesmo percentual de variação, RDU e MAUT produzem diferentes rankings para um mesmo valor de τ . Os dados obtidos são sumarizados na Figura 16. Para Obtenção destes dados, comparou-se todos os valores de τ obtidos nas 8x100.000 simulações feitas. Removeu-se os valores duplicados de τ e em seguida obtiveram-se os resultados do eixo X.

Figura 16 - Número de Rankings Exclusivos obtidos para cada τ para S8



Fonte: A Autora (2020).

Antes de iniciar as comparações, é preciso fazer uma observação quanto a relação de τ e o número de rankings obtidos. O valor de τ igual a 1 só pode, por definição, produzir apenas um único ranking, sendo este igual ao original. Para valores altos de τ , ou seja, próximos a 1, um número restrito de mudanças nas seções é necessário para obter tais valores. Sendo assim, para estes, um número limitado de variação entre as seções ao longo do ranking também é limitada. Por exemplo, se uma seção que ocupava a primeira posição no ranking original passar a ocupar a última, certamente reduziria bastante o seu total efetivo e, portanto, o score que daria origem ao valor de τ correspondente. Logo, para altos valores de τ , é mais provável que além de se obterem poucas variações entre as seções, estas devem ocorrer preferencialmente em postos adjacentes ou muito próximos entre si. Por outro lado, valores de

τ próximos a -1, geram perturbações extremas no que diz respeito à ordem das seções, tendendo a inverter a ordem natural, sendo os primeiros no ranking original, os últimos no resultado da simulação. Além disso, o segundo melhor no original, tende a ser o penúltimo no simulado, o terceiro passa a ser o antepenúltimo e assim sucessivamente. Os valores medianos (localizado no meio e não em termos estatísticos) de um ranking tendem a permanecer quase os mesmos para valores próximos de -1. Dito isto, o foco de análise está principalmente na verificação se há influência principalmente para valores medianos de τ .

Esta análise é iniciada pela avaliação dos valores extremos de τ . Foi visto que as simulações advindas dos resultados obtidos pelo RDU até então são mais robustos do que aqueles provenientes do MAUT. Sendo assim, como mostrado na Tabela 8 anteriormente, os valores de τ são maiores para o RDU do que o MAUT e por este motivo, as comparações no nível mais baixo não podem ser realizadas para todos os percentuais de variação.

Dos 26 valores diferentes de τ encontrados e apresentados na Figura 16, verifica-se acentuada diferença entre o número de rankings distintos para cada valor de τ obtido quando comparados MAUT e RDU. Foram tomados os valores médios de rankings exclusivos para (var5; var10; var15; var20), nesta ordem para o MAUT (428,27; 871,35; 992,5; 1111,15) e RDU (67,92; 159,69; 234,92; 362,08).

Para $\tau \geq 0,7143$, não são observadas mudanças significativas entre o número de rankings distintos obtidos para todas as variações para RDU e MAUT. É válido ainda ressaltar que não diferir entre os valores absolutos significa dizer que apresentam praticamente os mesmos rankings, dentro claro, das possibilidades de mudança de postos a fim de resultar nos mesmos valores de τ .

Para $0 \leq \tau \leq 0,6429$ maiores diferenças entre as variações de RDU são percebidas entre si. Por possuírem faixa de valores mínimos de τ superiores aos do MAUT, para $\tau \leq 0$, há grande diferença do número de rankings exclusivos entre RDU e MAUT principalmente para var10, var15 e var20.

Já para os valores obtidos no MAUT, para valores e $\tau \geq 0,3571$, não parece haver grandes diferenças entre o número de rankings gerados para todos os percentuais de variação. Esta mudança fica mais evidente para $-0,2142 \leq \tau \leq 0,2857$, apontando maior diferença para os valores obtidos entre var5% e os demais percentuais de variação e pouca variação entre var10%, var15% e var20%. Por último, valores inferiores a 0,28571, apontam maiores diferenças para var15% e var20% com relação a var10%, porém, como var5% não apresenta valores de τ que tendem a inverter o ranking da simulação, estes não podem ser comparados.

Por fim, comparando-se para um dado valor de τ e percentual de variação equivalente para RDU e MAUT, verificou-se que, para valores de τ inferiores a 0,7857 evidencia-se grande diferença entre eles. A partir disso, um nível de informação adicional sobre a robustez dos resultados é realizado, pois, além de ser mais robusto com relação aos valores de τ médios, um mesmo valor de τ produz menos rankings diferentes no RDU quando comparado aos resultados equivalentes no MAUT. Além disso, os valores totais absolutos apontam que var5% para RDU e MAUT parecem reduzir significativamente o número de rankings exclusivos. Isso demonstra que as incertezas geradas em torno de 5% produzem não só uma menor perturbação das seções no que diz respeito a análise estatística de sua semelhança com o ranking original, como também produz menos rankings a serem avaliados.

Até esta etapa do trabalho foram consideradas medidas matemáticas para avaliação da robustez dos resultados no que tange aos valores de correlação obtidos ao longo das simulações. Acrescenta-se então um outro aspecto importante a ser considerado nesta análise, referindo-se a razão das diferenças. Ao final da primeira análise de modelagem matemática dos riscos, quer seja por MAUT ou por RDU, as seções são priorizadas com relação ao risco e esta medida de contribuição da utilidade é executada para comparar a contribuição em que uma seção melhor ranqueada possui com relação a outras duas seções seguintes. Com isto, é mostrado em [25] que esta informação norteia as decisões referentes a mitigação de riscos pelo fato de mostrar a distância que as alternativas de ação possuem entre si. Esta avaliação é possível pois ambos são medidas de utilidade, cuja escala intervalar fornece o quanto se ganha ao passar de uma alternativa para outra. Portanto, valores maiores de razão das diferenças entre as seções significa que elas contribuem globalmente mais para a mitigação dos riscos quando comparada às seções seguintes.

Cabe salientar que a razão das diferenças depende diretamente das seções hierarquizadas e, portanto, visto que ela é calculada com relação as seções umas às outras, diferentes rankings produzem diferentes razões de diferenças. Posto isso e tomando como informação anterior de que um mesmo valor de τ pode produzir diferentes rankings, não é possível garantir que para um dado valor de τ , conhece-se a razão das diferenças entre as seções do gasoduto.

5.4.2 Análises de S12

Um gasoduto hipotético contendo 12 seções foi escolhido para ser explanado aqui devido a suas características mais uniformes e robustas de resultados quando submetido a

variações globais de seus parâmetros quando primeiramente analisado os riscos utilizando o MAUT. Além disso, busca-se verificar se o número crescente de seções pode interferir de maneira significativa nos resultados finais, uma vez que poderia possuir mais postos a serem ordenados e portanto maiores comparações necessitam ser semelhantes a fim de obter um alto grau de correlação entre a simulação e o valor original do ranking.

Para garantir isonomia nas comparações da seção seguinte, serão conduzidas as mesmas análises realizadas para S8. Sendo assim, foram calculados os valores de risco mediante modelo matemático considerando MAUT e o RDU e em seguida ordenadas as seções do maior ao menor risco, mostrados na Tabela 10. Nesta tabela também são mostrados o ranking de maior frequência para cada percentual de variação simulado.

Tabela 10 - Resultados obtido no MRDU e MAUT para S12

Posição no Ranking	Ranking Original		Ranking com maior frequência obtido nas Simulações								
	MAUT	RDU	MAUT				RDU				
			5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	
1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
3	11	9	11	11	11	11	9	9	9	9	9
4	9	8	9	9	9	9	8	8	8	8	8
5	8	12	8	8	8	8	12	12	12	12	12
6	12	11	12	12	12	12	11	11	11	11	11
7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9	3	10	3	3	10	3	10	10	10	10	10
10	2	3	10	10	3	10	3	3	3	3	3
11	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: A Autora (2020).

Como os valores de τ de Kendall norteiam a inferência quanto a robustez dos resultados de hierarquização das seções em relação ao risco, a análise destes parâmetros é apresentada inicialmente na Tabela 11.

De maneira contrária a base anterior, os valores de τ médios obtidos para MAUT são muito bons, demonstrando uma boa correlação, em média, com o ranking original. Além disso, não apresentou valores de τ mínimo no domínio τ^- , não gerando, portanto, inversões de ordem. Os valores obtidos de média, moda e mediana são equivalentes entre si para os diferentes percentuais de variação. Além disso, apresentou baixo desvio padrão para todas as

variações e mostrou-se ser uma base robusta apesar de um número maior de divisão de seções avaliados no gasoduto.

Tabela 11 - Valores de T obtidos nas simulações de S12

Estatística Descritiva	RDU				MAUT			
	var5%	var10%	var15%	var20%	var5%	var10%	var15%	var20%
Média	0,9958	0,9884	0,9796	0,9689	0,8364	0,7505	0,7217	0,7064
Erro padrão	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003
Mediana	1,0000	1,0000	0,9697	0,9697	0,8485	0,7576	0,7273	0,6970
Modo	1,0000	1,0000	1,0000	0,9697	0,8485	0,7576	0,7273	0,6970
Desvio padrão	0,0105	0,0163	0,0212	0,0257	0,0626	0,0920	0,0988	0,0990
Variância da amostra	0,0001	0,0003	0,0005	0,0007	0,0039	0,0085	0,0098	0,0098
Curtose	2,3751	0,0247	-0,1126	-0,0686	-0,3269	-0,2112	-0,2877	-0,1874
Assimetria	-2,0851	-1,0086	-0,7016	-0,5400	-0,0612	-0,1134	-0,1130	-0,1274
Mínimo	0,9394	0,9091	0,8485	0,8182	0,6061	0,3636	0,3636	0,2727
Máximo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Contagem	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Nível de confiança (95,0%)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0004	0,0006	0,0006	0,0006

Fonte: A Autora (2020).

Para o RDU, os valores médios de τ são ainda mais elevados quando comparados ao mesmo nível de variação global dos parâmetros do modelo com relação ao MAUT. Além disso, apresentou valores de mediana e moda iguais a 1 para var5% e var10%, além de valores iguais de mediana 0,9697 para var15% e var20%. Os baixos valores obtidos de desvios padrão indicam concentração dos dados simulados em torno dos valores médios.

Para comparação dos valores de τ obtidos e definido o grau de confiança para os dados, faz-se necessário usar a estatística de teste aproximando os valores de τ médio obtidos para definir o valor de z da normal padrão e então estimar o p-valor correspondente, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Grau de Significância para os Valores médios de T de S12

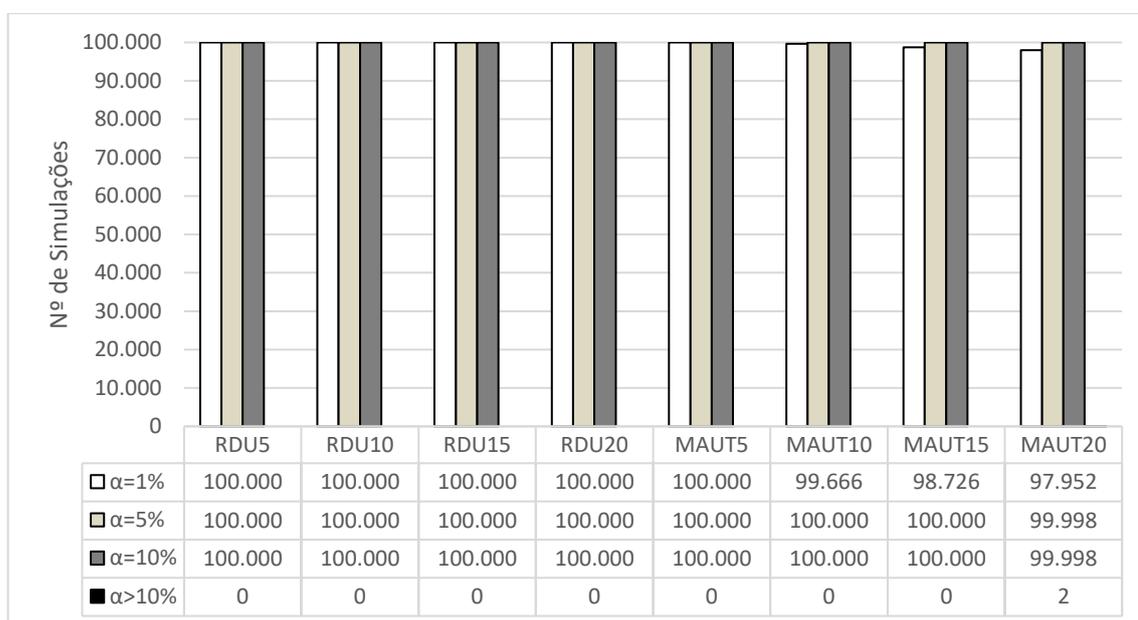
Estatística do Teste	RDU				MAUT			
	var5%	var10%	var15%	var20%	var5%	var10%	var15%	var20%
z	4,5066	4,4733	4,4334	4,3849	3,7856	3,3967	3,2662	3,1970
p-valor	3,29E-06	3,85E-06	4,64E-06	5,8E-06	7,67E-05	0,0003	0,0005	0,0007

Fonte: A Autora (2020).

Os valores de p-valor na Tabela 12 indicam alto grau de correlação para as simulações tanto para a abordagem de riscos multidimensionais usando o MAUT quanto a usando a RDU. Comparando a probabilidade p encontrada com o valor de α de 0,1, como feito na comparação de S8, seguindo o trabalho de [30], conclui-se que as variações simuladas produzem robustez nos resultados das hierarquizações de risco das seções do gasoduto. No entanto, é válido ressaltar, que mesmo sendo robusta considerando tanto a *EU* e *Non-EU*, os resultados obtidos no RDU são mais robustos quando comparados com o MAUT.

Embora haja rejeição da hipótese nula para $\alpha=0,01$ para os valores médios de τ , faz-se necessário observar quantas simulações de fato correspondem a esta estatística, cujos valores sumarizados são mostrados na Figura 17. Nela pode-se observar que 100% das simulações são rejeitadas ao nível de confiança de 99% para as variações dos parâmetros no RDU. Para MAUT, apenas 0,334% das simulações não rejeitaram H_0 para $\alpha=0,01$ em var10%, 1,27% e para 2,05% para o intervalo $1\% < p \leq 5\%$ em var15% e 20% respectivamente. Além de que apenas 2 simulações em var20% obtiveram p-valor acima de 0,1.

Figura 17 - Número de Simulações que rejeitam H_0 para S12

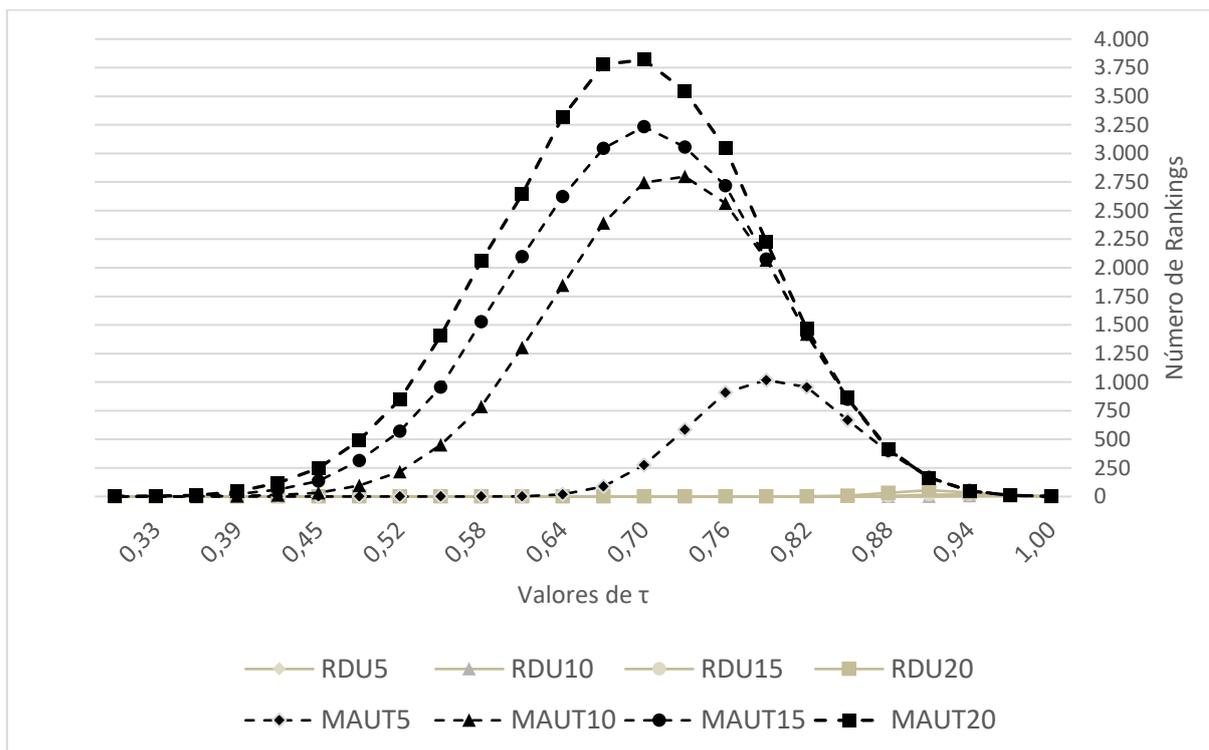


Fonte: A Autora (2020).

A análise de τ é então continuada com a verificação do número de rankings distintos para os diferentes valores de τ obtidos nas simulações, conforme mostrado na Figura 18. Assim como mencionado na seção anterior para os valores de S8 obtidos, quanto menor os valores de τ obtidos, menor o número de mudanças possíveis entre seções adjacentes para garantir este grau de correlação. Além de produzir mais simulações com maior grau de

confiança no RDU em comparação o MAUT (Figura 18), o número de ordenações para um mesmo nível de τ é consideravelmente menor para o RDU com relação o MAUT, como pode ser observado para um dado $\tau=0,8788$ tomado como exemplo, cujos montantes produzidos pelo MAUT são cerca de 11 vezes menores.

Figura 18 - Número de Rankings Exclusivos obtidos para cada τ para S12



Fonte: A Autora (2020).

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir serão realizadas comparações entre os resultados obtidos para S12 e S8, considerando RDU e MAUT, fazendo cruzamento de dados. Para geração de informação pertinente a tomada de decisão, além de verificar a contribuição de cada uma das abordagens matemáticas para avaliação de riscos, serão conduzidas análises gráficas para visualização de dados, baseando os resultados em dados estatísticos.

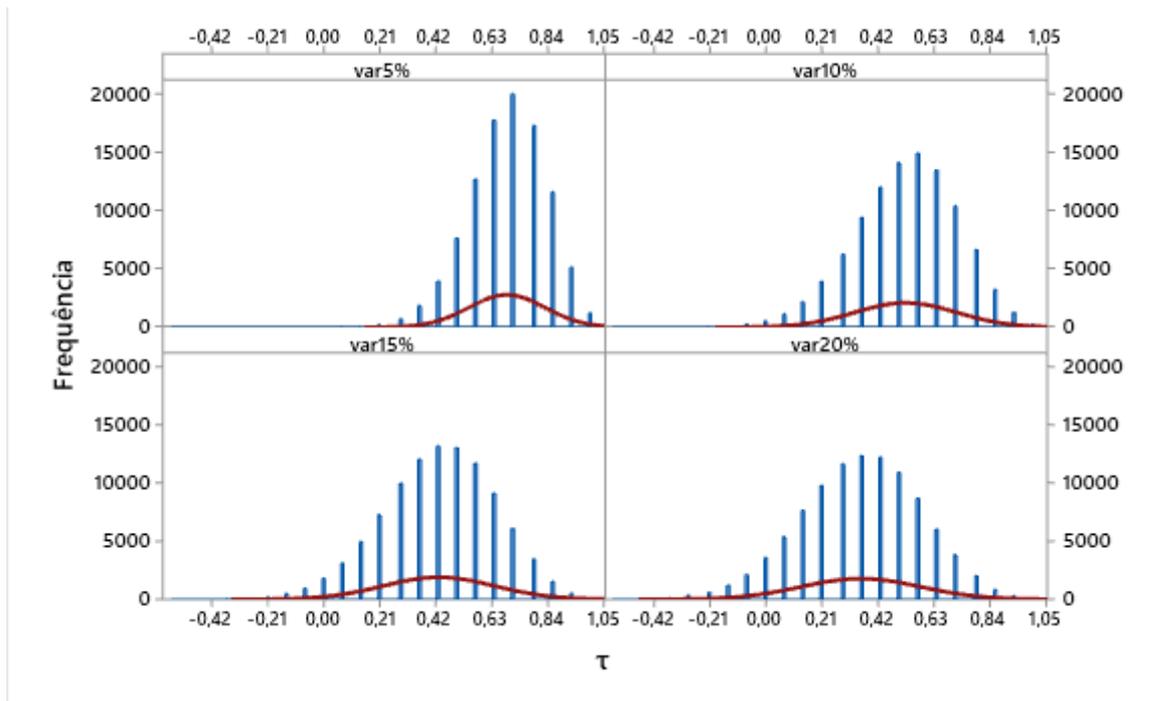
5.5.1 Geração de Informação para S8

A partir dos valores de τ obtidos nas simulações e sumarizados nas seções anteriores, busca-se nortear a decisão e o entendimento sobre robustez ou sensibilidade dos modelos, com o auxílio de inferências estatísticas.

Primeiramente, os valores de τ são distribuídos em um histograma. A estatística do teste τ de Kendall pode ser aproximada para valores normais padronizados para número de postos maiores ou iguais a 8. Vale ressaltar que os histogramas foram plotados considerando as mesmas faixas de valores para todos os percentuais de variação de maneira que pudessem ser analisados visualmente e comparados quanto a concentração dos valores de τ para os diferentes níveis de incerteza. Os resultados quanto a posição mais à direita ou à esquerda não poderia ser confundida com assimetria severa à direita ou à esquerda. Raciocínio similar pode ser considerado para as avaliações seguintes.

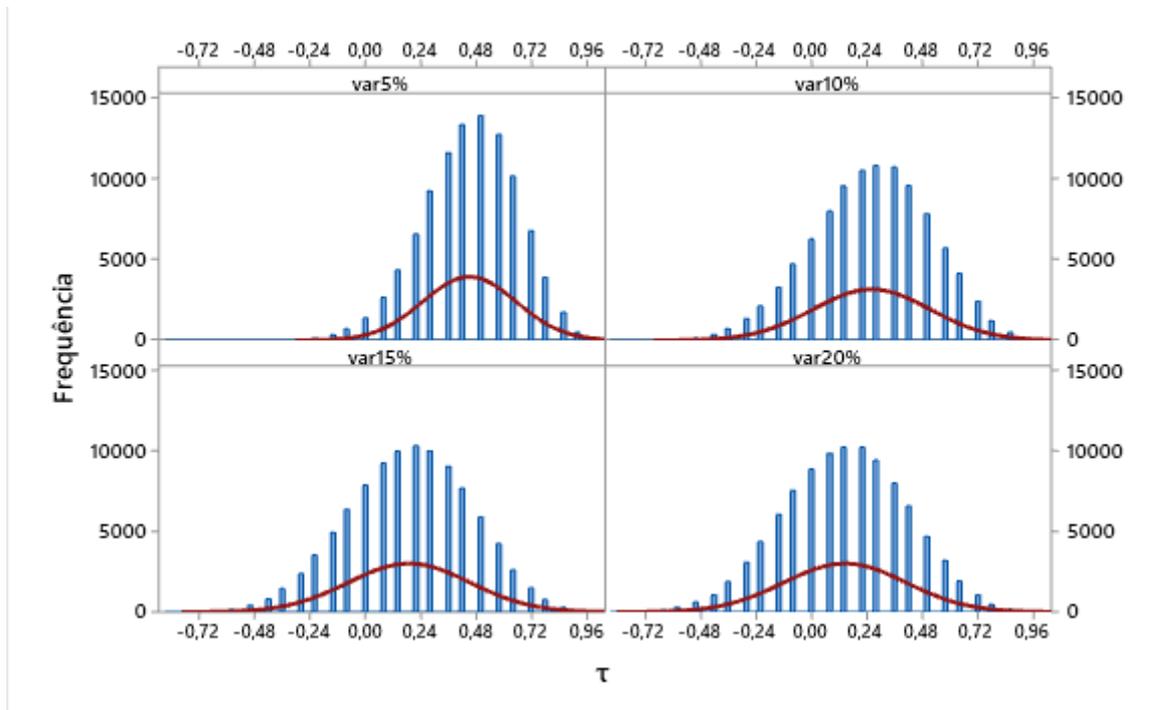
O histograma do RDU (Figura 19) mostra leves assimetrias a esquerda, principalmente quando comparados o MAUT (Figura 20). Isso se deve principalmente pelo fato de haver pouca frequência de dados nas classes que representam principalmente os valores negativos de τ , indicando maior correlação, conforme discutido anteriormente. A aproximação normal fica mais comprometida no ajuste de curva para os dados referentes ao RDU, por possuir menos classes aliada a alta frequência para as classes em torno da moda. A maior diferença desta medida de tendência central com relação a média é vista principalmente para var15% e 20%. As curvas plotadas em vermelho demonstram aproximação normal com valores médios e desvios padrão estabelecidos na parte descritiva dos dados.

Figura 19 - Histograma de τ Obtidos para S8 com abordagem RDU

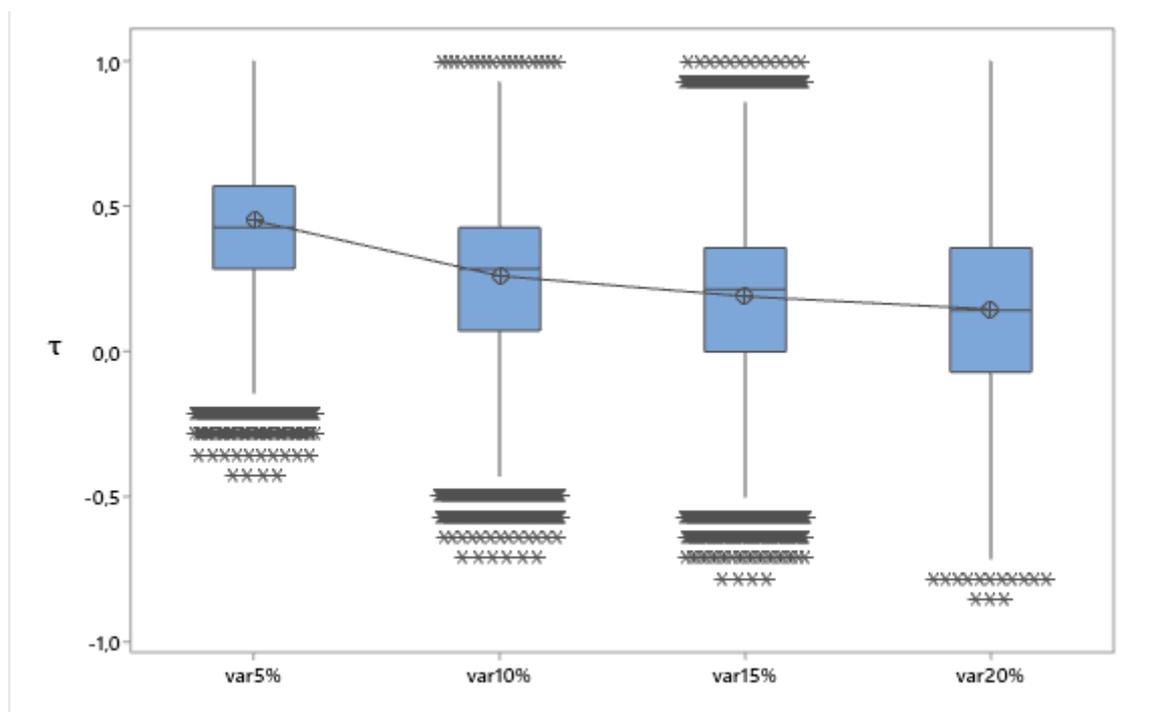


Fonte: A Autora (2020).

Figura 20 - Histograma de τ Obtidos para S8 com abordagem MAUT



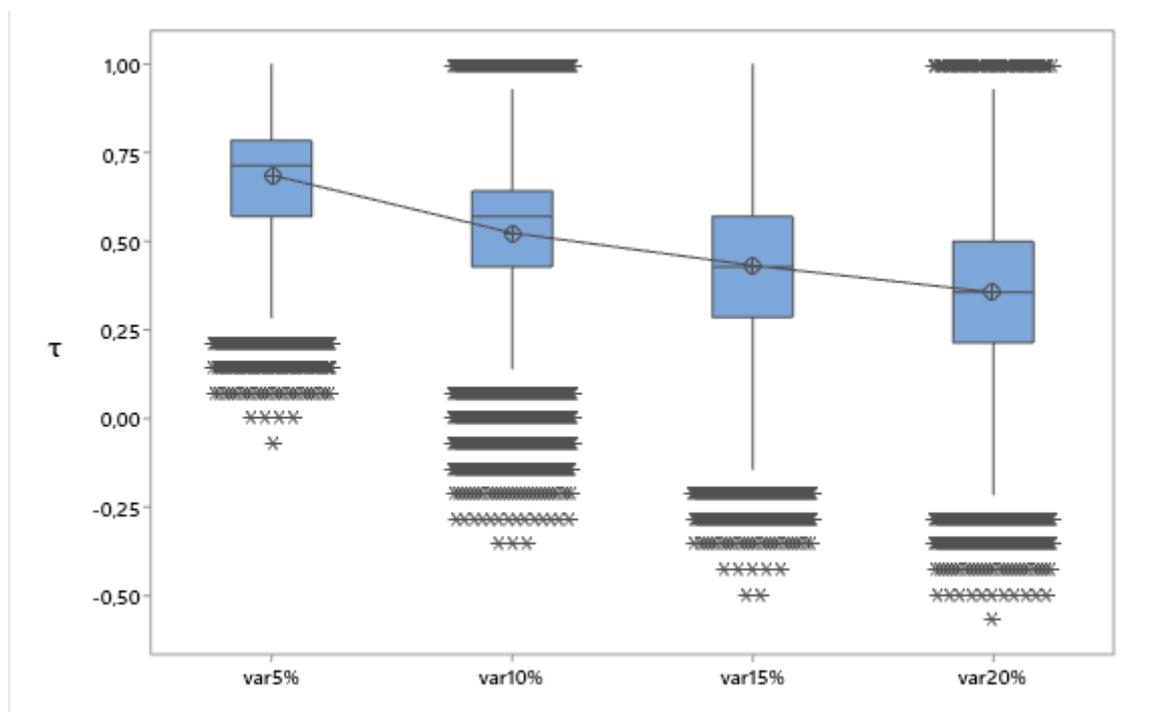
Fonte: A Autora (2020).

Figura 21 - Box Plot dos valores de τ para S8 obtidos no MAUT

Fonte: A Autora (2020).

Nesta etapa de análise, os resultados obtidos são plotados em gráficos box plot, separados para cada abordagem de riscos avaliada. Há a presença de descendência de valores médios e medianos obtidos nos gráficos referentes ao MAUT (Figura 21), sendo evidenciada pelo declive das linhas que conectam os valores médios dos gráficos. Estas diferenças são mais acentuadas no entre var10% e var15% no RDU (Figura 22) e com relação a var5% para var10% no MAUT (Figura 21).

No entanto, as duas abordagens de risco apresentam semelhança entre os valores médios e medianos dentro de um mesmo nível de incerteza avaliada, demonstrando forte tendência central. Além disso, o intervalo interquartil corrobora a tendência central dos dados evidenciando o intervalo em que concentra 50% das simulações. Vale salientar que as medidas encontradas em um gráfico box-plot são medidas estimadas e os valores calculados podem não existir na realidade. Portanto, considerando que os valores de τ são calculados especificamente para a quantidade de postos no ranking, os valores de zoneamento de quartis pode não coincidir com um valor real que tal possa assumir.

Figura 22 - Box Plot dos valores de τ para S8 obtidos no RDU

Fonte: A Autora (2020).

Informações adicionais sobre os valores discrepantes ou outliers são evidenciados nestes gráficos. Para níveis de τ inferiores a -0,5 na Figura 21, com var10% e var15% mostram ser discrepantes, aumentando o detalhamento de informação sobre a robustez dos resultados. Uma vez visto que estes valores negativos tendem a produzir ordenações inversas com relação ao ranking original, uma maior robustez dos dados é evidenciada considerando que estas tratam ser outliers. No entanto, para var20%, muitas simulações indicam inversão de ordem e, portanto, consideradas com um maior nível de sensibilidade nessa faixa de variação global dos parâmetros do modelo.

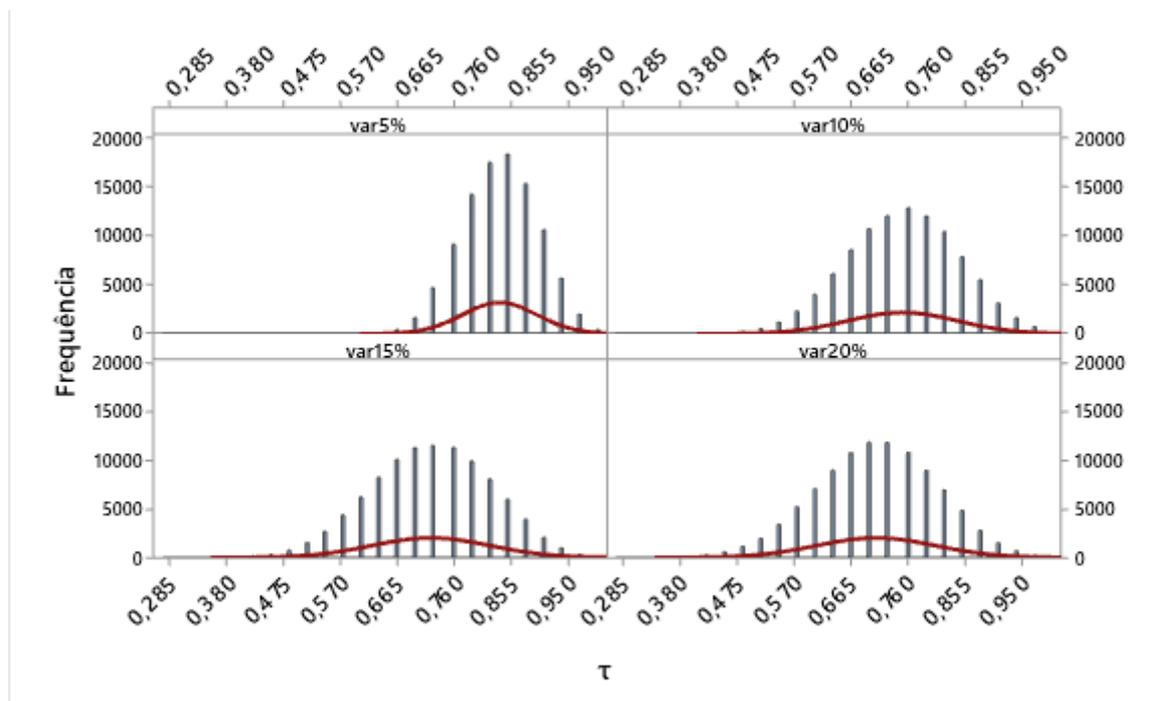
Apesar de apresentar valores $\tau < 0$ (Figura 22), para var5% e var10%, todos estes são considerados outliers aumentando o nível de correlação com o ranking original, indicando que uma variação de até 10% nos valores globais do modelo de riscos considerando RDU produz valores positivos de τ . Além disso, valores de τ inferiores a -0,25 são considerados outliers para var15% e var20%.

5.5.2 Geração de informação sobre S12

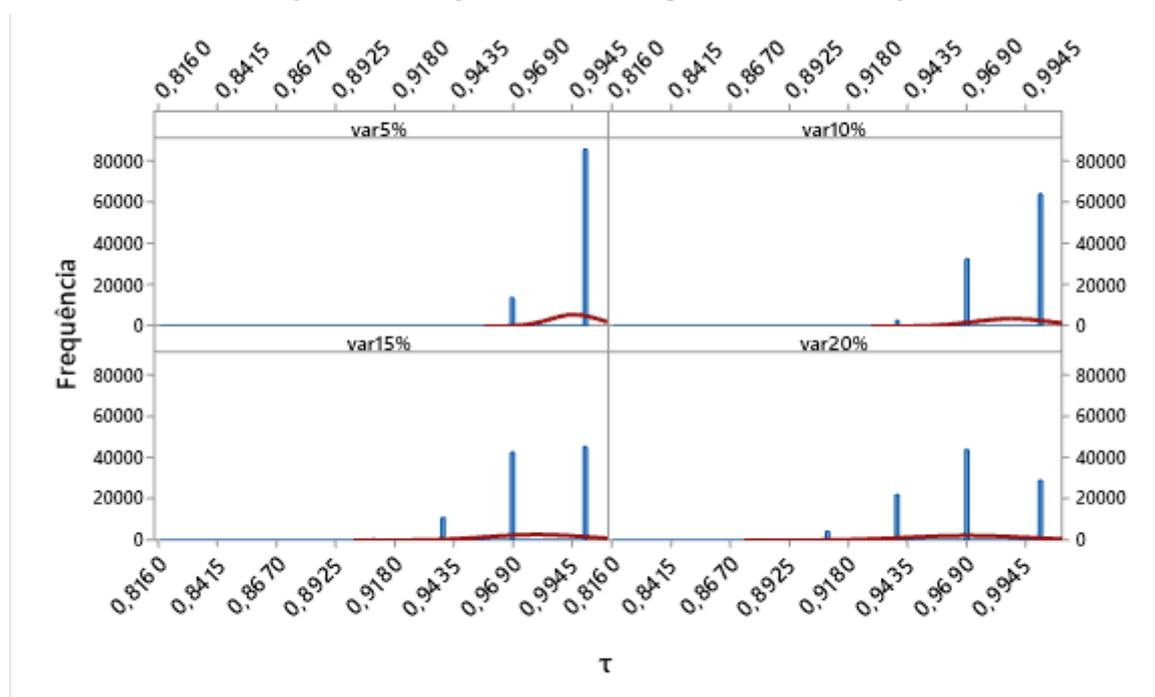
Seguindo os passos das análises realizadas para S8, inicia-se a análise gráfica pela plotagem dos histogramas para os diferentes percentuais de variação. Os resultados obtidos para o MAUT na Figura 23 mostra o desvios-padrão semelhantes referentes às simulações de var10%, var15% e var20%.

Uma diferença acentuada na obtenção dos valores de τ é verificada para var5%, com menor desvio padrão e maior frequência dos resultados em torno dos valores médios de τ . A forte correlação produzida pela abordagem RDU (Figura 24) para S12 reduziu significativamente o número de classes para a obtenção dos histogramas. No entanto, uma distribuição normal é aproximada para estes valores para p-valor menor ou igual a 0,01. A estimativa para var5% mostrou-se bastante robusta fornecendo simulações praticamente idênticas àquela obtida originalmente.

Figura 23 - Histograma de τ Obtidos para S12 com abordagem MAUT



Fonte: A Autora (2020).

Figura 24 - Histograma de τ Obtidos para S12 com abordagem RDU

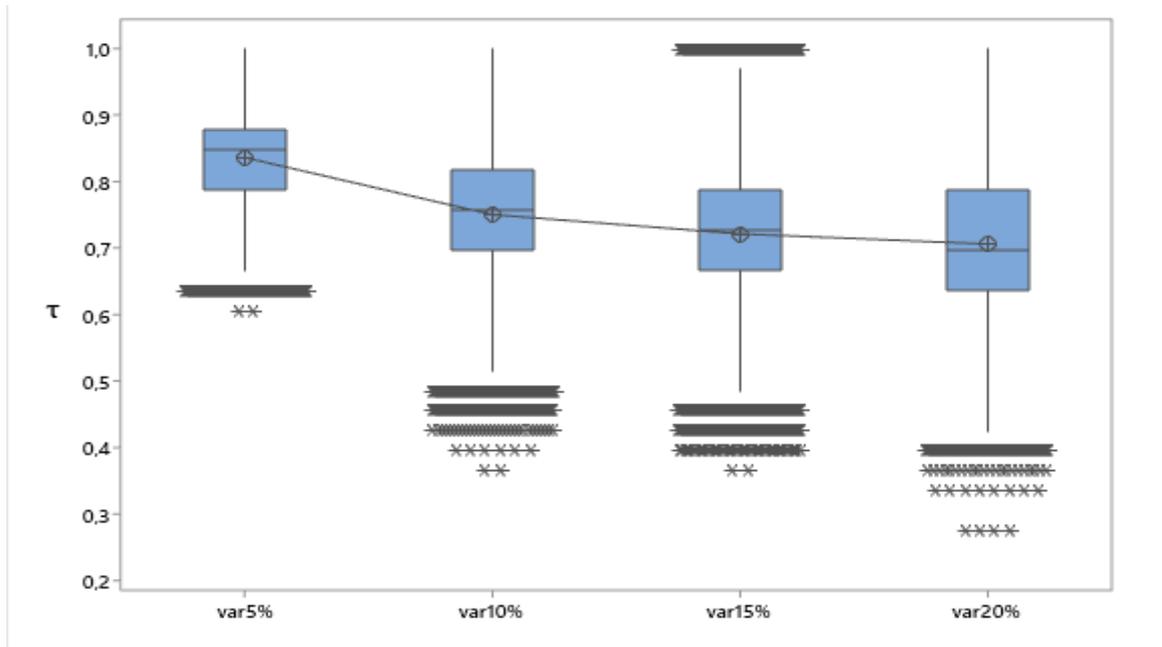
Fonte: A Autora (2020).

Após análise da distribuição dos resultados em histogramas, prossegue-se com a análise dos valores de τ por meio de gráficos boxplot a fim de identificar valores discrepantes para a análise. Sendo assim, a Figura 25 e a Figura 26 são apresentadas na sequência, correspondendo aos resultados obtidos para MAUT e RDU respectivamente.

Os níveis de incerteza var10% e var15% apresentados para o MAUT (Figura 25) apontam valores de τ em torno de 0,5 como discrepantes. Observa-se ainda que var15% indica que as simulações que obtiveram a mesma ordem das seções daquela obtida no original, são consideradas como outliers, apesar de igual percepção não ser obtida para var20%. Sendo assim, para melhor análise dos resultados do ranking obtidos para var15%, simulações com valores de τ entre 0,4 a 0,5 devem ser considerados na análise final, verificando mais detalhadamente quais seriam as seções de risco prioritárias para estes rankings.

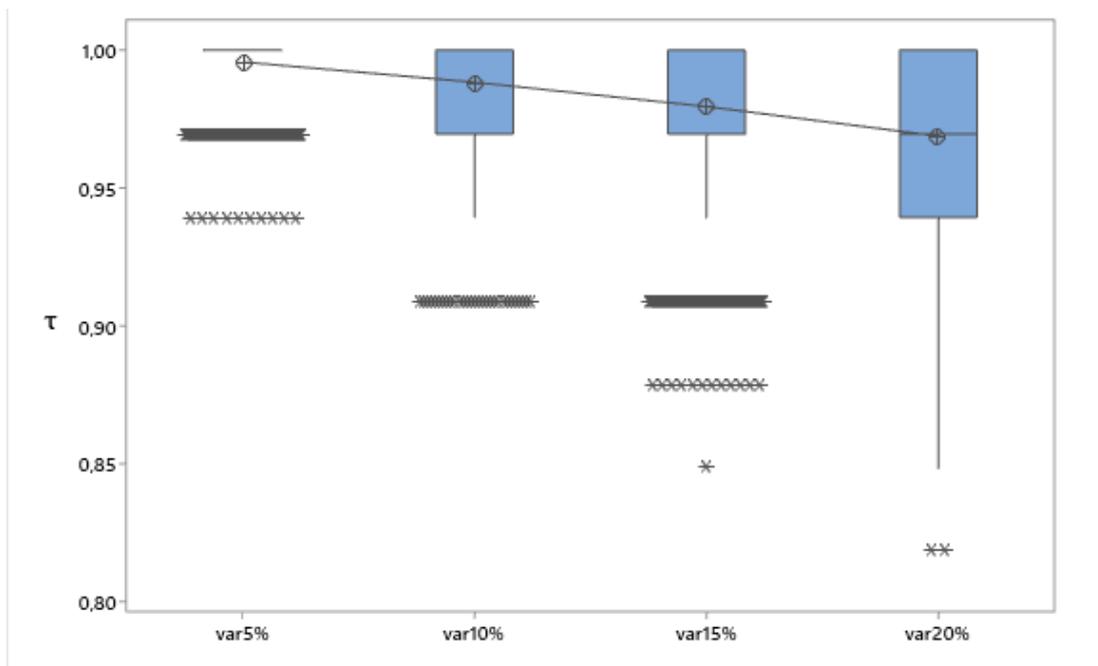
Avaliações adicionais sobre quais seções de risco devem ser priorizadas em detrimento umas das outras devem ser conduzidas sempre que os resultados demonstrarem sensibilidades nos resultados, ou ainda quando valores discrepantes são obtidos na análise estatística, principalmente quando sua ocorrência pode ser verificada na prática. Este é um exemplo da possível interferência na análise final da priorização das seções, por não se tratar apenas de 1 outlier, mas de uma frequência maior de vezes para esta faixa de valores de τ .

Figura 25 - Box Plot dos valores de τ para S12 obtidos no MAUT



Fonte: A Autora (2020).

Figura 26 - Box Plot dos valores de τ para S12 obtidos no RDU



Fonte: A Autora (2020).

Os resultados do RDU Figura 26 demonstram menor dispersão dos resultados quando comparados com o mesmo nível de incerteza aplicado ao modelo do MAUT. Além disso, observa-se que o intervalo interquartil é menor pra todos os percentuais de variação

destacando-se var5% para RDU, no qual praticamente todas as simulações são semelhantes ao ranking original, demonstrando que os demais valores diferentes de 1 correspondem a valores discrepantes.

Para não reduzir a informação fornecida por estes valores de τ , os diferentes (mas semelhantes) ranking devem ser considerados na análise final de priorização das seções torando estes dados significativos na avaliação de mudanças das seções entre postos adjacentes. Estes resultados devem ser analisados e devem ser considerados para a priorização dos riscos, como uma geração de informação ao decisor. Recomenda-se para os casos de var10% e var15% que se observem em sua totalidade as diferentes ordenações obtidas, ou com valores de τ pelo menos superiores a 0,8, uma vez que são valores significativos quanto a inferência sobre correlação entre os rankings.

5.5.3 Inferências sobre os resultados a partir das comparações obtidos por meio de MAUT e RDU

Primeiramente destaca-se que não é possível comparar diretamente os rankings obtidos pelo MAUT e RDU pois são aspectos distintos de avaliação.

No MAUT é considerado o cálculo de riscos unidimensionais em cada dimensão de risco considerando o valor da estimação de suas pela soma consequências dadas pela função mediante utilidade relacionada a perda da seção. Para estimação do risco final, após multiplicação dos riscos individuais em cada critério por suas respectivas constantes de escala, é acrescida a consequência de normalidade ponderada por sua probabilidade, ou seja, acrescido um valor muito próximo de -1, geralmente, conforme ((3-1)).

No RDU, o cenário de Normalidade, bem como as probabilidades dos cenários de ocorrência são ponderados por uma função ponderação $w(p)$, cuja forma depende da avaliação prévia de um decisor (4-3). Ao final deste processo, tem-se o valor de risco para um critério particular, cujo somatório ponderado pelas constantes de escala resultarão no valor de risco global (4-8).

Dito isto, como são consideradas estruturas distintas de estabelecimento de riscos individuais, embora tenham como base as mesmas funções consequência e probabilidades de ocorrência, é esperado que a recomendação inicial da ordenação das seções em prioridade de risco seja distinta para o MAUT e RDU. Sendo assim, não é possível afirmar, a priori, que o resultado sugerido pelo emprego do RDU é melhor do que a do MAUT ou vice-versa. Este trabalho não tem esta pretensão e tão pouco possui dados suficientes para isto. Seria

necessário primeiro fazer uma aplicação prática e confrontar bases de dados reais de acidentes de gasodutos para comparação.

No entanto, como mostrado nas seções iniciais deste trabalho, quando o problema de decisão combina utilidade, não homogeneidade nas probabilidades de ocorrência das consequências de análise ou ainda baixas e ou altas consequências, há comprovações na literatura relacionada sobre efeitos de desvios da linearidade da utilidade, bem como alteração dos resultados por eles gerados. Isso posto, não serão comparados os resultados das ordenações das abordagens RDU e MAUT para S8 e S12 diretamente, mas mostradas as vantagens identificadas em cada uma.

Os resultados apresentados para ambos os GGN simulados apresentam recomendação inicial ao decisor distinta para MAUT e RDU para ambos S8 e S12. Apesar de apresentarem as primeiras e últimas posições dos rankings iguais (mesmas seções nestas posições) para ambas as abordagens nos GGN apresentados neste trabalho, não é possível garantir a extensão desses resultados para outros gasodutos. No entanto, é possível analisar por meio do nível de incerteza dos parâmetros o grau de correlação das recomendações por meio de τ .

Os resultados de sensibilidade dos parâmetros do modelo para MAUT [30] indicaram diferentes recomendações ao decisor, para diferentes níveis de incertezas, sendo esta recomendação diferente daquela inicialmente fornecida pelo ranking original. Sendo assim, semelhante análise é conduzida para os resultados obtidos quando da condução da abordagem do RDU. Portanto, os valores médios de τ podem ser utilizados para quantificar as diferenças encontradas nos resultados de MAUT e RDU, uma vez que estes são obtidos com base na comparação do ranking original e das respectivas simulações dos resultados obtidos para cada método em cada GGN. Uma vez obtidos os valores de τ para cada método em diferentes percentuais de variação dos parâmetros do modelo de riscos, tem-se uma métrica obtida na mesma escala para ambos, tornando possível a comparação dos seus valores de tendência central, bem como a dispersão destes.

Com base em τ , é possível inferir sobre a robustez das priorizações das seções para ambos os modelos de maneira que: quanto menor a dispersão de τ , menor o número de diferentes rankings das seções obtidos; quanto mais próximo de 1, a recomendação inicial (ranking original) ao decisor tem maior assertividade com a recomendação final (inferida a partir das simulações); quanto mais próximo de -1, pior é a recomendação; a comparação com os quartis podem indicar valores discrepantes.

Ainda com relação aos valores de τ obtidos, comenta-se que estes dependem, além da mudança da ordem das seções, do número de postos possíveis a serem ordenados. Deste

modo, há para S8, $8!$ ($=40.320$) de ordens possíveis, considerando que não há empates, ou seja, são obtidas ordens completas, cujo número de posições no ranking é igual ao número de seções do gasoduto a ser priorizado com relação a estimação dos riscos. Para S12, existe um número máximo possível de $12!$ ($= 479.001.600$) diferentes ordenações. Além disso, ambas não produzem os mesmos valores teóricos de tal, a exceção de $-1,0$ e 1 que correspondem a qualquer análise de correlação entre dois rankings. Sendo assim, apenas faixas de valores e valores médios poderiam ser comparados, uma vez que estas medidas têm a mesma suposição de análise. Quanto mais próximo de 1 , maior a correlação com o ranking comparado, quanto mais próximo de -1 , maior a inversão de ordem e quanto mais próximo de zero e, conseqüentemente, menor a correlação entre eles. Conclui-se então que é mais assertivo manter as comparações dos valores de τ apenas para a mesma origem de número de postos de ordenação.

É válido acrescentar que os diferentes valores de τ obtidos no S12 com relação a S8 são provenientes de variações e incertezas de seus parâmetros serem menos significativas na alteração das seções e não necessariamente pelo número de postos de S12. É possível fazer esta afirmação, pois espera-se que, quanto maior a faixa de alterações de um posto ao longo do ranking, mais postos uma seção pode assumir ($12! > 8!$). Sendo assim, a análise para o número de rankings obtidos para um mesmo valor de τ só pode ser comparado entre a mesma base simulada, ou seja, comparações entre os resultados obtidos para as modelagens usando MAUT e RDU para S12 e MAUT e RDU para S8 separadamente.

Contudo, a análise de razão das diferenças fez-se necessária para o entendimento sobre a contribuição da abordagem da *Non-EU* tanto para uma base robusta, como altos valores médios de τ , como para bases mais sensíveis como o caso de S8 analisada. Busca-se com isso, verificar se há maior homogeneidade entre as contribuições das posições de risco ao longo do ranking. Desta maneira, por se tratar da mesma métrica que avalia a contribuição em utilidade de seções adjacentes, estas podem ser comparados os valores RDU e MAUT.

Por fim, as comparações quanto aos resultados obtidos são mostrados considerando a razão das diferenças dada por (4-13). São realizadas, por exemplo, informação sobre o quanto se ganha ao se priorizar a primeira posição do ranking, comparando sua diferença com a segunda posição, em relação a diferença entre a segunda e terceira posição. Esta comparação é sempre realizada entre uma dada posição do ranking e as duas posições seguintes. Em decorrência disto, só é possível obter este nível de informação até a antepenúltima posição do ranking. Em outras palavras, se N representar o número de postos ou seções do gasoduto a serem ordenadas, $N-2$ razão das diferenças é obtida a título de comparação de ganhos. Por

definição, esta é obtida pela diferença de utilidade entre seções vizinhas ordenadas e consequentemente seus valores dependem da estimação de riscos totais obtidos no modelo. Logo, para diferentes rankings, diferentes valores de razão das diferenças é encontrada.

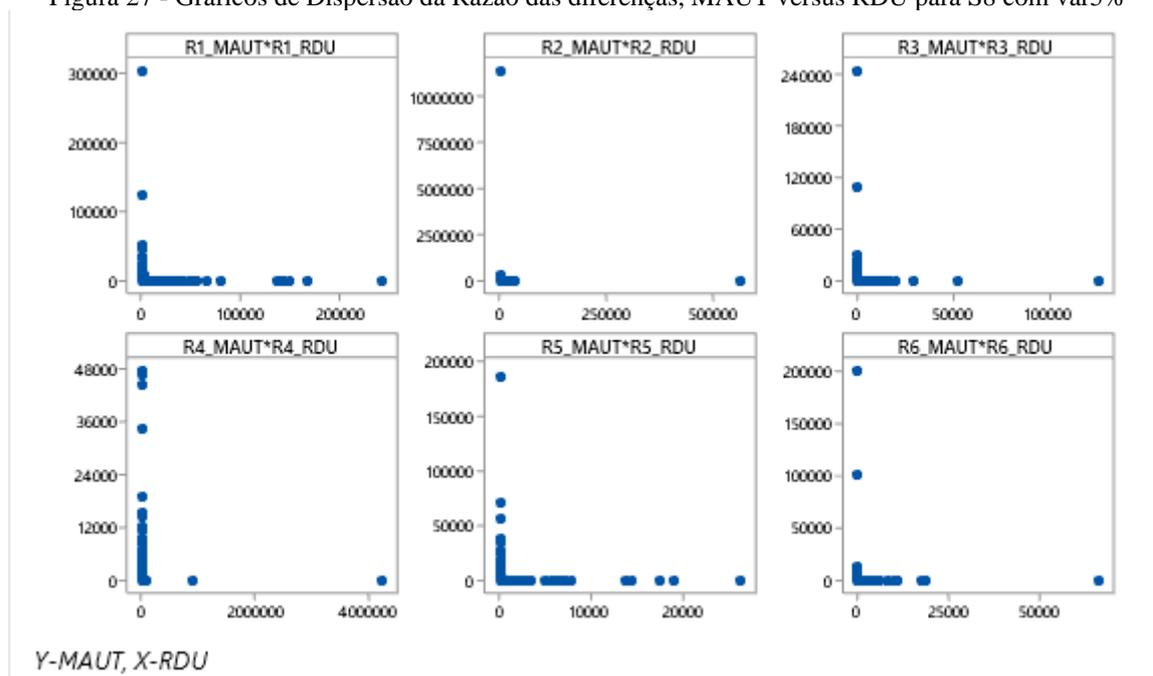
Além do exposto anteriormente, para um mesmo valor de τ denotando correlação entre o valor simulado e o original, diferentes posições de ranking podem convergir para um dado nível de τ . Em outras palavras, se 100.000 simulações são estabelecidas para avaliar determinado grau de incerteza, poderá haver até 100.000 diferentes razões de diferenças, pois estes dependem dos valores de risco estimados. Sendo assim, não é possível comparar diretamente os valores obtidos da razão das diferenças a fim de encontrar similaridades nos resultados. Além disso, a razão das diferenças depende não somente da seção a qual deseja estabelecer a estimativa, mas de quais são as seções seguintes de comparação.

Diante disso, há uma dificuldade de tratar os resultados obtidos de razão das diferenças a partir de métodos estatísticos que denotem grau de associação, diferença de médias ou ainda de proporções. No entanto, análises gráficas de Dispersão das razões das diferenças obtidas para os percentuais de variação dos parâmetros usada nas simulações, indicam uma possibilidade de avaliação deste parâmetro derivado da utilidade. Busca-se com isso, encontrar subsídio para estimar sobre a robustez dos resultados encontrados. Na sequência serão apresentados os resultados de S8 e S12.

Para S8, são obtidas $N-2$ razões das diferenças, sendo o Gráfico de “R1_MAUTxR1_RDU” na Figura 27, referente aos valores obtidos para MAUT, no eixo Y e RDU no eixo X do gráfico. R_i então representa a razão das diferenças para uma posição do ranking, obtidas por (4-13).

Como os eixos X e Y podem alterar-se pois determinam os valores mínimos e máximos que uma razão das diferenças podem assumir, é necessário avaliá-los cuidadosamente e tomando como base apenas a R_i , sem comparar com os demais. A partir da Figura 27 verifica-se que o RDU tende a apresentar uma menor contribuição máxima de R_i com relação ao MAUT, com exceção de R_4 . No entanto, esta discrepância de MAUT com relação aos resultados do RDU não são observados na Figura 28 para var10%.

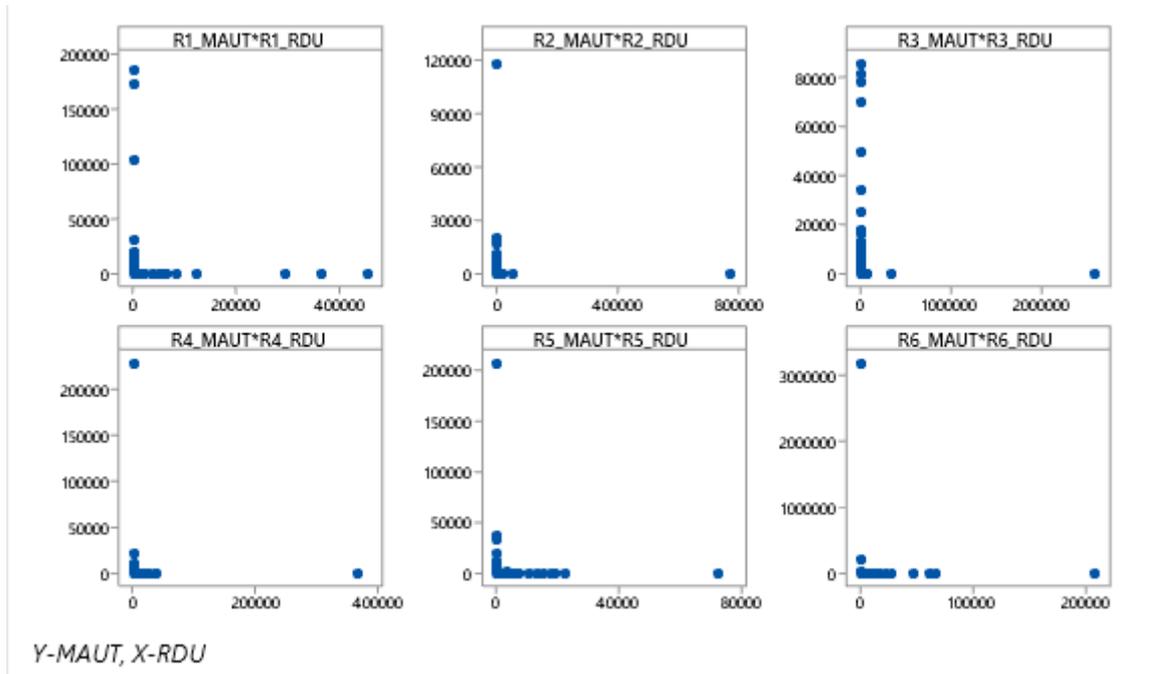
Figura 27 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var5%



Fonte: A Autora (2020).

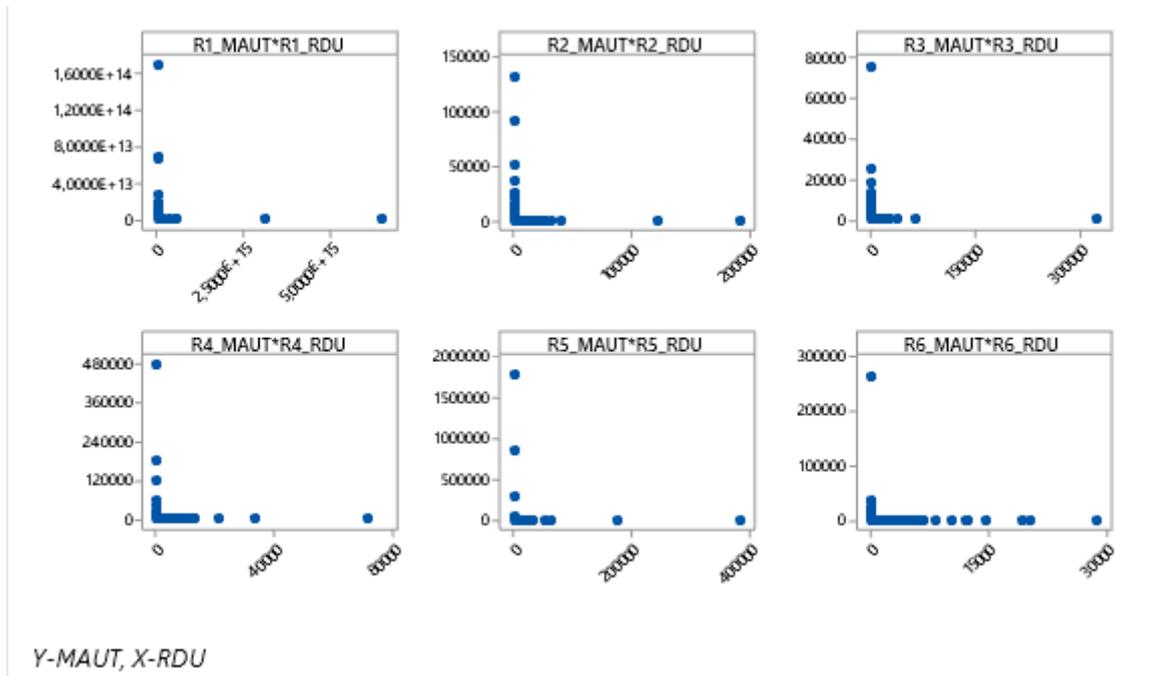
O MAUT evidencia uma maior contribuição das primeiras seções priorizadas do gasoduto com relação as demais, com valores as vezes exorbitantes de razão as diferenças para R_1 , principalmente na Figura 29, e para R_1 a R_3 na Figura 30. Esta avaliação traz à luz uma informação não obtida apenas com a avaliação dos valores obtidos de τ . A partir da razão das diferenças, pode-se observar as diferentes contribuições das posições dos rankings para ambos os métodos. Uma hipótese a ser considerada para obtenção dessas diferenças é que a distância existente entre as posições dos rankings é reduzida com a ponderação das probabilidades. Sendo assim, seções com consequências intermediárias, por exemplo, podem ser sub-ponderadas ou super-ponderadas, reduzindo o seu valor de risco associado, ou aumentando-o, respectivamente. Há, no entanto, uma maior dificuldade de estabelecer esta relação para primeiras razões das diferenças na Figura 28, para o MAUT e RDU var10%, considerando que muitas vezes mostraram valores mais bem distribuídos para ambos os métodos.

Figura 28 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var10%



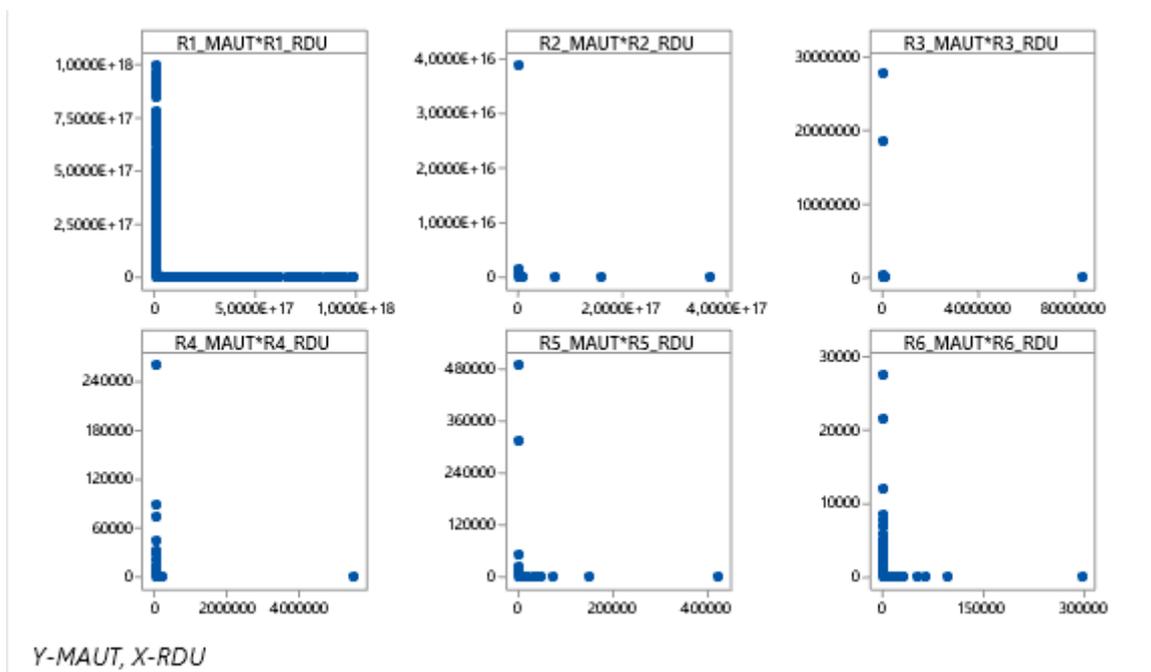
Fonte: A Autora (2020).

Figura 29 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var15%



Fonte: A Autora (2020).

Figura 30 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S8 com var20%



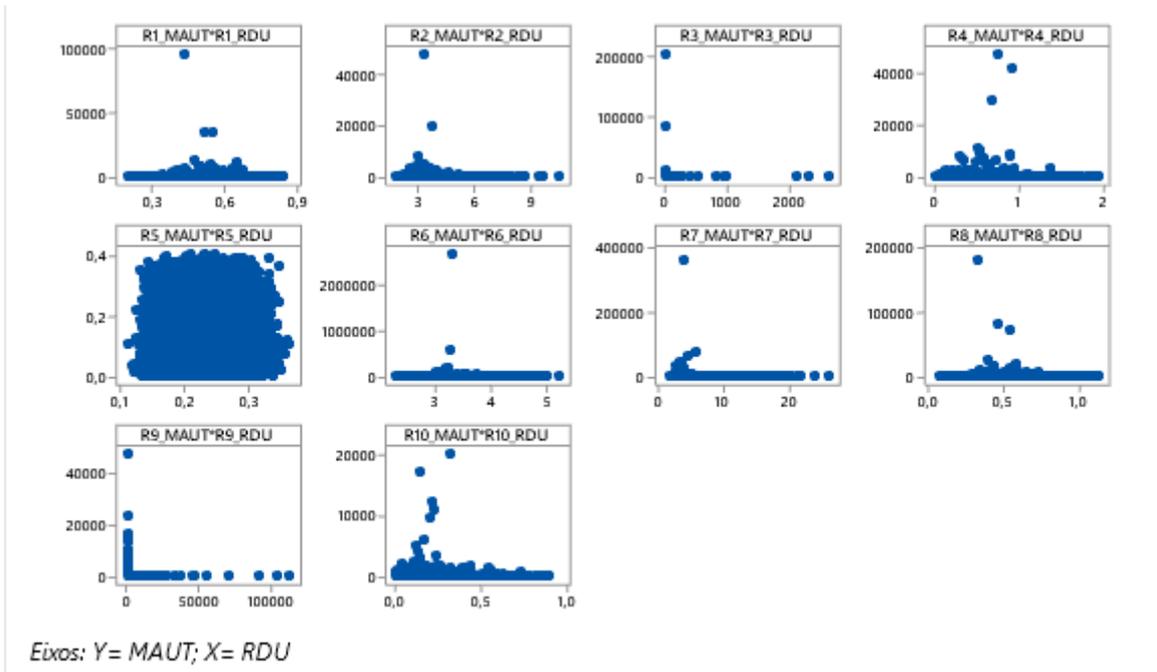
Fonte: A Autora (2020).

A análise da razão das diferenças é então conduzida para S12, a fim de extrair informações adicionais sobre os resultados. Para este gasoduto hipotético, 12 seções de risco são hierarquizadas quanto a sua prioridade e, portanto $N-2=10$ razões das diferenças estabelecidas.

A Figura 31 apresenta valores discrepantes de razão das diferenças entre MAUT e RDU. O primeiro produziu uma maior razão das diferenças entre as seções de risco para todos os R_i com exceção de R_5 cujos resultados são equivalentes entre si. Em nenhum dos casos de var5% os valores de razão das diferenças foi maior em relação aos obtidos pelo MAUT. Pode ser interpretado que as seções que ocuparam a quinta posição do ranking para ambos os métodos contribuí pouco para a diferença de riscos entre as seções.

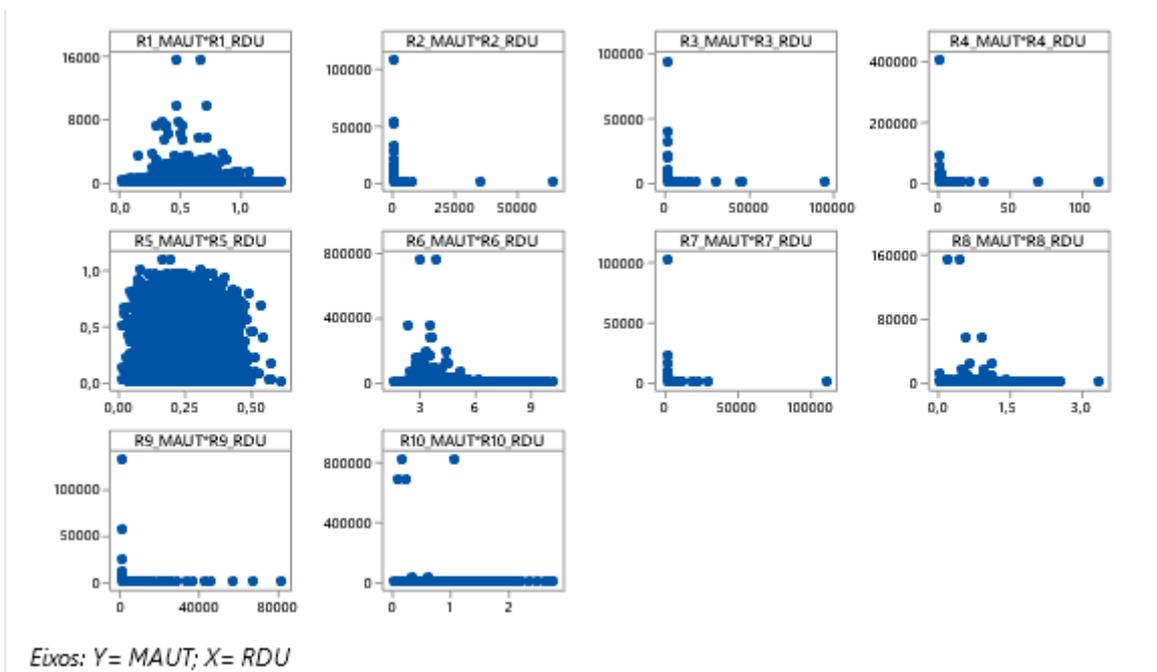
A análise var10% para S12 apresentada na Figura 32 mostra discrepância nas razões encontradas entre MAUT e RDU para $R_1, R_2, R_3, R_4, R_6, R_7, R_8$ e R_{10} , sendo os valores obtidos pelo MAUT, maiores do que os de RDU. R_5 aponta ser uma posição de pouca contribuição com relação as demais, indicando que esta pode ser uma das posições que mais sofrem alterações (ver APENDICE A).

Figura 31 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var5%



Fonte: A Autora (2020).

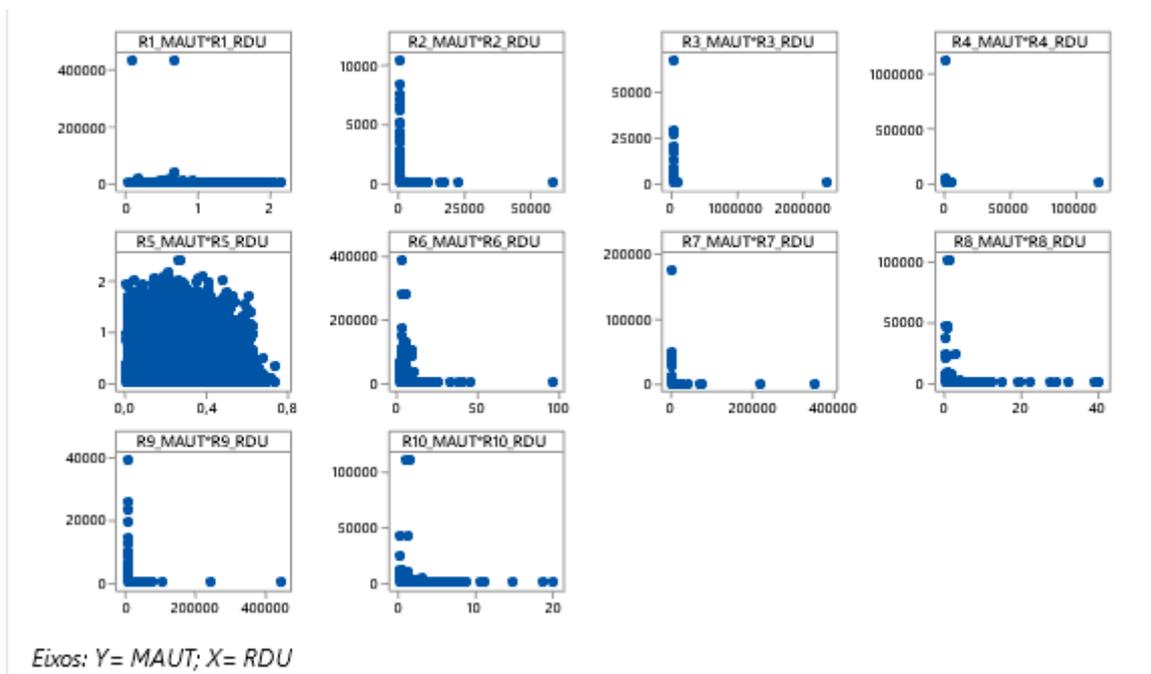
Figura 32 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var10%



Fonte: A Autora (2020).

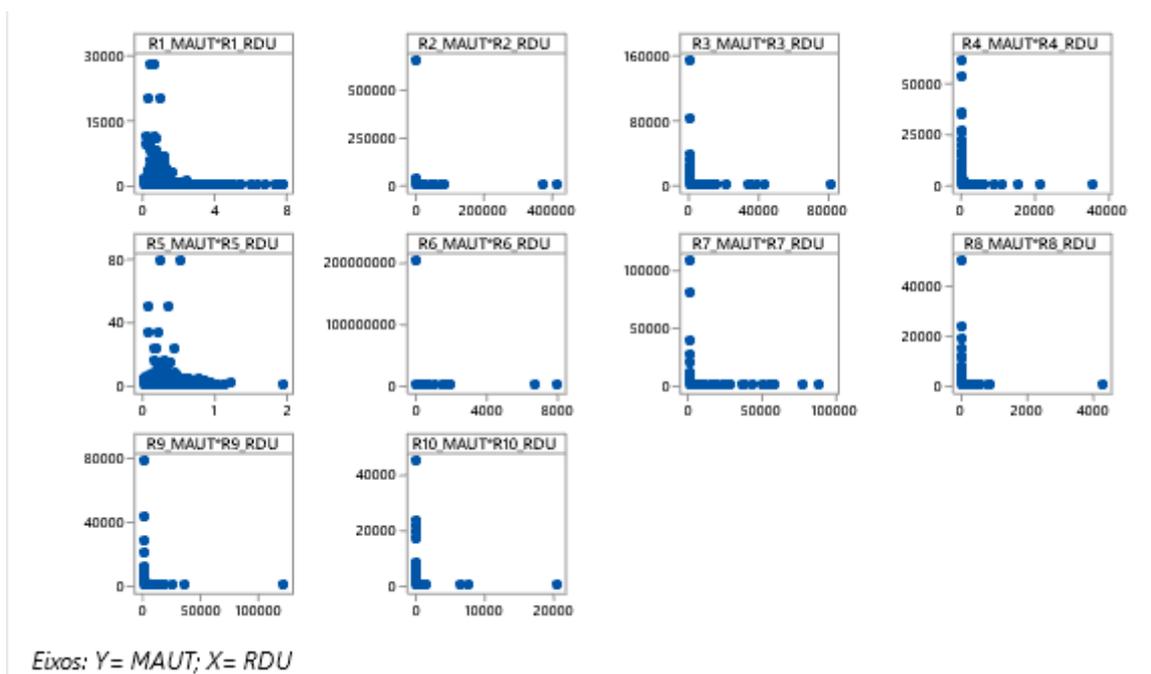
À medida que o grau de incerteza é aumentado, RDU e MAUT fornecem valores de razão das diferenças mais próximos entre si, podendo até mesmo apresentar valores maiores de razão das diferenças para o primeiro, como nos casos de R_2, R_3, R_7 e R_9 na Figura 33 para var15% e de R_9 na Figura 34 para var20%.

Figura 33 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var15%



Fonte: A Autora (2020).

Figura 34 - Gráficos de Dispersão da Razão das diferenças, MAUT versus RDU para S12 com var20%



Fonte: A Autora (2020).

Com estes resultados, verifica-se que o aumento das incertezas não é suficiente para determinar uma maior diferença de contribuição de uma seção de risco sobre a outra, a exemplo de var15% de S12 que houve valores maiores de razão das diferenças para RDU do que para MAUT.

A análise da razão das diferenças depende diretamente dos valores de riscos associados às seções juntamente com sua posição no ranking. Não há previsibilidade quanto a estes resultados, mesmo para bases robustas como S12. No entanto, observa-se para os casos em que RDU ultrapassa valores máximos de MAUT obtidos na razão das diferenças, estes produzem uma grandeza menor de diferença entre eles. No caso contrário, quando MAUT apresenta máximos maiores do que RDU, esta diferença é aumentada drasticamente para a maioria dos casos simulados. A magnitude desta grandeza não pode ser estimada com veracidade global, ou seja, para todos os gasodutos a serem analisados por estes métodos, uma vez que depende diretamente dos valores de risco e da posição do ranking. Além disso, não é possível comparar S12 com S8 quanto a este aspecto.

Como *insight* sobre a análise deste parâmetro associado aos valores de τ obtidos nas análises, estima-se que de maneira geral, o RDU, responsável por utilizar a ponderação das probabilidades considerando a ordem das consequências da maior para menor, é capaz de reduzir as diferenças de risco estimadas para as seções, produzindo uma maior semelhança com o ranking originalmente estabelecido, além de torna-lo menos suscetíveis a variações de suas seções ao longo do ranking para diferentes graus de incerteza.

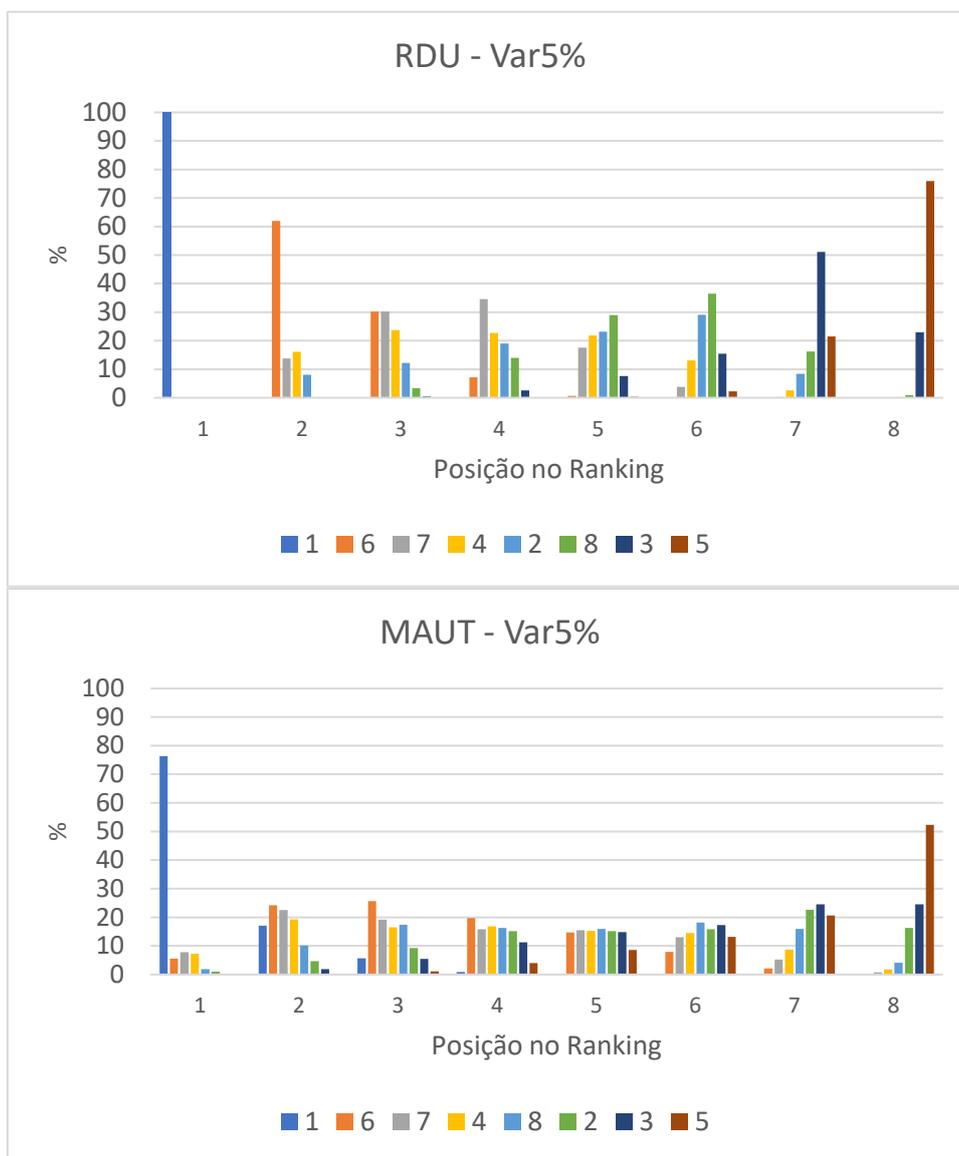
5.5.4 Recomendações finais

Verificadas as contribuições de análise de riscos multidimensionais em GGN utilizando a abordagem da *Non-EU* apresentadas nas seções anteriores, é conduzida avaliação gráfica da variação das seções de maneira a contribuir para a priorização das seções de risco.

As seções 5.5.1 e 5.5.2 conduziram comparações dos resultados mediante valores de τ , sendo conhecido o seu grau de significância. A seguir serão apresentados os gráficos obtidos para as var5% no RDU e MAUT. Visando a verificação das recomendações para os diferentes graus de incerteza, o pode ser consultado.

A Figura 35 apresenta os rankings obtidos para S8. Dela verifica-se que a primeira e última posição do ranking estão bem definidas, tanto para RDU quanto para MAUT.

Figura 35 - Resultados de S8 para Variação das seções no Ranking



Fonte: A Autora (2020).

Uma maior variação das seções ao longo do ranking é fornecida pelos resultados do MAUT, como refletido por uma maior dispersão dos valores de τ discutidos anteriormente. Outra justificativa é aquela apresentada pela redução do número de diferentes rankings para um mesmo nível de τ avaliado. Em outras palavras, além do RDU produzir menos perturbações na ordenação das seções do GGN, contribuindo com menores dispersões de seus resultados, também reduz significativamente o número de diversas combinações de posições das seções, para o mesmo valor de τ , sendo evidenciada na visualização da Figura 35. Nela, as seções estão apresentadas em ordem natural de obtenção. Sendo assim, para o RDU foram obtidas a ordem das seções {1,6,7,4,2,8,3,5} e para o MAUT a ordem {1,6,7,4,8,2,3,5} facilitando a análise gráfica.

Para o RDU, a primeira posição é garantida por aproximadamente 100% de permanência para a seção 1, seguida da seção 6. A seção 7 e 4 merecem atenção pois estas parecem permutar entre as posições 3 e 4 do ranking. De maneira análoga, as seções 2 e 8 tendem a oscilar entre as posições 5 e 6. A posição 7 com a seção 3 e a posição 8 com a seção 5. Uma recomendação seria então $\{1,6,4,7,8,2,3,5\}$ contra aquela $\{1,6,7,4,2,8,3,5\}$ originalmente recomendada. Também é possível verificar as N sessões mais obtidas nas simulações para nortear a decisão.

Como dito anteriormente, as ordenações obtidas por MAUT e RDU não podem ser comparadas diretamente uma vez que possuem distintas maneiras de avaliação de riscos individuais. No entanto, a robustez dos rankings dentro de comparações feitas para cada método de avaliação de riscos contribui para análise geral.

Nas sessões anteriores deste estudo foi discutido exaustivamente os valores de τ e a indicação de maior robustez nos resultados obtidos pela RDU em favor do MAUT. Logo, para igual percentual de variação, há uma maior dificuldade de recomendação ao decisor quanto a priorização das seções como pode ser visto na Figura 35.

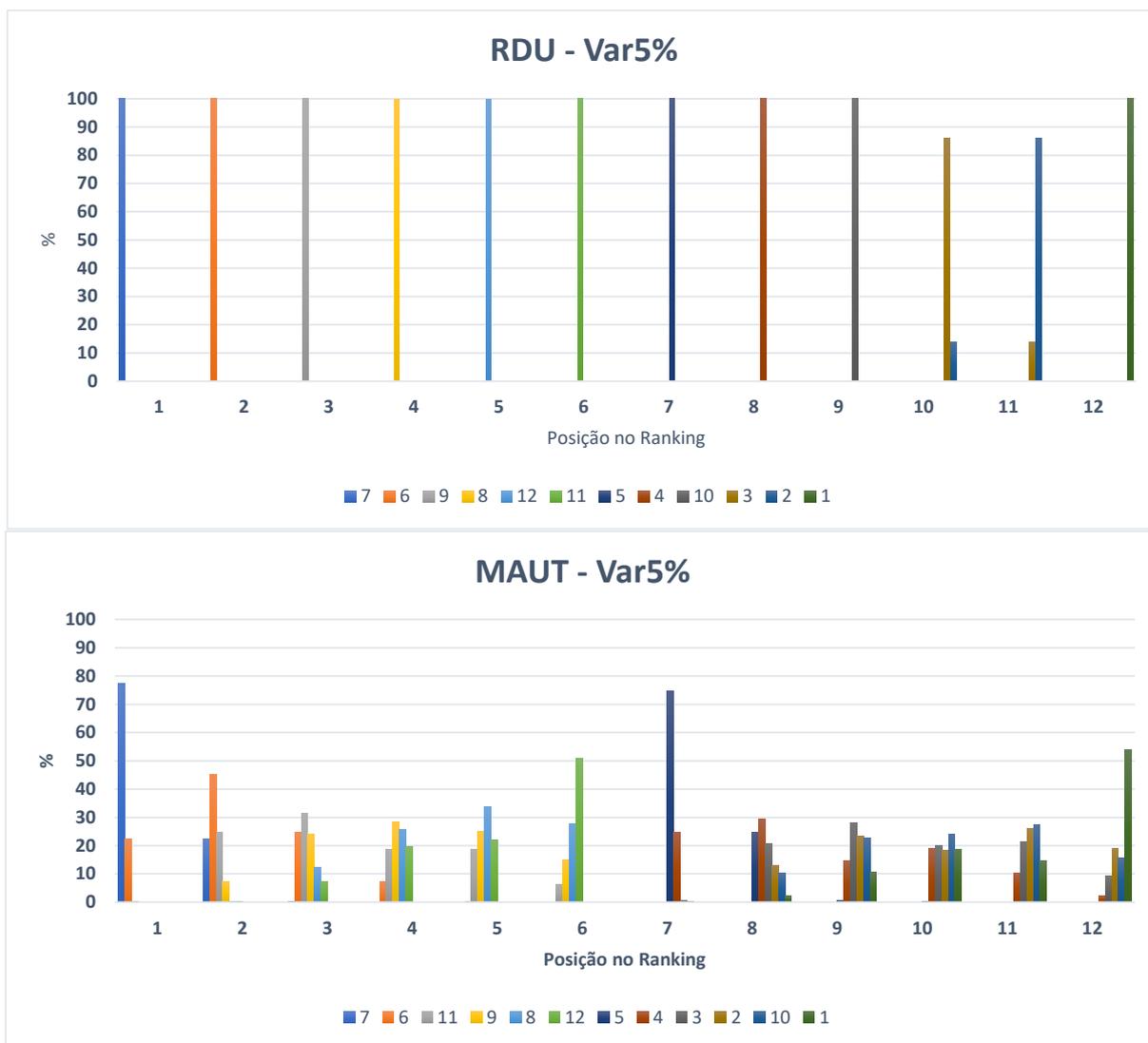
Apesar das posições 1 e 8 estarem definidas com mais facilidade com relação as demais, as posições centrais apresentam mais perturbações, composta por mais seções em uma mesma posição, como pode ser destacado principalmente na posição 5 do MAUT var5% (Figura 35), cuja frequência de permanência entre as sessões é muito parecida entre elas. A posição 2 alocada pela seção 7, seguida da 6 e 4. A posição 5 tem uma maior dificuldade e pode-se tentar inferir sobre as demais seções. A posição 8 com a seção 5, antecedida pela seção e 8, e por fim, a seção 2 na quinta posição, por eliminação. Uma recomendação para este caso seria, $\{1,7,6,4,2,8,3,5\}$ contra aquela $\{1,6,7,4,8,2,3,5\}$ da original. Além disso, o decisor pode se apoiar na informação do ranking obtido com maior frequência em conjunto com a avaliação gráfica. O Apêndice A apresenta mais detalhes sobre as ordenações obtidas para S8, para todos os graus de incerteza simulados.

Por se tratar de um método de apoio a decisão multicritério, o resultado obtido trata-se apenas de uma recomendação ao decisor. Sendo assim, este pode ter diferentes perspectivas de análise quanto a definição da priorização final. O analista bem como este trabalho tem o papel de gerar informação e *insight* a partir dos resultados obtidos, ficando a cargo do decisor o estabelecimento da ordenação final das seções.

Para finalizar a análise, é apresentada a Figura 36 contendo a variação das seções no Ranking pra S12. De maneira clara, o ranking original $\{7,6,9,8,12,11,5,4,10,3,2,1\}$ é recomendado ao decisor como uma fonte confiável de ordenação das seções de risco mediante

abordagem da *Non-EU*. No entanto, apenas as posições 1, 7 e 12 de S12 no MAUT estão bem definidas, sendo necessária maior análise seção a seção, para realizar a recomendação ao decisor. Além disso, análises semelhantes podem ser conduzidas para os demais graus de incerteza dos parâmetros, a partir dos resultados mostrados no Apêndice B. Dele verifica-se que a recomendação inicial obtida pelo RDU permanece robusta e adequada para graus de incerteza de até 20%.

Figura 36 - Resultados de S12 para Variação das seções no Ranking



Fonte: A Autora (2020).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho, bem como discussões gerais sobre os resultados obtidos, além de recomendações e sugestões para continuação da pesquisa em trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Com a consideração do mesmo espaço de consequências para avaliação dos riscos e das simulações dos gasodutos hipotéticos distintos, foi possível analisar os impactos do uso da hierarquização de riscos multidimensionais considerando *Non-EU*. Buscou-se ao longo de todo o trabalho, obter meios de comparação que norteassem os impactos desta nova abordagem de riscos para priorização das seções do GGN.

Neste sentido, os testes estatísticos aplicados mostraram que os valores de τ obtidos são mais robustos (de diferentes maneiras) quando o risco é estimado utilizando o RDU ao invés do MAUT. Como vantagens, pode-se destacar o aumento dos valores médios de correlação, mesmo para quando os níveis de incerteza são maiores; para um mesmo nível de τ , há redução no número de rankings exclusivos, reduzindo o deslocamento das seções ao longo dos postos de ordenação; valores negativos de τ são considerados mais vezes como outliers do que para aqueles comparados em um mesmo nível de incertezas com o MAUT; além da redução da distância de contribuição das seções com relação umas às outras, pela análise das razões das diferenças. As funções de ponderação mostraram desvios da linearidade evidenciando que a *Non-EU* é mais adequada para proporcionar resultados mais robustos de priorização das seções.

Deste modo, foram encontradas evidências de que os resultados do RDU produzem um número maior de simulações com correlação elevada com o ranking original obtido, tanto para bases mais robustas, com incidência de menos perturbações de suas seções (S12) como para bases mais sensíveis (S8). Os resultados obtidos para ambas as bases puderam simular aspectos opostos no que diz respeito a ordenabilidade das seções de risco e, portanto, sua aplicabilidade abrange situações intermediárias. Ou seja, por indução pode-se inferir que, se é possível obter vantagens na utilização do RDU com relação o MAUT para bases muito robustas e para bases muito sensíveis, independente do grau de incerteza global dos parâmetros que compõem o modelo, situações onde há uma maior homogeneidade,

produzindo resultados com robustez intermediária ou menos sensíveis também podem beneficiar-se da condução de riscos obtida pelo RDU.

Vale ressaltar que o modelo matemático proposto inicialmente com o MAUT não é invalidado pela nova abordagem, visto principalmente sua contribuição para a literatura de riscos multidimensionais em gasodutos, além de prover a base de avaliação matemática e de parâmetros para o presente trabalho. Acrescenta-se ainda que, para decisores que compreendam a contribuição das probabilidades como uma função linear, os resultados do modelo de riscos com base no RDU são reduzidos aqueles obtidos pelo MAUT, sendo, portanto, o modelo de riscos do RDU uma generalização do modelo do MAUT..

Por outro lado, a abordagem proposta para estimação dos riscos considerando a utilidade dependente do ranking preenche as lacunas de análise no contexto aplicado, especialmente pela natureza intrínseca ao modelo que possui valores discrepantes de consequências e de suas probabilidades de ocorrência. Sendo assim, O RDU mostrou-se vantajoso na priorização das seções principalmente porque foi capaz de balancear melhor os efeitos de baixas e altas consequências nos critérios ambiental, humano e financeiro.

Dentre as vantagens de utilização do RDU para o contexto analisado é evidenciado, além da maior robustez na análise final de priorização das seções conduzida pelo decisor ao final das recomendações, também o processo de entendimento cognitivo frente a tomada de decisão mediante os critérios de risco analisados.

Desvios da linearidade no tocante ao pensamento sobre as probabilidades de ocorrência e suas consequências, reafirmam a importância de se estabelecer os parâmetros de modelos matemáticos de risco de maneira a reduzir a incerteza final dos resultados. Uma vez que as ponderações de probabilidades influenciam diretamente na análise de riscos, sua estimação por aproximação estatística ou por obtenção a partir de um especialista compõem uma etapa importante para a contribuição marginal dos riscos unidimensionais.

Acrescenta-se que as pessoas responsáveis pelo levantamento e obtenção de parâmetros do modelo e posterior entrada de danos na análise de riscos são então encorajadas a dedicar esforços na obtenção destes parâmetros. Deve-se aumentar a acuracidade, sempre que possível, principalmente para os casos em que os resultados de ordenação das seções em prioridades de risco são mais afetadas, uma vez que, ao reduzir a incerteza de entrada, reduz também os esforços na saída, ou seja, na avaliação dos resultados.

Ressalta-se ainda que o modelo proposto de riscos é delimitado para avaliação de riscos aplicada a GGN, uma vez que a estimação depende de características físico-químicas do gás e

das condições de transporte. No entanto, ressalta-se que a modelagem de riscos apresentada neste trabalho pode abranger riscos em outras configurações de dutos, como por exemplo, para aqueles de derivados de petróleo, de Hidrogênio etc. Para tanto, é necessário fazer as devidas estimativas de consequências pertinentes ao problema, porém a partir da agregação das consequências e obtenção das estimativas de risco com base na teoria da *Non-EU* como meio de incluir a percepção não linear de probabilidades por parte do decisor, trazendo à luz os benefícios da abordagem de maneira semelhante aqueles destacados como contribuição neste trabalho.

A falta de dados históricos compõem ainda uma dificuldade para obtenção de dados para simulações mais fidedignas para validação do modelo. Não foi possível aplicação real do modelo, no entanto, os resultados obtidos mostram o potencial de contribuição de melhoria de análise para o gerenciamento de riscos.

Por fim, acrescenta-se que expansão de produção de GN além de investimentos na malha dutoviária do país são o cenário propício para o estabelecimento de novas práticas de gerenciamento de riscos neste contexto. Neste sentido, o presente trabalho desenvolvido pode contribuir favoravelmente para estimativa de riscos e priorização de seções de um GGN, de maneira a direcionar melhor os recursos de inspeção e melhorias de manutenção de seções a fim de reduzir os danos ou até mesmo prevenir acidentes do gasoduto. Com a priorização de trechos do gasoduto de maneira mais assertiva, reduz-se os riscos de rompimento ou furo do duto, e de suas causas consequências, tais como explosões contendo deslocamentos de terra, arremesso de detritos; incêndios de difícil controle afetando propriedades de terceiros, animais, áreas de preservação ambiental, fazendas; além de prejuízos financeiros estimados em centenas de milhões de reais devido a multas e indenizações.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que foi possível evidenciar melhorias de análise considerando abordagem da *Non-EU* para a estimativa de riscos multidimensionais em gasodutos de gás natural, análise semelhante pode ser executada considerando não apenas a importância do ranking para a ponderação das probabilidades, mas também verificar a possibilidade de elicitar as funções ponderação considerando perdas e ganhos.

O RDU considera que as funções de ponderação das probabilidades são equivalentes para ambos os casos, sendo, portanto, simétricas com relação a um ponto de referência.

Adiciona-se que estes valores de referência podem ser estimados a partir da análise estatística descritiva dos resultados obtidos com base em estudos aplicados a diferentes decisores, por meio de questionários e/ou por auxílio de softwares para elicitación interativa das preferências quanto a ponderação de probabilidades e a desejabilidade dos critérios de avaliação de riscos.

Além disso, as curvas de ganho ou perdas podem não ser simétricas com relação a referência, podendo variar para diferentes contextos de decisão ou ainda para diferentes percepções de riscos dos decisores. Trata-se, portanto, de uma abordagem diferente à proposta do presente trabalho de avaliação de riscos, sendo então baseada na CPT (*Cumulative Prospect Theory*).

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, **Gasodutos de Transporte**, 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/transporte-de-gas-natural/gasodutos-de-transporte>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- [2] BRASIL. Presidência da República. **Governo lança novo mercado de gás**. Brasília: Planalto, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2019/07/governo-lanca-novo-mercado-de-gas>. Acesso em: 26 nov. 2020.
- [3] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Novo mercado de gás**, 2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/conselhos-e-comites/cmgn/novo-mercado-de-gas>. Acesso em: 26 nov. 2020.
- [4] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Relatório trimestral - acompanhamento da abertura do mercado de gás natural - Comitê de monitoramento da abertura do mercado de gás natural número 5 - 3o trimestre de 2020**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36112/491926/5+Relatório+Trimestral+CMGN+-+3T2020+vFinal.pdf/fa593de2-4bd8-2514-20a9-a17af7207645>. Acesso em: 26 nov. 2020.
- [5] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Conselho Nacional de Política Energética. **Novo mercado de gás**. Comitê de Promoção da Concorrência no Mercado de Gás Natural. 2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36112/491930/Apresentação+Power+Point+Novo+Mercado+de+Gás+CNPE.pdf/f8781f6c-cf97-f5bb-abd6-dc5b66869390>. Acesso em: 26 nov. 2020.
- [6] CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei nº 4476, de 2020**. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/144582>. Acesso em: 26 nov. 2020.
- [7] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nova lei do gás por um mercado mais aberto, dinâmico e competitivo**. Brasília: MME, 2020. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/36112/491926/Folder+PL+4.476_2020.pdf/7dad5820-6da9-c165-3a0c-cffba107399b. Acesso em: 01 dezembro 2020.
- [8] AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Gasodutos de transporte - fiscalização**. 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/transporte-gas-natural/5684-gasodutos-de-transporte-fiscalizacao>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- [9] EUROPEAN GAS PIPELINE INCIDENT DATA GROUP - EGIG, **GAS PIPELINE INCIDENTS. 10th report of the european gas pipeline incident data group (period 1970 – 2016)**. 2018. Disponível em: [https://www.egig.eu/startpagina/\\$61/\\$108](https://www.egig.eu/startpagina/$61/$108). Acesso em: 26 nov. 2020.

- [10] FRENCH MINISTRY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - FMSD, **Rupture and ignition of a gas pipeline**, 2004. Disponível em: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/FD_27681_Ghislengheinv_2004ang.pdf>. Acesso em 26 novembro 2020.
- [11] TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA (TSB), **Pipeline Investigation Report. Report Number P14H0011.**, 2014. Disponível em: <<https://www.bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/pipeline/>>. Acesso em 26 novembro 2020.
- [12] BRITO, A.J., A.T. DE ALMEIDA, Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines, **Reliab. Eng. Syst. Saf.**, vol. 94, no. 2, pp. 187–198, 09 2009, doi: 10.1016/j.res.2008.02.014.
- [13] BRITO, A.J., A.T. DE ALMEIDA, C.M.M. MOTA, A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory, **Eur. J. Oper. Res.**, vol. 200, no. 3, pp. 812–821, 10 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.016.
- [14] ALENCAR, M.H., A.T. DE ALMEIDA, Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model, **Int. J. Hydrogen Energy**, vol. 35, no. 8, pp. 3610–3619, 10 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.122.
- [15] SHAW, W.D., R.T. WOODWARD, Why environmental and resource economists should care about non-expected utility models, **Resour. Energy Econ.**, vol. 30, no. 1, pp. 66–89, 08 2008, doi: 10.1016/j.reseneeco.2007.05.001.
- [16] KEENEY, R.L., H. RAIFFA, **Decision with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1976.
- [17] BOCQUÉHO, G., F. JACQUET, A. REYNAUD. Expected utility or prospect theory maximisers? Assessing farmers' risk behaviour from field-experiment data. **Eur. Rev. Agric. Econ.**, vol. 41, no. 1, pp. 135–172, 14 2014, doi: 10.1093/erae/jbt006.
- [18] GE, B., X. ZHANG, X. ZHOU, Y. TAN, A Cumulative Prospect Theory Based Counterterrorism Resource Allocation Method under Interval Values. **J. Syst. Sci. Syst. Eng.**, vol. 28, no. 4, pp. 478–493, 19 2019, doi: 10.1007/s11518-019-5423-y.
- [19] ZHAO, H., S. GUO, H. ZHAO, Comprehensive assessment for battery energy storage systems based on fuzzy-MCDM considering risk preferences. **Energy**, vol. 168, pp. 450–461, 19 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.11.129.
- [20] BOOIJ, A.S., B.M.S. VAN PRAAG, G. VAN DE KUILEN. A parametric analysis of prospect theory's functionals for the general population. **Theory Decis.**, vol. 68, no. 1–2, pp. 115–148, 10 2010, doi: 10.1007/s11238-009-9144-4.

- [21] TVERSKY, A., D. KAHNEMAN. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty. **J. Risk Uncertain.**, vol. 5, no. 4, pp. 297–323, 92 1992, doi: 10.1007/BF00122574.
- [22] ABDELLAOUI, M. Parameter-Free Elicitation of Utility and Probability Weighting Functions. **Manage. Sci.**, vol. 46, no. 11, pp. 1497–1512, 00 2000, doi: 10.1287/mnsc.46.11.1497.12080.
- [23] ALLAIS, M. Le comportement de l’Homme rationnel devant le risque: critiques des postulats et axiomes de l’Ecole Américaine. **Econom.**, vol. 21, p. :503–46., 53 1953.
- [24] OLIVER, A. Testing rank-dependent utility theory for health outcomes. **Health Econ.**, vol. 12, no. 10, pp. 863–871, 03 2003, doi: 10.1002/hec.769.
- [25] ALMEIDA, A.T., C.A. V. CAVALCANTE, M. H. ALENCAR, R.J.P. FERREIRA, A.T. DE ALMEIDA-FILHO, T. V. GARCEZ. **Multicriteria and multiobjective models for risk**, reliability and maintenance decision analysis, reliab and. New York: Springer, 2015.
- [26] ALMEIDA, A.T., R.J.P. FERREIRA, C. A. V. CAVALCANTE. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability, **IMA J. Manag. Math.**, vol. 26, no. 3, pp. 249–271, 15 2015, doi: 10.1093/imaman/dpv010.
- [27] KAYA, İ., M. ÇOLAK, F. TERZI. Use of MCDM techniques for energy policy and decision-making problems: A review. **Int. J. Energy Res.**, vol. 42, no. 7, pp. 2344–2372, 18 2018, doi: 10.1002/er.4016.
- [28] CHEN, L., J. REN. Multi-attribute sustainability evaluation of alternative aviation fuels based on fuzzy ANP and fuzzy grey relational analysis. **J. Air Transp. Manag.**, vol. 68, no. February, pp. 176–186, 18 2018, doi: 10.1016/j.jairtraman.2017.10.005.
- [29] TAVANA, M., M. BEHZADIAN, M. PIRDASHTI, H. PIRDASHTI. A PROMETHEE-GDSS for oil and gas pipeline planning in the Caspian Sea basin. **Energy Econ.**, vol. 36, pp. 716–728, 13 2013, doi: 10.1016/j.eneco.2012.11.023.
- [30] MEDEIROS, C.P., M.H. ALENCAR, A.T. DE ALMEIDA. Multidimensional risk evaluation of natural gas pipelines based on a multicriteria decision model using visualization tools and statistical tests for global sensitivity analysis. **Reliab. Eng. Syst. Saf.**, vol. 165, pp. 268–276, 17 2017, doi: 10.1016/j.ress.2017.04.002.
- [31] AVEN, T. On the use of conservatism in risk assessments. **Reliab. Eng. Syst. Saf.**, vol. 146, pp. 33–38, 16 2016, doi: 10.1016/j.ress.2015.10.011.
- [32] KONTEK, K., M.H. BIRNBAUM. The impact of middle outcomes on lottery valuations. **J. Behav. Exp. Econ.**, vol. 78, no. Aug. 2017, pp. 30–44, 19 2019, doi: 10.1016/j.socec.2018.11.006.
- [33] ALMEIDA, ADIEL TEIXEIRA; SOUSA, F. C. M. **Gestão da manutenção na direção da Competitividade**. 2001.

- [34] ANDALIB, M.S., M. TAVAKOLAN, B. GATMIRI. Modeling managerial behavior in real options valuation for project-based environments, **Int. J. Proj. Manag.**, vol. 36, no. 4, pp. 600–611, 18 2018, doi: 10.1016/j.ijproman.2018.02.001.
- [35] AVEN, T., Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation, **Eur. J. Oper. Res.**, vol. 253, no. 1, pp. 1–13, 16 2016, doi: 10.1016/j.ejor.2015.12.023.
- [36] AVEN, T., On how to define, understand and describe risk, **Reliab. Eng. Syst. Saf.**, vol. 95, no. 6, pp. 623–631, 10 2010, doi: 10.1016/j.res.2010.01.011.
- [37] BJERGA, T., T. AVEN, Adaptive risk management using new risk perspectives - An example from the oil and gas industry, **Reliab. Eng. Syst. Saf.**, vol. 134, pp. 75–82, 15 2015, doi: 10.1016/j.res.2014.10.013.
- [38] WAKKER, P., D. DENEFFE, Eliciting von Neumann-Morgenstern utilities when probabilities are distorted or unknown, **Manage. Sci.**, vol. 42, no. 8, pp. 1131–1150, 96 1996, doi: 10.1287/mnsc.42.8.1131.
- [39] WAKKER, P., **Prospect Theory for Risk and Ambiguity**. Cambridge University Press, 2010.
- [40] VON NEUMANN, J., AND MORGENSTERN, O., **Theory of games and economic behavior**. Princeton, NJ, 1953.
- [41] DE ALMEIDA, A.T., **Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério**, 1a. São Paulo: Editora Atlas, 2013.
- [42] VAN DE KUILEN, G., P.P. WAKKER, The Midweight Method to Measure Attitudes Toward Risk and Ambiguity, **Manage. Sci.**, vol. 57, no. 3, pp. 582–598, 11 2011, doi: 10.1287/mnsc.1100.1282.
- [43] KAHNEMAN, DANIEL; AMOS, T., Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, **Econometrica**, vol. 47, no. 2, pp. 263–292, 79 1979.
- [44] TVERSKY, A., FOX, C.R., **Weigthing risk and uncertainty, Psychological review**, vol. 102, no. 2. pp. 269-283., 1995.
- [45] PRELEC, D., The Probability Weighting Function, **Econometrica**, vol. 66, no. 3, pp. 497–527, 98 1998.
- [46] BLEICHRODT, H., J.L. PINTO, A Parameter-Free Elicitation of the Probability Weighting Function in Medical Decision Analysis, **Manage. Sci.**, vol. 46, no. 11, pp. 1485–1496, 00 2000, doi: 10.1287/mnsc.46.11.1485.12086.
- [47] AVEN, T., O. RENN, On risk defined as an event where the outcome is uncertain, **J. Risk Res.**, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 09 2009, doi: 10.1080/13669870802488883.

- [48] BADIDA, P., Y. BALASUBRAMANIAM, J. JAYAPRAKASH, Risk evaluation of oil and natural gas pipelines due to natural hazards using fuzzy fault tree analysis, **J. Nat. Gas Sci. Eng.**, vol. 66, no. April, pp. 284–292, 19 2019, doi: 10.1016/j.jngse.2019.04.010.
- [49] IQBAL, H., S. TESHAMARIAM, H. HAIDER, R. SADIQ, Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies, **Struct. Infrastruct. Eng.**, vol. 13, no. 6, pp. 794–815, 16 2016, doi: 10.1080/15732479.2016.1187632.
- [50] MUNIZ, M.V.P., G.B.A. LIMA, R.G.G. CAIADO, O.L.G. QUELHAS, Bow tie to improve risk management of natural gas pipelines, **Process Saf. Prog.**, vol. 00, no. 00, pp. 1–7, 17 2017, doi: 10.1002/prs.11901.
- [51] CHAVES, I. A., R.E. MELCHERS, Extreme value analysis for assessing structural reliability of welded offshore steel structures, **Struct. Saf.**, vol. 50, pp. 9–15, 14 2014, doi: 10.1016/j.strusafe.2014.03.007.
- [52] PAPADOPOULOU, M.P., C. ANTONIOU, Environmental impact assessment methodological framework for liquefied natural gas terminal and transport network planning, **Energy Policy**, vol. 68, pp. 306–319, 14 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.044.
- [53] GOMES, W.J.S., A.T. BECK, T. HAUKAAS, Optimal inspection planning for onshore pipelines subject to external corrosion, **Reliab. Eng. Syst. Saf.**, vol. 118, pp. 18–27, 13 2013, doi: 10.1016/j.ress.2013.04.011.
- [54] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Análise Multicritério das Propostas Novo Mercado de Gás**, 2019. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/36112/491930/4.+Análise+multicritério.pdf/542a61d3-f99f-063e-f699-36d4400ee6b6>>. Acesso em: 01 dezembro 2020.
- [55] ABDELMAGUID, T.F., W. ELRASHIDY, Halting decisions for gas pipeline construction projects using AHP: a case study, **Oper. Res.**, vol. 19, no. 1, pp. 179–199, 19 2019, doi: 10.1007/s12351-016-0277-2.
- [56] BROGAN, M.J., Evaluating Risk and Natural Gas Pipeline Safety, **Polit. Policy**, vol. 45, no. 4, pp. 657–680, 17 2017, doi: 10.1111/polp.12211.
- [57] BAUERMEISTER, G.-F., D. HERMANN, O. MUSSHOF, Consistency of determined risk attitudes and probability weightings across different elicitation methods, **Theory Decis.**, vol. 84, no. 4, pp. 627–644, 17 2017, doi: 10.1007/s11238-017-9616-x.
- [58] JO, Y.D., B.J. AHN, Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines, **J. Loss Prev. Process Ind.**, vol. 15, no. 3, pp. 179–188, 02 2002, doi: 10.1016/S0950-4230(02)00007-4.

- [59] ABDELLAOUI, M., A. DRIOUCHI, O. L'HARIDON, Risk aversion elicitation: reconciling tractability and bias minimization, **Theory Decis.**, vol. 71, no. 1, pp. 63–80, 11 2011, doi: 10.1007/s11238-009-9192-9.
- [60] GEIGER, G., An axiomatic account of status quo-dependent non-expected utility: Pragmatic constraints on rational choice under risk, **Math. Soc. Sci.**, vol. 55, no. 2, pp. 116–142, 08 2008, doi: 10.1016/j.mathsocsci.2007.09.004.
- [61] WIBBENMEYER, M.J., M.S. HAND, D.E. CALKIN, T.J. VENN, M.P. THOMPSON, Risk Preferences in Strategic Wildfire Decision Making: A Choice Experiment with U.S. Wildfire Managers, **Risk Anal.**, vol. 33, no. 6, pp. 1021–1037, 13 2013, doi: 10.1111/j.1539-6924.2012.01894.x.
- [62] BEAUDOUIN, F., B. MUNIER, Y. SERQUIN, Multi-Attribute Decision Making and Generalized Expected Utility in Nuclear Power Plant Maintenance, in **Beliefs, Interactions and Preferences in Decision Making**, no. January, Boston, MA: Springer US, 1999, pp. 341–357.
- [63] KRAWCZYK, M.W., Probability weighting in different domains: The role of affect, fungibility, and stakes, **J. Econ. Psychol.**, vol. 51, pp. 1–15, 15 2015, doi: 10.1016/j.joep.2015.06.006.
- [64] PENNING, J.M.E., A. SMIDTS, The Shape of Utility Functions and Organizational Behavior, **Manage. Sci.**, vol. 49, no. 9, pp. 1251–1263, 03 2003, doi: 10.1287/mnsc.49.9.1251.16566.
- [65] KEMEL, E., C. PARASCHIV, Prospect Theory for joint time and money consequences in risk and ambiguity, **Transp. Res. Part B Methodol.**, vol. 56, pp. 81–95, 13 2013, doi: 10.1016/j.trb.2013.07.007.
- [66] ELLSBERG, D., **Risk , Ambiguity , and the Savage Axioms**, vol. 75, no. 4, pp. 643–669, 61 1961.
- [67] TANAKA, T., C.F. CAMERER, Q. NGUYEN, Risk and Time Preferences: Linking Experimental and Household Survey Data from Vietnam, **Am. Econ. Rev.**, vol. 100, no. 1, pp. 557–571, 10 2010, doi: 10.1257/aer.100.1.557.
- [68] CHAI, J., E.W.T. NGAI, The variable precision method for elicitation of probability weighting functions, **Decis. Support Syst.**, vol. 128, p. 113166, 20 2020, doi: 10.1016/j.dss.2019.113166.
- [69] COHEN, M., Risk Perception, Risk Attitude, and Decision: A Rank-Dependent Analysis, **Math. Popul. Stud.**, vol. 22, no. 1, pp. 53–70, 15 2015, doi: 10.1080/08898480.2013.836425.
- [70] JO, Y.D., B.J. AHN, A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas, **J. Hazard. Mater.**, vol. 123, no. 1–3, pp. 1–12, 05 2005, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.01.034.

- [71] DE ALMEIDA, A.T., D.C. MORAIS, A.P.C.S. COSTA, L.H. ALENCAR, S. DE F.D. DAHER, **Decisão em grupo e negociação: métodos e aplicações**. 2012.
- [72] ZANK, H., Cumulative prospect theory for parametric and multiattribute utilities, **Math. Oper. Res.**, vol. 26, no. 1, pp. 67–81, 01 2001, doi: 10.1287/moor.26.1.67.10598.
- [73] BERGER, J.O., **Statistical decision theory and Bayesian analysis**, Second edi. New York: Springer-Verlag, 1985.
- [74] DE ALMEIDA, A.T., C.A. V. CAVALCANTE, M.H. ALENCAR, R.J.P. FERREIRA, A.T. DE ALMEIDA-FILHO, T. V. GARCEZ, **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk , Reliability and Maintenance Decision Analysis**. 2015.
- [75] MEDEIROS, C.P., M.H. ALENCAR, A.T. DE ALMEIDA, Hydrogen pipelines: Enhancing information visualization and statistical tests for global sensitivity analysis when evaluating multidimensional risks to support decision-making, **Int. J. Hydrogen Energy**, vol. 41, no. 47, pp. 22192–22205, 16 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.113.
- [76] DOANE, DAVID P.; SEWARD, L.E., **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. 2008.
- [77] GONZALEZ, R., G. WU, On the Shape of the Probability Weighting Function, **Cogn. Psychol.**, vol. 38, no. 1, pp. 129–166, 99 1999, doi: 10.1006/cogp.1998.0710.
- [78] MHIDAS, **Major Hazard Incident Data Service**. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/infoserv/mhidas.htm>>. Acesso em 26 novembro 2020.

APÊNDICE A - DETALHES DA ANÁLISE DE RANKINGS E DE VARIAÇÕES DAS SEÇÕES PARA S8

Este Apêndice apresenta os resultados de rankings obtidos de S8. Primeiramente são apresentados os 10 rankings que mais se repetem nas simulações para RDU e MAUT respectivamente. A segunda parte constitui da visualização das variações das Seções ao Longo do Ranking para As barras indicam a seção e seu percentual de permanência nas 8 posições possíveis do ranking. Quanto mais próxima de 100 (indicando que a seção tende a permanecer na posição indicada), mais robusta é a seção, aumentando o grau de confiança com relação a sua priorização com relação as demais sessões. Quanto menos uma sessão variar, mais assertiva será a decisão correspondente a ela. A ordem das sessões é apresentada conforme obtenção no ranking original

Tabela A1 -Top 10 Rankings de RDU para S8

Posição	Var5%		Var10%		Var15%		Var20%	
	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N
1	1,6,4,7,8,2,3,5	1452	1,4,6,7,2,8,5,3	400	1,2,4,6,7,8,3,5	258	1,2,4,6,7,8,3,5	155
2	1,6,7,4,8,2,3,5	1337	1,2,4,6,7,8,3,5	385	1,2,4,6,8,7,3,5	236	1,2,4,6,8,7,3,5	153
3	1,6,4,7,2,8,3,5	1304	1,2,4,6,7,8,5,3	343	1,2,7,6,4,8,3,5	229	1,2,4,6,7,8,5,3	148
4	1,6,7,4,2,8,3,5	1223	1,4,6,7,2,8,3,5	343	1,2,4,6,7,8,5,3	228	1,2,4,7,6,8,3,5	136
5	1,4,6,7,8,2,3,5	1091	1,4,6,7,8,2,3,5	335	1,4,6,2,7,8,3,5	205	1,2,4,7,6,8,5,3	131
6	1,2,6,4,7,8,3,5	1080	1,4,6,7,8,2,5,3	328	1,2,4,6,8,7,5,3	200	1,2,6,7,8,4,3,5	126
7	1,2,6,7,4,8,3,5	1061	1,2,6,7,8,4,3,5	312	1,2,6,7,8,4,3,5	198	1,2,4,6,7,3,8,5	120
8	1,4,6,7,2,8,3,5	979	1,2,6,7,4,8,5,3	311	1,4,6,7,2,8,3,5	197	1,2,3,6,7,8,4,5	119
9	1,6,7,8,4,2,3,5	924	1,2,6,4,7,8,5,3	309	1,2,6,4,7,8,3,5	194	1,2,7,6,8,4,3,5	119
10	1,6,7,2,4,8,3,5	872	1,2,6,7,4,8,3,5	290	1,2,6,7,4,8,3,5	189	1,2,6,7,4,8,3,5	119

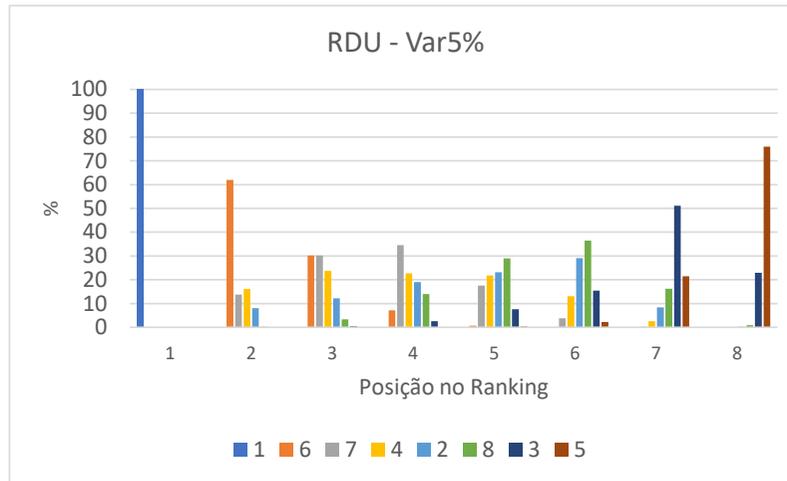
Fonte: A Autora (2020).

Tabela A2 -Top 10 Rankings de MAUT para S8

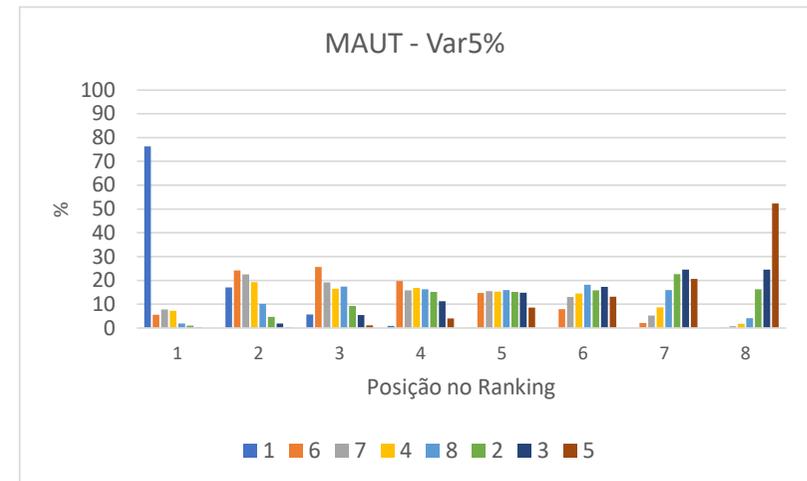
	Var5%		Var10%		Var15%		Var20%	
	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N
1	1,7,4,2,6,8,3,5	130	1,4,7,2,3,6,8,5	58	1,4,8,2,3,6,7,5	33	2,1,7,6,3,4,8,5	22
2	1,4,6,7,8,2,3,5	126	1,4,7,6,8,2,3,5	53	1,4,7,8,6,3,2,5	33	1,2,7,6,3,4,8,5	21
3	1,7,4,6,8,3,2,5	124	1,4,6,8,7,2,3,5	51	1,7,6,8,2,4,3,5	31	1,7,6,4,2,3,8,5	20
4	1,4,7,6,8,2,3,5	123	1,4,8,6,7,2,3,5	50	1,4,6,3,2,7,8,5	30	1,4,7,6,5,2,3,8	20
5	1,4,6,8,7,3,2,5	122	1,4,7,6,3,8,2,5	49	1,4,6,7,8,2,5,3	29	2,1,4,7,6,8,3,5	20
6	1,4,7,6,8,3,2,5	118	1,4,7,6,8,2,5,3	47	1,7,3,4,6,8,2,5	29	1,8,6,4,3,2,7,5	20
7	1,7,8,6,4,2,3,5	113	1,4,8,7,6,2,3,5	47	1,4,8,2,6,7,5,3	28	1,7,6,3,2,8,4,5	19
8	1,6,7,4,3,8,2,5	112	1,7,3,4,6,8,2,5	46	1,7,6,4,2,8,5,3	28	1,8,6,5,4,2,7,3	19
9	1,7,6,4,8,3,2,5	111	1,7,3,6,4,8,2,5	46	1,2,6,3,4,7,8,5	28	1,8,4,6,7,2,3,5	19
10	1,4,6,7,8,3,2,5	111	1,4,6,8,3,7,2,5	45	1,7,6,4,2,3,8,5	28	1,4,7,8,2,6,5,3	19

Fonte: A Autora (2020).

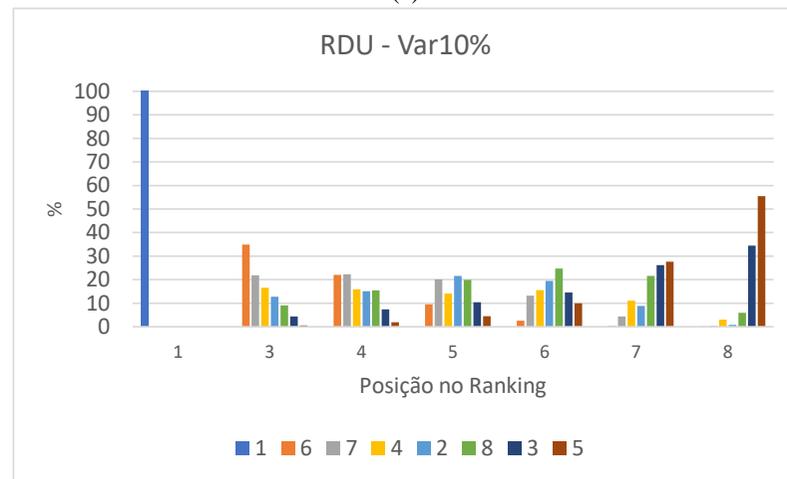
Figura A1 - Ordenações obtidas para S8 5% e 10%



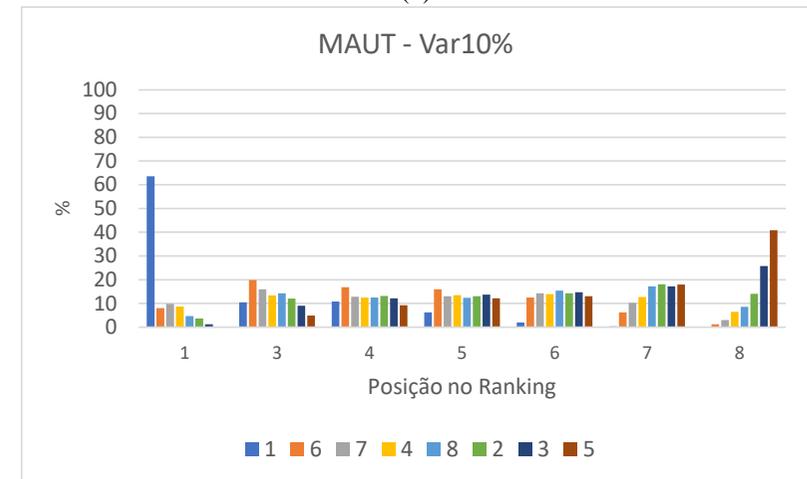
(a)



(b)



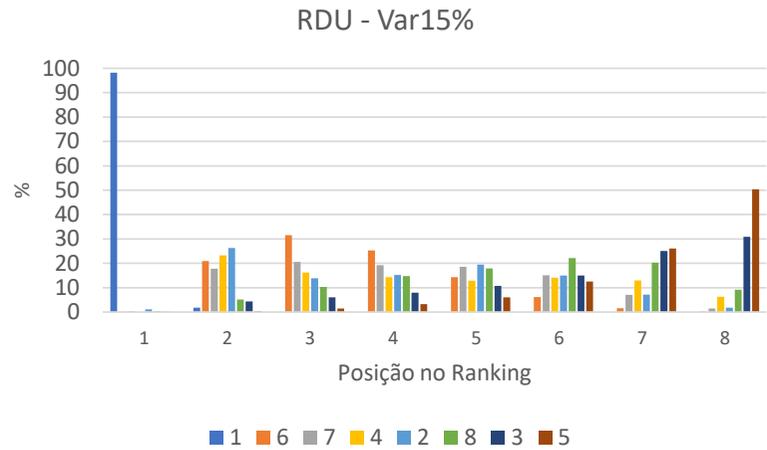
(c)



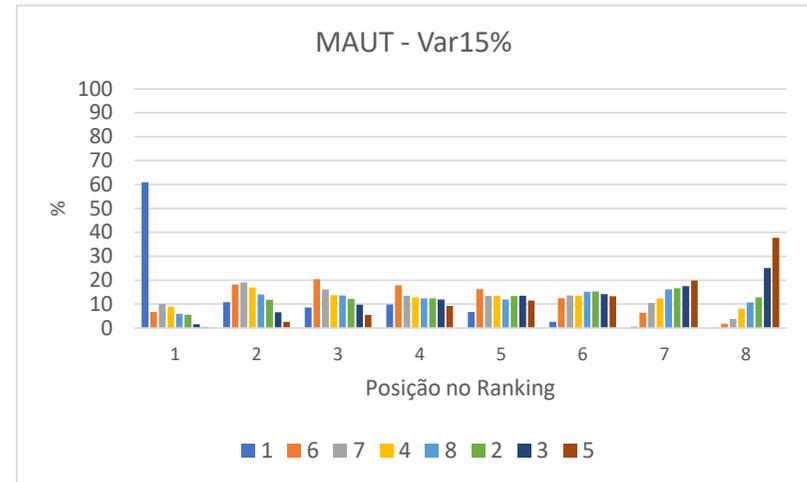
(d)

Fonte: A Autora (2020).

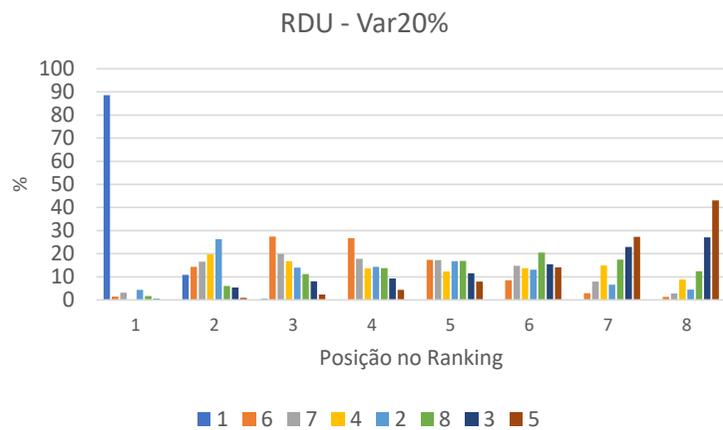
Figura A2 - Ordenações obtidas para S8 15% e 20%



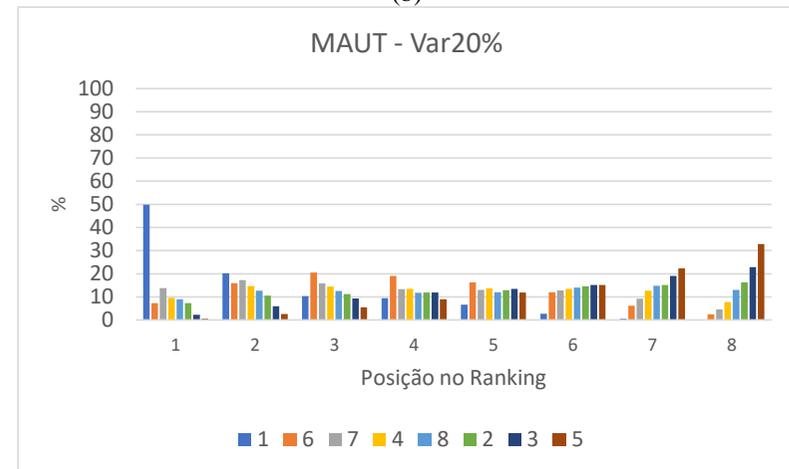
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: A Autora (2020).

APÊNDICE B- DETALHES DA ANÁLISE DE RANKINGS E DE VARIAÇÕES DAS SEÇÕES PARA S12

São apresentados os resultados obtidos para S12. As informações dos 10 rankings que mais se repetem para cada percentual de variação é apresentado. Posteriormente apresentadas as variações das sessões para S12 nos quatro graus de incerteza simulados. A ordem apresentada das sessões segue a mesma ordem obtida no ranking original.

Tabela B1 -Top 10 Rankings de MAUT para S12

Posição	var5%		Var10%		Var15%		Var20%	
	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N
1	7,6,11,9,8,12,5,4,3,10,2,1	428	7,6,11,9,8,12,5,4,3,10,2,1	170	7,6,11,9,8,12,5,4,10,3,2,1	84	7,6,11,9,8,12,5,4,3,10,2,1	44
2	7,6,11,9,8,12,5,4,3,2,10,1	402	7,6,11,9,8,12,5,4,3,2,10,1	140	7,6,11,9,8,12,5,4,3,10,2,1	70	7,6,11,9,8,12,5,4,2,3,10,1	42
3	7,6,11,9,8,12,4,5,3,10,2,1	350	7,6,11,9,8,12,5,4,10,3,2,1	124	7,6,11,9,8,12,5,4,3,2,10,1	68	7,6,11,9,8,12,5,4,2,10,3,1	42
4	7,6,11,9,8,12,4,5,3,2,10,1	280	7,6,11,8,9,12,5,4,3,10,2,1	124	7,6,11,9,8,12,5,4,2,3,10,1	66	7,6,11,8,12,9,5,4,2,3,10,1	38
5	7,11,6,9,8,12,5,4,3,10,2,1	276	7,6,11,9,8,12,5,4,2,10,3,1	116	11,9,12,7,6,8,5,4,3,10,2,1	62	7,6,11,9,8,12,5,4,3,2,10,1	36
6	7,11,6,9,8,12,5,4,3,2,10,1	250	7,6,11,9,12,8,5,4,3,2,10,1	116	7,6,11,9,12,8,5,4,3,2,10,1	54	7,6,11,9,8,12,5,4,3,1,10,2	36
7	7,6,11,9,8,12,5,3,2,4,10,1	248	7,6,11,9,8,12,5,4,2,3,10,1	108	7,6,11,9,12,8,5,4,3,10,2,1	54	7,11,6,8,9,12,5,4,3,10,2,1	34
8	6,7,11,9,8,12,5,4,3,2,10,1	242	7,6,11,9,12,8,5,4,3,10,2,1	108	7,6,11,9,12,8,5,4,2,3,10,1	50	7,6,11,9,8,12,5,4,10,3,2,1	32
9	6,7,11,9,8,12,5,4,3,10,2,1	240	7,6,11,8,9,12,5,4,3,2,10,1	102	7,6,11,8,12,9,5,4,3,10,2,1	50	7,6,11,8,9,12,5,4,3,10,2,1	32
10	7,6,11,9,8,12,5,4,2,3,10,1	238	7,6,11,9,12,8,5,4,10,3,2,1	90	7,9,8,6,11,12,5,4,3,2,10,1	50	7,6,11,9,12,8,5,4,2,3,10,1	32

Fonte: A Autora (2020).

Tabela B2 - Top 10 Rankings de RDU para S12

Posição	var5%		Var10%		Var15%		Var20%	
	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N	Ranking	N
1	7,6,9,8,12,11,5,4,10,3,2,1	86034	7,6,9,8,12,11,5,4,10,3,2,1	64445	7,6,9,8,12,11,5,4,10,3,2,1	45339	7,6,9,8,12,11,5,4,10,3,2,1	1,0000
2	7,6,9,8,12,11,5,4,10,2,3,1	13862	7,6,9,8,12,11,5,4,10,2,3,1	26626	7,6,9,8,12,11,5,4,10,2,3,1	25877	7,6,9,8,12,11,5,4,10,2,3,1	0,9697
3	7,6,9,12,8,11,5,4,10,3,2,1	94	7,6,9,12,8,11,5,4,10,3,2,1	5224	7,6,9,12,8,11,5,4,10,3,2,1	9619	7,6,9,12,8,11,5,4,10,3,2,1	0,9697
4	7,6,9,12,8,11,5,4,10,2,3,1	10	7,6,9,12,8,11,5,4,10,2,3,1	2139	7,6,9,12,8,11,5,4,10,2,3,1	5519	7,6,9,12,8,11,5,4,10,2,3,1	0,9394
5			7,6,9,8,12,11,5,10,4,3,2,1	895	7,6,9,8,12,11,5,10,4,3,2,1	3944	7,6,9,8,12,11,5,10,4,3,2,1	0,9697
6			7,6,9,8,12,11,5,10,4,2,3,1	366	7,6,9,8,12,11,5,10,4,2,3,1	2194	7,6,8,9,12,11,5,4,10,3,2,1	0,9697
7			7,6,8,9,12,11,5,4,10,3,2,1	125	7,6,8,9,12,11,5,4,10,3,2,1	1864	7,6,9,8,12,11,5,10,4,2,3,1	0,9394
8			7,6,9,12,8,11,5,10,4,3,2,1	70	7,6,8,9,12,11,5,4,10,2,3,1	1076	7,6,9,8,11,12,5,4,10,3,2,1	0,9697
9			7,6,8,9,12,11,5,4,10,2,3,1	40	7,6,9,12,8,11,5,10,4,3,2,1	858	7,6,8,9,12,11,5,4,10,2,3,1	0,9394
10			7,6,9,12,8,11,5,10,4,2,3,1	29	6,7,9,8,12,11,5,4,10,3,2,1	827	6,7,9,8,12,11,5,4,10,3,2,1	0,9697

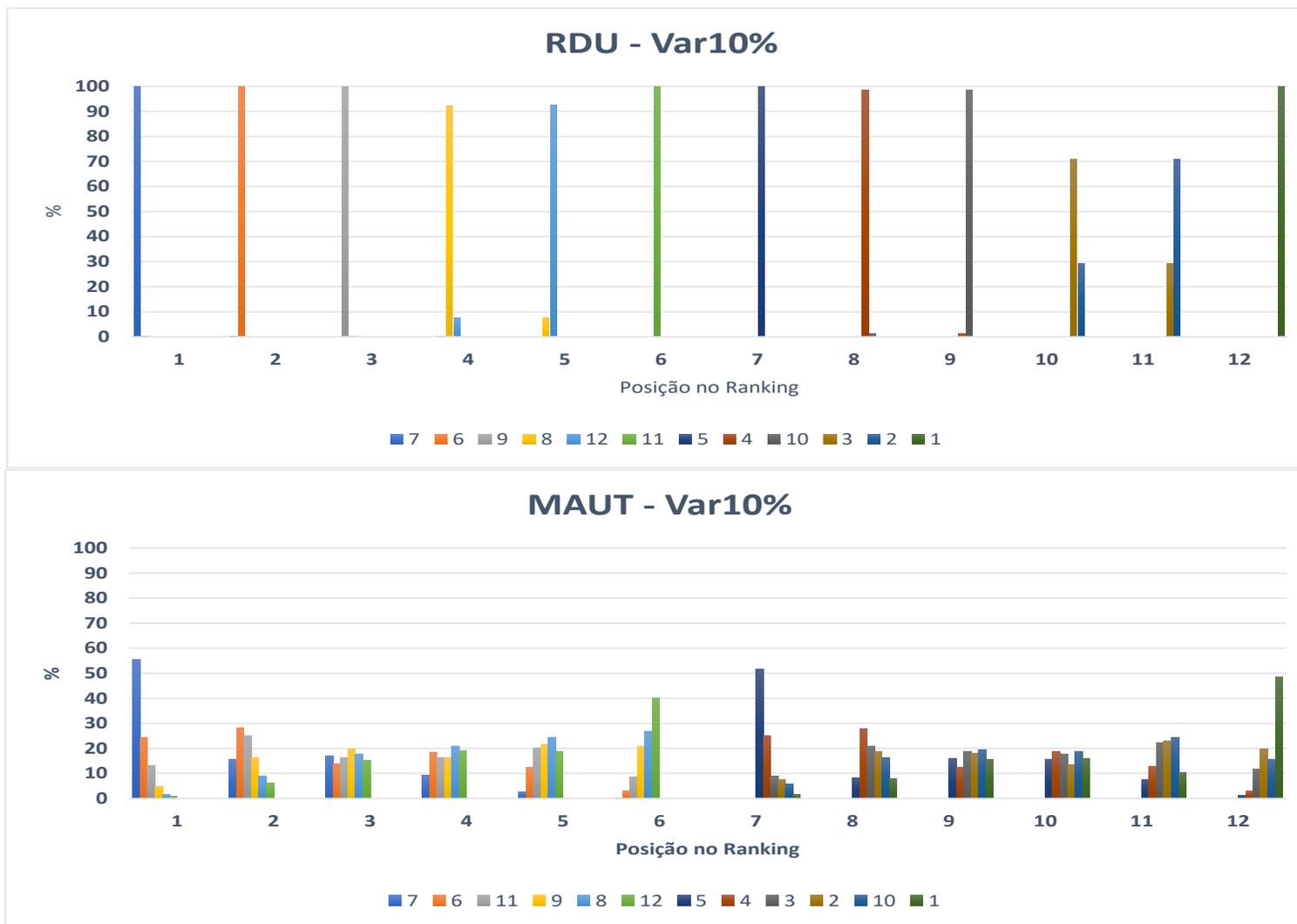
Fonte: A Autora (2020).

Figura B1 - Ordenações Obtidas para S12 5%



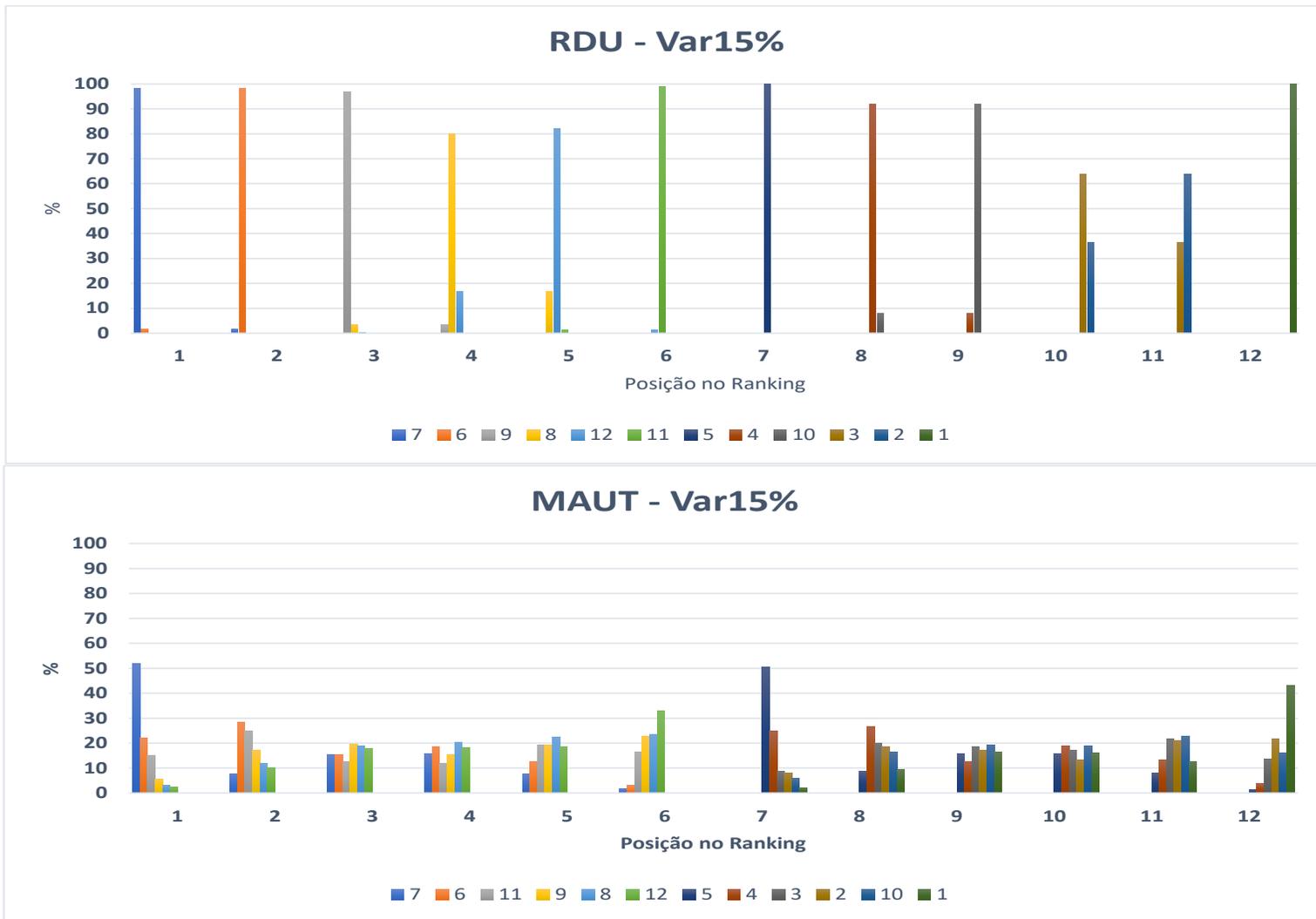
Fonte: A Autora (2020).

Figura B2 - Ordenações Obtidas para S12 10%



Fonte: A Autora (2020).

Figura B3 - Ordenações Obtidas para S12 15%



Fonte: A Autora (2020).

Figura B4 - Ordenações Obtidas para S12 20%



Fonte: A Autora (2020).