



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

FRANCISCO FILIPE CUNHA LIMA VIANA

ANÁLISE DE RISCO MULTIDIMENSIONAL EM GASODUTOS DE GÁS
NATURAL: modelagem multicritério e análise de sensibilidade para apoio a tomada de
decisão

Recife

2020

FRANCISCO FILIPE CUNHA LIMA VIANA

**ANÁLISE DE RISCO MULTIDIMENSIONAL EM GASODUTOS DE GÁS
NATURAL: modelagem multicritério e análise de sensibilidade para apoio a tomada de
decisão**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de grau de mestre 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
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- V614a Viana, Francisco Filipe Cunha Lima.
Análise de risco multidimensional em gasodutos de gás natural: modelagem multicritério e análise de sensibilidade para apoio a tomada de decisão / Francisco Filipe Cunha Lima Viana – 2020.
118 f.: figs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Recife, 2020.
Inclui referências e anexo.
1. Engenharia de Produção. 2. Análise de risco. 3. Gás natural. 4. Teoria da utilidade. 5. ELECTRE TRI. 6. Análise de sensibilidade. I. Almeida, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Alencar, Marcelo Hazin (Coorientador). III. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG / 2021-79

FRANCISCO FILIPE CUNHA LIMA VIANA

**ANÁLISE DE RISCO MULTIDIMENSIONAL EM GASODUTOS DE GÁS
NATURAL: modelagem multicritério e análise de sensibilidade para apoio a tomada de
decisão**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de grau de mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Pesquisa Operacional

Aprovada em: 18 / 02/ 2020

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

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

Prof. Dr. Anísio Brasileiro de Freitas (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

“Não se pode falar de educação sem amor”

Paulo Freire

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter a força e sabedoria para desenvolver este trabalho. À minha família pelo suporte, em especial aos meus pais, Francisca e Francisco que sempre acreditaram nos meus sonhos e deram luz ao que eu acreditava. À minha avó e meu avô, meu irmão, meus tios, meus primos e todos que também sempre estiveram ao meu lado dando o suporte que eu sempre tive para realizar esta empreitada. Aos meus orientadores Prof. Adiel e Prof. Marcelo pelos ensinamentos e orientação, por acreditar em minha capacidade como profissional e pessoal. Aos membros do CDSID, e colegas de turma. Aos amigos. À todos os professores que fizeram parte desta conquista. Por fim, ao CNPQ por proporcionar o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

Sob o panorama de decisão em operações de risco de gasodutos de gás natural, a análise de risco multidimensional tem mostrado notoriedade por adequar contextos necessários para minimização de perdas em âmbito humano, ambiental e financeiro. Sabendo que esta análise, dependendo da concepção de parâmetros físicos e operacionais, está sujeita a incertezas, é crucial a investigação sob as recomendações de gerenciamento do modelo de avaliação. Com base nessa condição, por meio do desenvolvimento de um Sistema de Apoio a Decisão, este trabalho realiza uma Simulação de Monte Carlo para aferir a sensibilidade da avaliação de risco multidimensional para classificar seções de risco de gasoduto de gás natural utilizando o método ELECTRE TRI integrado à Teoria da Utilidade, na qual sua formulação utiliza informações de preferências, consequências de eventos e probabilidades de ocorrência. A partir de variações conjuntas dos parâmetros do modelo de avaliação, este trabalho fornece informações acerca da sensibilidade das seções por meio de testes estatísticos e uma visualização gráfica estruturada para a problemática de classificação, proporcionando uma melhor percepção de risco do sistema. Nesse sentido, mostra-se que, com o auxílio de procedimentos que acessam a incerteza dos modelos de avaliação de riscos, políticas de mitigação de risco podem ser aprimoradas para promover o uso eficiente dos recursos, a garantia de segurança para todos os envolvidos no sistema de transporte de gás e evitar perdas a pessoas, ao meio ambiente e à empresa.

Palavras-chave: análise de risco; gás natural; teoria da utilidade; ELECTRE TRI; análise de sensibilidade.

ABSTRACT

Under the panorama of decision in risk operations for natural gas pipelines, a multidimensional risk analysis is appropriated to minimize human, environmental and financial losses. However, this analysis depends on setting physical and operational parameters that are subjected to uncertainties. Thus, it is crucial to investigate recommendations given by the risk evaluation model. Based on this condition, with the aid of a Decision Support System, this work undertakes a Monte Carlo Simulation to appraise the sensitivity of a multidimensional risk assessment model which uses Utility Theory integrated into ELECTRE TRI to classify pipeline sections into risk categories. Its formulation includes preference information, consequences of events and probabilities of occurrence. Based on joint changes of the model parameters, sensitivity information is provided by means of statistical tests and a structured visualization approach, providing a better risk perception of the system. Thus, it is shown that, with the aid of procedures that evaluate risk uncertainty, actions can be established that applies resources better and more efficiently so as to guarantee acceptable safety levels for all involved in the natural gas transportation system, thereby avoiding human, environmental, financial and company losses.

Keywords: risk analysis; natural gas; utility theory; ELECTRE TRI; sensitivity analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do modelo de decisão para classificação de riscos.....	40
Figura 2 - Árvore de eventos para o vazamento de gás natural e cenários de acidentes	41
Figura 3 - Modelo de análise de sensibilidade proposta.....	55
Figura 4 - Algoritmo para gerar amostra aleatória do vetor de parâmetros do cenário-caso ...	58
Figura 5 - Algoritmo utilizado para calcular o método ELECTRE TRI para o cenário-caso ..	60
Figura 6 - Processo e informações para visualização da Análise de Sensibilidade do modelo	64
Figura 7 - Arquitetura do Sistema de Apoio a Decisão desenvolvido.....	65
Figura 8 - Algoritmo para alocação do procedimento pessimista	77
Figura 9 - Algoritmo para alocação do procedimento otimista	78
Figura 10 - Visualização geográfica das seções	80
Figura 11 - Matriz consequência das seções e classificação original para o procedimento pessimista e otimista	82
Figura 12 - Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe e faixa de proporção para sensibilidade das seções com alfa 0,05 e 0,01 e variação de 5% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1	86
Figura 13 - Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe e faixa de proporção para sensibilidade das seções com alfa 0,05 e 0,01 e variação de 10% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1	85
Figura 14 - Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe e faixa de proporção para sensibilidade das seções com alfa 0,05 e 0,01 e variação de 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1	86
Figura 15 - Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 1	86
Figura 16 - Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 1	87
Figura 17 - Frequência de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1	89

Figura 18 - Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para Cenário-Caso 2.....	89
Figura 19 - Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para o Cenário - Caso 2	91
Figura 20 - Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para o Cenário-Caso 2.....	92
Figura 21 - Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 3	93
Figura 22 - Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 3	95
Figura 23 - Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 3.....	95
Figura 24 - Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 4	97
Figura 25 - Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 4	101
Figura 26 - Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 4.....	101
Figura 27 - Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 5	100
Figura 28 - Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 5	102

Figura 29 - Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 5.....	103
Figura 30 - Níveis de sensibilidade das seções em todos os cenários-casos	108
Figura 31 - Classe mais provável das seções para todos os cenários-casos	108
Figura 32 - Quantidade de seções por classe em todas os cenários-casos.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Elementos visuais e motivação de uso	63
Tabela 2 -	Matriz consequência do problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)	69
Tabela 3 -	Parâmetros do ELECTRE TRI para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)	71
Tabela 4 -	Formulação do índice de concordância	72
Tabela 5 -	Cálculo do índice de concordância para comparação da seção a2 com o critério g1	72
Tabela 6 -	Formulação do índice de discordância	73
Tabela 7 -	Concordância Global para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)	75
Tabela 8 -	Índices de Credibilidade para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)	76
Tabela 9 -	Matriz de relação de preferencias para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010).....	77
Tabela 10 -	Classificação obtida em Brito, de Almeida e Mota (2010)	79
Tabela 11 -	Parâmetros de preferência do ELECTRE TRI	81
Tabela 12 -	Faixa de proporções das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme e alfa para alfa de 0,05 e 0,01 para Cenário-Caso 2	90
Tabela 13 -	Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para o Cenário - Caso 2.....	92
Tabela 14 -	Faixa de proporções de mudança das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para alfa de 0,05 e 0,01 para Cenário-Caso 3	93
Tabela 15 -	Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 3.....	94
Tabela 16 -	Variação das seções nas classes para o procedimento otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 3	96
Tabela 17 -	Faixa de proporções de mudança das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para alfa de 0,05 e 0,01 para o Cenário-Caso 4	97

Tabela 18 - Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 4.....	100
Tabela 19 - Faixa de proporções de mudança das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular e alfa de 0,05 para o Cenário-Caso 5	101
Tabela 20 - Faixa de proporções das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular e alfa de 0,01 para o Cenário-Caso 5	101
Tabela 21 - Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 5.....	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos do Trabalho	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	Estrutura do Trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Fundamentação Teórica	21
2.1.1	Método Multicritério	21
2.1.2	Teoria da Utilidade	23
2.1.3	A abordagem de Risco na Teoria da Decisão.....	23
2.1.4	Método ELECTRE TRI.....	24
2.1.5	Análise de Sensibilidade	25
2.1.5.1	<i>Método Monte Carlo</i>	<i>26</i>
2.2	Revisão Bibliográfica sobre modelos de decisão para gerenciamento de riscos em gasoduto.....	26
2.2.1	Abordagens Multicritério para gerenciamento de riscos em gasodutos.....	26
2.2.2	Análise de Sensibilidade em gasodutos.....	28
2.2.3	Verificação de classificações de risco	28
2.2.4	Processo de Comunicação de Riscos.....	33
2.2.5	Abordagens cognitivas para decisão em Comunicação de Riscos	35
2.2.6	Visualização de Riscos e Incertezas	36
2.3	Síntese do Estado da Arte e posicionamento deste trabalho	37
3	MODELO PROPOSTO PARA O SAD.....	40
3.1	Descrição do Modelo Multicritério com Método ELECTRE TRI e Função Utilidade	40
3.1.1	Identificação dos cenários de perigo e estimação das probabilidades – $\pi\theta$	41
3.1.2	Segmentação do gasoduto em zonas	42
3.1.3	Análise de exposições devido à ocorrência dos cenários	43
3.1.4	Estimação do conjunto de perdas (H, A, F)	43
3.1.5	Elicitação da função utilidade	44
3.1.6	Estimação das funções consequências $Ph, a, f \theta jk, ai$	45
3.1.6.1	<i>Estimação da função consequência humana.....</i>	<i>46</i>

3.1.6.2	<i>Estimação da função consequência ambiental</i>	48
3.1.6.3	<i>Estimação da função consequência financeira</i>	49
3.1.7	Estimação dos riscos	51
3.1.8	Especificação das categoriais dos riscos e perfis	53
3.1.9	Alocação multicritério das seções às categorias de riscos	54
3.2	Modelo para Análise de Sensibilidade	56
3.2.1	Especificação do caso de variação dos parâmetros de entrada	57
3.2.2	Obtenção da amostra de números aleatórios	57
3.2.3	Cálculo da classificação da replicação, <i>clr</i>	60
3.2.4	Significância das classificações replicadas	59
3.2.5	Visualização da informação de risco de sensibilidade das seções	62
4	APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
4.1	Descrição do SAD	64
4.1.1	Entrada de dados	65
4.1.2	Processamento dos dados	67
4.1.3	Saída de dados	68
4.1.4	Módulo de Classificação de Riscos	68
4.1.4.1	<i>SAD na Aplicação 1</i>	69
4.2	Aplicação do modelo	81
4.2.1	Cenário-Caso 1: Variação de todos os parâmetros do modelo	85
4.2.1.1	<i>Análise do Cenário-Caso 1 com distribuição Triangular</i>	84
4.2.2	Cenário-Caso 2: Variação conjunta dos parâmetros que variam por seção	88
4.2.2.1	<i>Análise Cenário-caso 2 com distribuição Uniforme</i>	89
4.2.3	Cenário-Caso 3: Variação conjunta dos parâmetros que variam por seção e cenário	93
4.2.3.1	<i>Análise do Cenário-caso 3 com distribuição Triangular</i>	94
4.2.4	Cenário-Caso 4: Variação dos parâmetros do Fluxo de Calor (I)	96
4.2.5	Cenário-Caso 5: Variação dos parâmetros do Raio Máximo de Perigo	99
4.3	Discussão dos resultados da análise de sensibilidade	107
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
5.1	Conclusões	107
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	108
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

Pelo oitavo ano consecutivo, a produção de gás natural no Brasil apresentou aumento de 5,9% em 2017, acompanhando assim pelo menos a média de 7,2% de crescimento em 10 anos, totalizando 40,1 bilhões de m³ de produção em 2017. No mesmo ano, o Brasil se encontrava na 30ª posição no ranking mundial de produção de gás natural (ANP, 2019).

Com um recuo da geração hídrica, o consumo de gás natural tem sido destinado, em sua maioria, a termoeletricas para suprir a demanda de energia elétrica nacional, que conta agora com o crescimento da atividade siderúrgica de forma mais intensa. O consumo proveniente desta atividade teve crescimento de 15,3% em 2017, tendo assim uma média de geração de 40,1 milhões de m³ por dia (BEN, 2018). Além da utilização como fonte de energia elétrica, o gás natural tem aplicações na indústria automotiva, usada como combustível; e domésticas, como alternativa ao GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), mais comumente chamado de gás de cozinha (Governo do Brasil, 2017).

Em relação à infraestrutura instalada para produção e distribuição, em 2017, contava-se 618 dutos destinados ao transporte de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos, compondo assim, uma malha dutoviária de 19,7 km divididos por função: transferência e transporte. Destes, 151 dutos (14,3 km) foram utilizados para o transporte, e 467, num total de 5,4 km, à transferência. Para o gás natural foi utilizado 110 dutos, estendidos em 11,7 km destinados a movimentar o produto. Quanto ao transporte, o sistema de distribuição brasileiro é abastecido tanto por oferta nacional como por oferta externa, escoando todos os produtos ao longo de estações de recebimento estaduais, portuárias e terrestres, e distribuídos em vias urbanas por transportadoras do setor (ANP, 2019).

Mesmo assim, apesar da considerável estrutura de gasodutos apresentada, o Brasil não possui dados concisos relacionados à segurança operacional. Garcez et al. (2010) explicam que isso é devido a rede de gasodutos no Brasil ser relativamente nova, assim como grande parte ser gerenciada por meio de concessão, o que complica a obtenção de dados.

Além disso, é válido ressaltar que os produtos levados por meio desses dutos apresentam propriedades físico-químicas que quando não controladas e mantidas em condições normais implicam grande potencial catastrófico. Em outras palavras, as falhas nesse tipo de sistema acarretam perdas sérias no que tange aspectos humanos, ambientais e financeiros. Assim, a natureza significativa dessas consequências mostra uma fundamental necessidade de se estabelecer uma gestão de riscos efetiva.

Embora existam bastantes abordagens para avaliação de riscos, ainda há dificuldades sobre como modelar operações que envolvam substancias perigosas, sendo um considerável espaço de estudo. Quanto ao enfoque dado a avaliação de riscos, percebe-se que várias abordagens utilizam perspectivas unidimensionais para o tratamento do risco (GOERLANDT E MONTEWKA, 2015; JAFARI, ZARE E BADRI, 2012), ou seja, somente sob a consequência de um fator isolado. No entanto, modelar riscos requer a avaliação de diferentes contextos do problema, uma vez que estes são impactados a partir de uma grande combinação de aspectos, principalmente por causa da complexidade e regulamentações referentes a sociedade e ao meio ambiente (GARCEZ E DE ALMEIDA, 2014a; BRITO, DE ALMEIDA E MOTA, 2010). Nesse sentido, alguns trabalhos defendem uma abordagem mais apropriada para gerenciar riscos com base em múltiplas dimensões (BRITO E DE ALMEIDA, 2009; BRITO, DE ALMEIDA E MOTA, 2010; LINS E DE ALMEIDA, 2012; ZHANG et al., 2015; MEDEIROS, ALENCAR E DE ALMEIDA, 2016; MEDEIROS ALENCAR E DE ALMEIDA, 2017).

O modelo multicritério desenvolvido por Brito, de Almeida e Mota (2010) comprova que é possível estimar riscos usando múltiplas dimensões adotando uma abordagem bem estruturada para a tomada de decisão. O modelo usa aspectos da Teoria da Utilidade incorporados a problemática de classificação do método multicritério ELECTRE TRI para classificar seções de um gasoduto de gás natural.

Neste ambiente, os modelos quantitativos de riscos estão sempre sob um contexto subjetivo, onde a incerteza é no ambiente de risco um fator considerável, sendo fundamental que se avalie medidas de precaução concisas considerando que a melhor política para a gestão de riscos é estabelecida com base em incertezas (AVEN, 2016b). A Análise de Sensibilidade é um processo de pesquisa associado à incerteza que apresenta fundamentos cruciais para verificar como a variação de parâmetros quantitativos afetam recomendações em modelos quantitativos de risco (MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017).

Nesse contexto, observa-se o trabalho desenvolvido por Medeiros, Alencar e de Almeida (2017) onde uma abordagem é formulada para avaliar a robustez do modelo de riscos multidimensional para ordenação de áreas de gasodutos. Neste, é visto que as mudanças ocorridas nas premissas do modelo ou nos parâmetros de entrada afetam a valoração do risco, tendo assim consequências sob a recomendação final ao decisor, ou seja, quanto à ordenação das áreas de riscos.

Em contribuição a estudos já desenvolvidos no ambiente em contexto, este trabalho explora a robustez do modelo de avaliação de riscos multidimensional utilizado para apoiar a

decisão de classificar seções de gasodutos de gás natural proposto por Brito, de Almeida e Mota (2010). Para tanto, usa-se a Simulação Monte Carlo, variando os parâmetros de entrada do modelo de classificação mediante combinação de diferentes padrões de variação, gerando informações de sensibilidade importantes para o gerenciamento do risco em gasodutos de gás natural.

1.1 Justificativa

No gerenciamento de riscos operacionais, a noção probabilística de perda é utilizada como fator de análise a proposição de políticas de mitigação. O desenvolvimento dessas políticas em certa condição está sob concepção do tomador de decisão, que deve manter o princípio de precaução (PETERSON, 2006) sempre que necessário. No entanto, esse princípio tem algumas controvérsias de interpretação (SRA, 2015). A primeira corresponde à condição que se as consequências de uma operação forem significantes o suficiente e estiverem sujeitas a incertezas científicas, então medidas de precauções ou de bloqueio da operação devem ser tomadas. A segunda refere-se a situações em que existe potencial perigo a pessoas ou ao meio ambiente, mesmo se as evidências sobre o perigo ainda não forem confirmadas, sendo necessário estabelecer ações regulatórias de precaução. Em ambas as interpretações percebe-se que a incerteza é no ambiente de risco um fator considerável, sendo fundamental que se avalie medidas de precaução concisas considerando que a melhor política para a gestão de riscos é estabelecida com base em incertezas (AVEN, 2016b).

Do ponto de vista das ações de mitigação, a complexidade de manter ativos em condições estáveis de forma que riscos sejam reduzidos, e definir níveis de orçamento adequados para organização apresenta uma dificuldade comum na tomada de decisão em processos de gestão da manutenção.

A dificuldade na tomada de decisão é devida principalmente pela insuficiência de conhecimento sobre o comportamento de parâmetros técnicos e as condições de operação atreladas a esses parâmetros, como no caso de degradação, temperatura, pressão e outros (SACCO et al., 2019).

No contexto do gerenciamento de riscos em gasodutos, percebe-se a aplicação de vários modelos de MCDM, mas encontram-se usos limitados em relação a alguns problemas práticos, apontados por Sacco et al. (2019), por exemplo:

- a) Lidar com o conhecimento incompleto dos parâmetros que influenciam operações de rede e, portanto, os valores dos projetos com respeito aos objetivos;
- b) Acomodar a imprecisão na preferência dos tomadores de decisão declarações sobre a importância dos objetivos da decisão;
- c) Considerar sinergias entre os projetos e outras interdependências ou restrições mútuas (por exemplo, a quantidade mínima de projetos por área);
- d) Usar algoritmos de otimização capazes de identificar portfólios de projetos não dominados de um grande conjunto (ou seja, alguns milhares) de alternativas candidatas.

A relevância deste trabalho, portanto, está na construção de um modelo que avalie a sensibilidade de um modelo de avaliação de risco de um sistema de gasodutos de gás natural de forma que riscos associados a humanos, ao meio ambiente e a recursos financeiros sejam minimizados. Assim, fundamentos analíticos para o gerenciamento de riscos são utilizados para facilitar possíveis distorções na tomada de decisão.

Adiciona-se a essa discussão a quantidade de informações geradas em uma avaliação de risco, sabendo da dinamicidade da incerteza é crucial que o decisor analise os diferentes níveis de incerteza dos parâmetros e como a variação desses parâmetros modifica significativamente os resultados. Assim, as informações geradas em modelos de decisão de riscos mudam a percepção no processo de planejamento e mitigação, ainda mais quando níveis de incerteza estão atrelados ao contexto, devido à dinamicidade das interpretações feitas. Estabelecer um processo de gerenciamento que abranja tais informações de forma rápida e precisa garante que o entendimento sob o risco atrelado seja efetivado (EPPLER; AESCHIMANN, 2009).

1.2 Objetivos do Trabalho

Esta seção delinea os objetivos geral e específicos do trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Com base geral, a presente pesquisa tem como objetivo analisar a sensibilidade do modelo de decisão multicritério para avaliação de risco em gasodutos de gás natural proposto por Brito, de Almeida e Mota (2010), a partir da classificação das seções de gasodutos sob a perspectiva multidimensional de riscos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Almeja-se observar o comportamento dos parâmetros de entrada do modelo alcançando os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) para classificação de riscos em gasodutos de gás natural;
- b) Simular dados de entradas no modelo por meio da abordagem Monte Carlo;
- c) Efetivar análise de sensibilidade global das alternativas;

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 5 capítulos, divididos como se segue. O Capítulo I, a Introdução, apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos do estudo. O Capítulo II destaca os fundamentos necessários que embasam esse trabalho bem como apresentação do estado da arte referente à práticas de gestão de risco em gasodutos. O posicionamento e as contribuições obtidas por meio do estudo desenvolvido são apresentados ao final do capítulo, seguido da metodologia abordada.

No Capítulo III é apresentado o modelo detalhado da avaliação de risco de Brito, de Almeida e Mota (2010) e o modelo de Análise de Sensibilidade proposto. No capítulo IV descreve-se o Sistema de Apoio à Decisão, onde são expostos os processos de entrada,

processamento e saída concatenados às etapas aos modelos estudados. No final do capítulo, as discussões acerca da aplicação e os resultados dos cenários-caso são apresentados.

E por fim, o Capítulo V apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos conceituais utilizados para realização desta dissertação e a revisão bibliográfica tida como referência.

2.1 Fundamentação Teórica

Os conceitos utilizados para este trabalho elucidam as considerações sobre Método Multicritério, Método ELECTRE TRI, abordagens tradicionais para Análise de Sensibilidade, trabalhadas em gerenciamento de riscos para gasodutos, a estruturação do modelo explorado para este estudo, seguido por análise de sensibilidade, e por fim, o método Monte Carlo de simulação.

2.1.1 Método Multicritério

A tomada de decisão em ambientes que exigem o manuseio de grandes quantidades de informações é uma tarefa árdua e difícil de resolver. A situação se torna ainda mais desafiadora quando as decisões precisam ser tomadas em conjunto ou negociadas por muitos tomadores de decisão, cada um com seus próprios pontos de vista e preferências (DE ALMEIDA; WACHOWICZ, 2017). Por esses motivos, surge a necessidade de um mecanismo que seja capaz de auxiliar na caracterização de cenários tão complexos (JATO-ESPINO et al., 2014).

É dessa carência que os métodos de decisão multicritério (MCDM/A) surgiram com o intuito de apoiar decisores na resolução de problemas específicos, encontrando soluções sob diferentes critérios ou pontos de vista conflitantes (ROJAS-ZERPA; YUSTA, 2015). Ressalta-se que não existem métodos melhores ou piores para solucionar problemas de decisão com vários critérios, mas existem métodos mais adequados que outros para determinados problemas (KHISHTANDAR; ZANDIEH; DORRI, 2017). Além disso, quando se trata de MCDM/A, não existe apenas uma solução que seja ótima para todos os critérios de forma simultânea, ou seja, não há uma busca objetiva pela melhor solução (VINCKE, 1992). A solução mais adequada é a que fica mais próxima à estrutura de preferências de um dado decisor.

Nesse paradigma, as metodologias multicritério são utilizadas mediante uma vasta variedade de campos de ação, tais como: gerenciamento de resíduos (ACHILLAS et al., 2013); na assistência à saúde (ADUNLIN; DIABY; XIAO, 2015) em sistemas de energias renováveis

(STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016); no contexto de manutenção e confiabilidade (DE ALMEIDA et al., 2017), entre outros.

À luz das considerações supracitadas, De Almeida et al. (2015) apresentam as etapas para definir um modelo multicritério, detalhadas através de 12 passos que são subdivididos em três fases: *Fase I – Fase preliminar*: Ocorre a caracterização dos decisor(es) e outros atores, identificando os objetivos, estabelecendo os critérios e o espaço de ações, bem como a problemática. Além disso, são identificados os fatores não controlados. *Fase II – Modelagem de preferências e escolha do método*: Efetua-se a modelagem de preferências e as avaliações intracritério e intercritério. *Fase III – Finalização*: As alternativas são avaliadas. Por fim, uma análise de sensibilidade é aplicada para verificar a robustez do modelo. Após analisar os resultados e elaborar recomendação, implementa-se a decisão. A construção do modelo é baseada em uma abordagem sucessiva de refinamento, a partir de uma sequência estruturada para solução de problemas com vários critérios. Conforme supracitado, a primeira fase leva à estruturação do problema, na qual os elementos de um problema MCDM/A são explorados e expostos. A modelagem de preferências, segunda etapa do procedimento, refere-se à exploração dos julgamentos do tomador de decisão. Considerado o mais flexível, porque depende do método, explora profundas compreensões sobre o problema tratado. Finalmente, a terceira fase refere-se à resolução do problema de decisão impulsionado pela escolha e implementação da decisão. Vale ressaltar que a etapa de análise de sensibilidade é importante para garantir a acurácia da tomada de decisão. Este procedimento é aplicado pelos autores em uma avaliação de risco para modais de transporte de materiais perigosos, usando o MAUT como referência, através do qual, por meio de perguntas e respostas, que seguem uma abordagem axiomática, o comportamento do tomador de decisão (julgamentos) é identificado considerando sua percepção de propensão, neutralidade ou aversão a riscos iminentes. Dessa forma, o tomador de decisão pode definir ações de mitigação, priorizando as alternativas com maior concepção de risco, tendo em vista as múltiplas dimensões em consideração. Diversas aplicações utilizam o MAUT como prática para situações semelhantes ao modelo descrito nesta seção (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010; BRITO; DE ALMEIDA, 2009; BRITO; DE ALMEIDA; MOTA, 2010; GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014; LINS; DE ALMEIDA, 2012; PERGHER; DE ALMEIDA, 2018).

2.1.2 Teoria da Utilidade

A Teoria da Utilidade é uma parte essencial da estrutura teórica associada a Teoria da Decisão. De acordo com De Almeida et al. (2015), a Teoria da Utilidade é o desenvolvimento de um modelo matemático por meio do qual seja possível representar a desejabilidade do decisor pelos bens que ele poderá obter. Assim, A Teoria da Utilidade viabiliza a quantificação dessa desejabilidade na qual aos bens são associados valores de critérios de medida do decisor.

Gomes et al. (2006) explica que por meio de um processo de elicitación e preferencias, as consequências de um problema de decisão são utilizadas para entender o comportamento do decisor em relação ao risco. Dessa forma, cria-se uma escala de avaliação, a escala de utilidade, na qual para cada valor de consequência de análise se é atribuído um valor de utilidade, viabilizando um caráter de incerteza para avaliação. Mais detalhes para os conceitos e formulações da Teoria da Utilidade podem ser encontrados em Campello de Souza (2002).

2.1.3 A abordagem de Risco na Teoria da Decisão

A Teoria da Utilidade de von Neumann e Morgenstern apresenta uma abordagem axiomática possível de avaliar o comportamento do decisor em relação ao risco (KEENEY; RAIFFA, 1976) de ter várias perdas. Isso é aplicado para cada dimensão de risco, isto é, no processo de avaliação intracritério.

Seja D um o conjunto de todas as consequências de uma determinada dimensão de impacto, entre o conjunto de dimensões sob análise. Em um contexto de problema de decisão, são os fatores de análise do problema, os estados da natureza θ , os cenários acidentais resultantes de um evento de acidente e seus impactos sob uma determinada dimensão de resultados. Uma abordagem probabilística é usada para lidar com incertezas em D através de uma distribuição de probabilidade sobre as consequências determinísticas e para extrair as funções de utilidade para essas consequências.

Dentro de uma abordagem de análise de decisão (BERGER, 1985), e um conjunto de cursos de ação definido por alternativas (a_i), o risco é avaliado como a perda esperada, estimada para cada curso de ação (a_i), de acordo com a seguinte equação:

$$r(a_i) = E_{\theta} L(\theta, a_i) = \sum_{\theta} \pi_{i(\theta)} \cdot L(\theta, a_i) \quad (1)$$

Onde $\pi_{i(\theta)}$ é a probabilidade de cada estado da natureza ou cenário acidental, quando a alternativa é a_i e $L(\theta, a_i)$ é a perda quando o cenário θ e a alternativa a_i são considerados.

A perda é obtida pela combinação da probabilidade sobre as consequências determinísticas p em D (função de consequência denominada, $P(p|\theta, a_i)$) e a função de utilidade sobre essas consequências (representada por $U(p)$, onde $p \in D$), conforme a seguinte equação:

$$L(\theta, a_i) = - \int_p P(p|\theta, a_i) U(p) dp \quad (2)$$

Vale ressaltar que foi utilizada a notação tradicional para análise de decisão (e teoria da utilidade) na literatura (incluindo as referências fornecidas), em que p (do payoff) denota um elemento do conjunto de resultados D , enquanto P (capital P) refere-se a uma probabilidade (que é um payoff probabilístico).

Substituindo (2) em (1), obtém-se que:

$$r(a_i) = - \sum_{\theta} \pi_{i(\theta)} \cdot \int_p P(p|\theta, a_i) U(p) dp \quad (3)$$

Portanto, a perda (risco) esperada pode ser calculada para cada alternativa sob cada critério, conforme Eq. (3) e é capaz de incorporar a atitude do decisor em relação ao risco por meio da elicitacão da utilidade.

2.1.4 Método ELECTRE TRI

O método multicritério de apoio à decisão ELECTRE TRI (ROY, 1996; DIAS et al., 2002) lida com a problemática de classificação usando uma estrutura não compensatória de preferencias, em que se classifica uma dada ação a_i , de um dado conjunto A , a uma classe C_h . Cada classe apresenta dois limites, um inferior e um superior, os quais são chamados de perfis b_h e b_{h-1} . Através de comparações sistemáticas entre as ações e tais perfis, o método usa do conceito de sobreclassificação para estabelecer relações binárias entre a_i e b_h . Cada afirmação $a_i S b_h$ precisa ser validada por um índice de credibilidade que corrobora a sobreclassificação do par em análise dado por $\sigma(a_i, b_h)$. Para isso, o índice deve ser maior ou igual do que o nível de corte λ (ROY E BOUYSSOU, 1993):

$$a_i S b_h \leftrightarrow \sigma(a_i, b_h) \geq \lambda \quad (4)$$

A alocação das ações em cada categoria depende da escolha do procedimento, pessimista ou otimista. O primeiro considera a alocação da ação a categoria mais alta C_h , tal que a_i sobreclassifica b_{h-1} e a_i é sobreclassificada por b_h . Essa relação é representada como se segue (BRITO, DE ALMEIDA E MOTA, 2010):

$$a_i \rightarrow C_h \leftrightarrow \sigma(a_i, b_{h-1}) \geq \lambda \text{ e } \sigma(a_i, b_h) < \lambda \quad (5)$$

Sob o contexto de riscos, a intenção ao utilizar o método é indicar a intervenção mais adequada para proteger zonas de riscos baseado na potencialidade da classe de risco, risco alto ou risco baixo. Entre as áreas de aplicação tem-se: zona de riscos de gasodutos para gás natural (BRITO, DE ALMEIDA E MOTA, 2010), manutenção de áreas para distribuição de água (TROJAN; MORAIS, 2012), avaliação de políticas para promover inovações tecnológicas no setor elétrico (DIAS et al., 2018a).

2.1.5 Análise de Sensibilidade

Modelos sistemáticos auxiliados por computador se tornaram ferramentas essenciais em muitas análises em áreas como em ciências naturais, física, engenharia e financeira. Os modelos utilizados para simular a realidade ajudam no processo de tomada de decisão, no entanto a dificuldade instaurada nesse tipo de abordagem é a efetiva escolha dos parâmetros (GAN et al., 2014). Alguns trabalhos retratam (KAVETSKI; KUCZERA; FRANKS, 2003) que definir os parâmetros de um modelo não é problema trivial, pois as combinações de diversos problemas como erros em dados observados e formulação do modelo podem afetar consideravelmente a resposta do modelo.

Em um contexto de tomada de decisão a Análise de Sensibilidade (AS) avalia como as incertezas de um parâmetro (ou um conjunto desses parâmetros) afetam o resultado de um modelo numérico (PIANOSI; WAGENER, 2015; SALTELLI et al., 2008). Dessa forma, a AS é utilizada com o propósito de observar como os parâmetros influenciam o desempenho do modelo, para assim identificar quais são os valores mais adequados para tais. Assim, essa análise é significativa para entender como a recomendação final ao decisor é impactada por tais variações (MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016).

De forma geral, pode-se classificar a AS mediante o processo de variação dos parâmetros: de forma local, em que um parâmetro escolhido é variado, ou de forma global, observando-se como a variação de várias fontes de incertezas modifica o resultado final

(MARKERT; MELIDEO; BARALDI, 2014; SILVA MONTE; TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO, 2015; WEINER, 2014).

Em ponto de vista prático, pode-se adotar diversas estratégias para AS, dentre as quais citam-se: adoção de uma faixa de variação, simulação Monte Carlo, análise diferencial, teste de amplitude de Fourier (HELTON, 1993).

2.1.5.1 Método Monte Carlo

A Simulação Monte Carlo (SMC) é uma abordagem que mensura incertezas de parâmetros assumindo distribuições de probabilidades (SHIELDS et al., 2015), gerando várias replicações de um determinado parâmetro. A cada replicação, um conjunto de amostras de um parâmetro é simulado, em alguns casos utilizando algumas estratégias de replicação (PASMAN; ROGERS, 2012) e obtendo assim dados iniciais para executar um modelo numérico.

2.2 Revisão bibliográfica sobre modelos de decisão para gerenciamento de riscos em gasoduto

Esta seção trata das abordagens utilizadas em contextos de gerenciamento de riscos em sistemas operacionais que utilizam gasodutos, definindo a amplitude no que concernem os conceitos atrelados a modelos quantitativos para avaliação de risco, tendências e convenções sobre como melhor instituir um processo de gerenciamento de riscos para gasodutos.

2.2.1 Abordagens multicritério para gerenciamento de riscos em gasodutos

O transporte por meio de dutos é consideravelmente um modal importante para gerenciar materiais perigosos de uma maneira segura (WITKOWSKI et al., 2017). No entanto, acidentes industriais envolvendo essa estrutura colocam em risco de explosões, exposição ao fogo e materiais tóxicos, uma preocupação para o meio ambiente, incluindo pessoas, animais, vegetação e infraestrutura (ADGATE; GOLDSTEIN; MCKENZIE, 2014). Portanto, uma grande atenção tem sido dedicada à avaliação de riscos para operações que lidam com produtos químicos perigosos que são transportados por via de dutos, como o hidrogênio (ALENCAR;

DE ALMEIDA, 2010), gás natural (BRITO; DE ALMEIDA, 2009), CO₂ (KOORNNEEF et al., 2009) e outros.

A partir da adição de julgamentos de um decisor, é possível modelar ações de planejamento, controle e prevenção tal que se mitigue perdas em gasodutos. Um exemplo sobre a estruturação inicial de ações como estas é delineado em Brito e de Almeida (2009), os quais propõem um modelo estocástico usando a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) para obter uma ordenação de seções de riscos de um gasoduto de gás natural em ordem de grandeza de risco. De forma semelhante, Alencar e de Almeida (2010) usa o MAUT para a mesma problemática no gerenciamento de operações de gasodutos de hidrogênio sob o ponto de vista de multicritério, adotando dimensões de análise humana, ambiental e financeira. Para calcular o risco geral de cada seção, as constantes de escala e as funções utilidade das três dimensões são obtidas através de um processo de licitação baseado no MAUT (KEENEY; RAIFFA, 1976).

Nos casos em que é necessário fazer classificações de áreas de risco em categorias, não há necessidade de agregar o risco associado a cada seção. A relação de sobreclassificação é acreditada por perfis (limites) das categorias, nas quais, por meio de comparações entre pares, são construídas relações de dominância entre as magnitudes das consequências dos riscos (BRITO; DE ALMEIDA; MOTA, 2010).

Lins e De Almeida (2012) propõe um modelo de decisão multicritério para avaliar o risco em dutos de hidrogênio desenvolvendo dimensões de análise mais detalhada no contexto humano e ambiental, diferentes dos estudos de Alencar e de Almeida (2010) e Brito e de Almeida (2009). Neste a dimensão humana é avaliada sob dois sub-níveis: fatalidade e lesões. A dimensão ambiental é desagregada em duas abordagens: área de impacto ambiental e área de diversidade ecológica, sendo um modelo mais abrangente.

2.2.2 Análise de sensibilidade em gasodutos

O relatório fornecido pelo Grupo Europeu de Dados sobre Incidentes com Gasoduto (EGIG 2018) mostrou que as principais causas de acidentes em gasodutos no período de 2007 a 2016 foram devidas a interferências externas (28%), corrosão (25%), defeito de construção (18%) e movimento do solo (15%). Além das origens das causas, as evidências de variações dessas causas em muitas situações são regidas por incertezas, mostrando a importância de investigar quais fatores e como eles podem afetar a magnitude dos eventos de perda em tubulações de materiais perigosos.

Antes dos resultados dos modelos de risco orientarem a aplicação no processo real de elaboração de políticas, uma sensibilidade efetiva deve ser desenvolvida para que uma avaliação adequada possa cobrir todos os cenários possíveis em relação ao gerenciamento de riscos (BORGONOVO; HAZEN; PLISCHKE, 2016). Como um exemplo, interações entre parâmetros operacionais são observadas através de um gasoduto em López-Benito and Bolado-Lavín (2017). Uma combinação de parâmetros diferentes é verificada para identificar a entrada mais relevante que afeta as quedas de pressão e temperatura no transporte do gás. Acontece que a dependência entre os parâmetros surge em duas situações: quando as condições físicas são impossíveis operacionalmente e quando alguns parâmetros estão relacionados à inviabilidade tecnológica e econômica. Como abordado por Medeiros, Alencar e de Almeida (2017), a análise de sensibilidade no contexto de gasodutos de gás natural considera parâmetros de condição física, probabilidades de falha nos gasodutos e diferentes cenários de avaliação (*patterns*).

2.2.3 Verificação de classificações de risco

A validação de métodos quantitativos de riscos depende do seu uso, mas algumas abordagens são utilizadas como instrumento em relação à avaliação da evidência a favor ou contra os métodos utilizados em risco (GOERLANDT; KHAKZAD; RENIERS, 2017). A primeira se refere à acurácia da estimativa total do sistema de risco em relação à tomada de decisão. Por exemplo, em problemáticas de classificação, seleção, ordenação ou aceitação do risco. A segunda abordagem remete a verificação em relação à utilidade do custo-benefício em segurança ganhos, destacando a exploração das compensações de risco em outras perspectivas. Por fim, usa-se uma abordagem relacionada à utilização dos métodos quantitativos, onde este

avaliar práticas relacionadas a comportamentos de segurança ou a utilização de métodos qualitativos (RAE; ALEXANDER; MCDERMID, 2014).

Os dados resultantes do ELECTRE TRI são gerados a partir de um conjunto de categorias que foram pré-determinadas *a priori*, ou seja, são categorias ordenadas e pré-definidas antes de qualquer manipulação matemática que gere um dado nominal de classificação. Este tipo de configuração é comum em problemas de finanças, medicina e economia (ZOPOUNIDIS; DOUMPOS, 2002a), definido por Almeida Dias (2011) como um tipo de *classificação supervisionada*, ou categorias ordenadas e filtradas por preferência (PERNY, 1998). Por outro lado, Almeida Dias (2011) comenta que existem outros tipos de métodos, ditos como de *classificação não supervisionada (a posteriori)*, problemas de classificação em que as categorias não são ordenadas e são filtradas por indiferença, tal definição de sexo, cor e outros.

Para o segundo caso, o problema de classificação é voltado para o agrupamento de elementos em um espaço em que esses elementos não são alocados em nenhuma categoria prévia, ou seja, o problema não possui informações anteriores para indicar uma referência na classificação, como é visto com os perfis das classes do ELECTRE TRI. A associação para estes tipos de métodos é voltada somente para a natureza dos dados, como em manipulações que usam medidas de distância (ROCHA; DIAS; DIMAS, 2013). Como exemplo citam-se métodos como regressão múltipla, k-médias, agrupamento (*clustering*) e aprendizado de máquina (*machine learning*) (ALMEIDA DIAS, 2011).

Para se escolher uma avaliação eficaz para problemas de classificação é necessário discutir a natureza dos dados obtidos quando algoritmos de classificação são utilizados. Portanto, independente do tipo de classificação (*a priori* ou *a posteriori*), o resultado obtido é caracterizado como conjunto de dados nominais, pois dado a classificação dos elementos, a ordem destes não interfere na classificação obtida. Demonstra-se assim, um conjunto B de elementos classificados, e R uma relação binária entre os elementos, em que não existe nenhum tipo de relação de ordem R em B para todos os elementos de B.

$$R = \emptyset (\nexists R \forall b \in B) \quad (6)$$

Ou seja, para outro elemento $x \in B$, não existe relação entre x e b .

$$\sim(x > b) \vee \sim(b > x) \quad (7)$$

Assim sendo, apesar das classes terem sido já ordenadas, os dados de saída dos métodos de classificação *supervisionados* ou *não supervisionados* são puramente nominais, não sendo possível utilizar qualquer tipo de estatística descritiva que mensurem a variação diretamente.

Levando em conta essa afirmação, discute-se como a robustez de métodos de classificação é avaliada na literatura.

Primeiramente, é preciso expor que a quantidade de dados trabalhados interfere no modo como os dados são observados. Em outras palavras, se o número de amostras for muito pequeno é inviável utilizar um método que analise dados categorizados, tais como *Pearson chi-squared statistic* ou *Likelihood-Ratio Statistic* (AGRESTI, 2007). Caso os dados sejam suficientes para atender a premissa de frequência esperada por classe maior que 5 é possível utilizar tais testes para entender a variação categórica. Coeficientes de correlação como Phi, V de Cramer, coeficiente de contingência, e outros generalizam o teste de Qui-Quadrado para obter um índice que indique possíveis mudanças nas categorias (SIEGEL; N. JOHN, 1988).

A restrição do número de trechos trabalhados no problema de Brito, de Almeida e Mota, (2010) dificulta o tratamento das classificações geradas por métodos estatísticos mais conhecidos como os apresentados.

No contexto a problemática de classificação, muitas abordagens são utilizadas no meio científico, muitas delas são relacionadas à MCDM/A, Otimização Multi-objetivo e Análise Estatística Multivariada. Citam-se dentre as abordagens: análise de agrupamento, regras de decisão, *rough sets*, *fuzzy sets*, redes neurais, *pattern recognition*, aprendizado de máquina, análise discriminante e medida axiomática (ALMEIDA DIAS, 2011; ZOPOUNIDIS; DOUMPOS, 2002b).

Em algoritmos de aprendizado de máquinas, as classificações são analisadas por métricas que indicam como os modelos induzem mudanças nos seus resultados finais a partir de um fluxo de dados contínuo, citam-se: *precision*, *recall*, F_1 e outros (FLACH; KULL, 2015). Em outras palavras, estas métricas visam analisar proporções de mudanças quando os algoritmos de classificação são executados.

No caso do estimador *recall* (rc_r), por exemplo, mede-se a relação de categorias previstas corretamente com o algoritmo pelo número total de indivíduos previstos (FLACH; KULL, 2015), ou seja, cada elemento classificado é checado para averiguar a mudança de classificação em relação à classe original. Se a classificação original é preservada, então o elemento recebe o valor de 0, caso contrário, recebe 1. Assim, no caso de R replicações simuladas, o *recall* da replicação r equivale à razão da soma dos valores binários de mudança, oc_h , adotados para o elemento e a quantidade de indivíduos classificados, N .

$$rc_r = \frac{oc_r}{N} \quad (8)$$

Sob a noção de informação em mudanças na avaliação de riscos, Borgonovo et al. (2018) declara que o valor gerado a partir de medidas de risco é um elemento importante para formalizar a percepção de risco em instâncias gerenciais e, à luz da sensibilidade, estas informações corroboram as mudanças na tomada de decisão.

Para o âmbito de MCDM/A, a robustez em classificação multicritério é definida como uma propriedade dos resultados gerados. Mousseau et al. (2003) explica que a alocação de alternativa é robusta quando a mesma é posta na mesma classe usando todos os parâmetros de preferência compatíveis com as informações do decisor. Em alguns casos, as informações fornecidas por interação do decisor, como os pesos, podem afetar profundamente a decisão final sobre o problema trabalhado. Portanto, o uso de simulação traz um entendimento profundo sobre os possíveis efeitos sob o modelo (BUTLER; JIA; DYER, 1997).

De maneira similar, Vetschera et al. (2010) delineia uma abordagem que interpreta a robustez como uma propriedade que pode ser mensurada em uma escala cardinal. Ou seja, através de índices que absorvem a sensibilidade de mudança do resultado, a classificação obtida com os métodos utilizados é testada sob diversas hipóteses de incerteza de forma a verificar a robustez. Os autores usam a Simulação Monte Carlo para responder diferentes questões de mudanças nas classificações quando a quantidade de alternativas muda. A vertente do trabalho se baseia na suposição que uma alternativa é robusta se a mesma é alocada sempre a mesma classe usando todos os parâmetros de preferências instituídos por um decisor (TERVONEN et al., 2009).

De forma mais específica, o estudo explora os efeitos da variação dos pesos dos critérios nos resultados de classificação, assumindo que não há incerteza na consequência das alternativas. Primeiramente, um grupo de vetores de pesos compatíveis com preferências iniciais do decisor é gerado, onde o *índice de compatibilidade*, I_C interpreta a probabilidade que um parâmetro aleatoriamente obtido é consistente com a informação de preferência instituída pelo decisor. Por exemplo, de um volume de dados vetores, quais deles são próximos dos valores do decisor. Se o valor desse índice é alto, então o decisor precisa fornecer mais informação para aumentar a precisão do vetor de pesos (DIAS; MOUSSEAU, 2003). A Análise de Sensibilidade neste ponto ainda não verifica os resultados (*output*) do modelo de classificação.

Por conseguinte, a influência desses vetores de pesos é analisada observando se classificações diferentes são geradas. E, para isto, usam-se duas métricas:

- Índice de Validação, $I_v(a_i)$: tomando a_i originalmente classificada em um grupo $t(a_i)$, e $p(s_g)$ a probabilidade que a_i é incluída em um grupo s_g (neste estudo grupo é tratado como uma classe) com qualquer vetor de parâmetros compatíveis, o índice de credibilidade expressa a probabilidade que a_i seja classificada no grupo original.

$$I_v(a_i) = p(S_{t(a_i)}) \quad (9)$$

Com a média global desse índice é possível inferir sobre quão diferente as classificações estão sendo a cada replicação. Conceitualmente, este índice é semelhante ao índice *precision*, ou seja, se o índice de validade se aproxima de zero, então a classificação simulada não corresponde a original, mas para um valor próximo de um indica que o método está direcionando sempre a mesma classificação.

De forma complementar ainda é possível estabelecer aquelas alternativas que podem apresentar maior probabilidade em um outro dado grupo:

$$m(a_i) = \operatorname{argmax} p(S_g) \quad (10)$$

Ou seja, durante as replicações, a alternativa cai em uma região de uma classe mais provável que é diferente da original, isso mostra que as distribuições das classes são desiguais.

- Índice de Robustez, $I_r(a_i)$: corresponde a probabilidade que uma alternativa caia em um grupo mais provável. Calculando a média deste índice de todas as alternativas, tem-se um índice global que quanto mais aproximado de 1 significa que as alternativas tendem a ser classificadas no grupo original (classe original), enquanto que um valor baixo implica que as alternativas têm uma dispersão na distribuição da sua classificação.

$$I_r(a_i) = p(S_{m(a_i)}) \quad (11)$$

Vetschera et al. (2010) comentam que se esses índices forem iguais, o grupo mais provável das alternativas será o mesmo da classificação original. Caso contrário, o índice de robustez ficará mais próximo de 1, pois o mesmo leva em consideração o grupo com a probabilidade mais alta ou mais provável. Uma grande diferença entre esses dois índices indica classificações diferentes do padrão original com as preferências do decisor, o que indica falta de robustez do modelo diante de possíveis níveis de incerteza. Assim, toma-se como base que a robustez de um modelo de classificação é afirmada quando uma alternativa é atribuída para mesma classe usando todos os parâmetros de preferência compatíveis com a informação fornecida pelo decisor (MOUSSEAU et al., 2003; TERVONEN et al., 2009).

Tervonen et al. (2009) introduzem uma abordagem para avaliar as possíveis mudanças no resultado do ELECTRE TRI baseada na análise do espaço de parâmetros regidos por incerteza. Essa abordagem chamada de SMAA-TRI (*Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis for ELECTRE TRI*) gera a avaliação dos critérios levando em conta distribuições arbitrárias a fim de descrever os valores dos parâmetros (pesos, perfis e nível de corte) que atribuem uma alternativa a diferentes categorias. A variação do resultado do método é medida por um índice de aceitabilidade da categoria, que indica a estabilidade da classificação para cada classe, indicando assim robustez em relação à flutuação dos parâmetros testados.

De forma geral, os índices traduzem mudanças na classificação ao longo de experimento estocástico, ou seja, a proporção de mudança da classificação, por exemplo, o quanto um resultado é congruente ao resultado inicial dado um ambiente de incerteza, tido como a robustez do modelo. Sobre isto, Belton e Stewart (2002) define uma solução como robusta se o volume da região em que a alternativa escolhida permanece ótima é grande comparada a regiões em que outras alternativas são ótimas. Por exemplo, a frequência em que a alternativa no estado inicial é selecionada em comparação a seleção da alternativa em outro estado.

2.2.4 Processo de Comunicação de Riscos

O consenso sobre o processo de comunicação de riscos envolve um procedimento interativo das partes interessadas, de âmbito público e privado, em que haja garantia da efetividade e o desenvolvimento de percepções de riscos condizentes mediante possíveis crises (ROTH, 2012). Nesse sentido, a utilização de elementos visuais é uma forma prática para que o procedimento gere as informações necessárias para criação de conhecimento relacionada a riscos (EPPLER; AESCHIMANN, 2009). Por isso, é importante que o tratamento das informações geradas durante todas etapas de avaliação sejam utilizadas de tal forma que a tomada de decisão esteja em um nível de confiança considerável (MEDEIROS, ALENCAR e DE ALMEIDA, 2017). Pode-se usar combinações de figuras gráficas, tabelas e textos na apresentação dos resultados no intuito de criar intuições, reflexões e imagens mentais nos decisores. Portanto, é importante que a exibição gráfica do risco transmita a informação correta (ABRAHAMSEN et al., 2014), mais ainda porque em algumas situações vieses cognitivos podem levar a interpretações precipitadas (GIGERENZER, 2015).

No processo de avaliação de riscos, a visualização de riscos desempenha um papel de comunicar facilmente a imagem da operação de risco para todos na organização, de modo que

a percepção do risco seja factual. Assim, devido à natureza dinâmica incerta dos cenários nas operações de risco, há uma demanda constante para analisar os níveis de risco, portanto, sendo um ponto particular a ser enfatizado na comunicação do risco. Matrizes, mapas e gráficos de risco são frequentemente usados nesses casos (ALE; BURNAP; SLATER, 2015; GOERLANDT; RENIERS, 2016; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016) metáforas visuais e técnicas de mapeamento (EPPLER; AESCHIMANN, 2009).

No entanto, muito se discute da forma como o risco deve ser apresentado, pois a quantidade de informação pode não ser adequada para o contexto, principalmente em ambiente organizacionais, estratégicos em que análises detalhadas são desconsideradas. Então, a intenção é que tomadores de decisão tenham a ideia sobre risco de forma rápida e clara (ABRAHAMSEN et al., 2014).

Além disso, Roth (2012) esclarece que a comunicação do risco é problemática devido a complexidades e ambiguidades de muitos contextos de risco, além do que a manipulação do risco na atualidade envolve um crescente fluxo de dados, modelos matemáticos complicados e algumas vezes uma linguagem própria dos especialistas.

Muitas são as diferentes propostas as quais o risco é incorporado sob elementos visuais, Maggioli et al. (2017) avalia o risco permitindo o analista ponderar diferentes modificações de cenários alternativos e, através de um mapa, identifica incêndios por jatos líquidos em uma instalação de petróleo e gás. Sob uma perspectiva mais gráfica, Aitken (2017) usa indicadores de performance KPI (*Key Performance Indicators*) que refletem o controle de operações que estão sob risco. Além disso, Medeiros, Alencar e de Almeida (2016) apontam que as informações devem ser condensadas, para que informações irrelevantes não afetem decisões finais adversamente. Assim, a análise gráfica é comumente usada para criar cognição sobre condições de risco. Medeiros, Alencar e de Almeida (2017) exploram a melhor maneira de descrever as informações de risco ao definir uma análise de risco multidimensional referente a Brito e de Almeida (2009) para um sistema de gás natural. Eles desenvolvem um processo estruturado para gerar informações para o decisor demonstrando níveis de incerteza nos resultados dados pela instabilidade dos parâmetros. O processo de tomada de decisão é agregado, ou seja, visualizando informações de validação estatística sobre o método de priorização usado.

O objetivo básico dessas abordagens não é a mera demonstração das informações de risco, mas a comunicação por todo o ciclo de gerenciamento de riscos, fazendo com que a lógica de um processo de comunicação de riscos seja realmente eficaz para mitigar perdas.

Borgonovo et al. (2018) declara que o valor gerado a partir de medidas de risco é um elemento importante para formalizar a percepção de risco em instâncias gerenciais e, à luz da sensibilidade, as informações corroboram as mudanças nas tomadas de decisão. Assim, a relevância deste trabalho é fundamentada sob considerações sobre como os processos de comunicação são insipientes da ideia de incerteza dado em Fischhoff (1995), e também, pela afirmação feita em Spiegelhalter, Pearson, Short (2011) que há pouco progresso nas representações que tratam de ambientes de incerteza.

2.2.5 Abordagens cognitivas para decisão em Comunicação de Riscos

Visto isso, Roth (2012) conceitua que a forma convencional de comunicação do risco é através de diagramas, sendo utilizados para reduzir a complexidade dos dados através da omissão deliberada de aspectos, considerados muitas vezes, não essenciais para a percepção. O pensamento sob estes aspectos é que permite a mente humana usar da memória fotográfica para perceber informações e resolver problemas, o caso em que se alcance o princípio de precaução (PETERSON, 2006). Assim, a estratégia para a escolha de uma forma gráfica do risco deve ser baseada nas características do usuário para responder questões específicas relativas ao gerenciamento.

Um eficiente processo de visualização constitui uma base conceitual informacional onde o decisor é objeto central para aumentar a percepção, ou seja, válida de interpretações, claras simples e verdadeiras (BOSTROM; FRENCH; GOTTLIEB, 2008). Essa base é discutida em Eppler e Aeschimann (2009) como um conjunto de elementos que devem ser o foco na estruturação do processo de visualização. A saber, listam-se esses elementos:

- Fornecer informação do risco ao longo de todo processo de gerenciamento;
- Focar em outras informações relacionadas a consequências ou gatilhos do risco;
- Oferecer o benefício da visualização a todos envolvidos no processo, não só a especialistas;
- Usar as informações de forma proativa e não ao final do processo de avaliação;
- Apresentar outras formas gráficas além das representações tradicionais quantitativas;
- Usar um procedimento estruturado;

Sob uma mesma proposta de abordagens, Roth (2012) sumariza alguns pontos-chaves que devem estar presentes em um diagrama: funciona como um sinal gráfico reduzido de um objeto de referência; omite todos os aspectos não essenciais do objeto representado; visualiza diferentes dimensões de informações com múltiplos elementos semióticos; permite teste eidético de hipóteses; e promove a análise transparente e colaborativa de dados complexos.

De forma geral, muitas são as formas a quais se podem representar as informações de risco geradas de forma que as avaliações sejam adequadas às particularidades de comunicação, citam-se assim gráficos de linha, pizza, pontos, histogramas, mapas de temperatura, dispersão, radar, bolhas, dependendo do tipo de informação e objetivo a que se deseja representar. Roth (2012) destaca três técnicas visuais importantes em diagramas de risco, são elas, relações espaciais, cor e animação. As relações espaciais representam as dimensões dos riscos: ideia de espaço, ou seja, as perspectivas relacionadas aos impactos do risco. As cores elevam a percepção do risco sob um efeito de alarme em relação ao tipo da cor, sendo um fator de exploração para muitas informações advindas da avaliação. Já animação tem uma proposta mais interativa do ponto de vista do usuário, onde se usa vários tipos de elementos semióticos eidéticos, tal como a forma, dimensões gráficas e outras formas de inter-relação entre as informações.

2.2.6 Visualização de Riscos e Incertezas

Ambientes de decisão estão sempre expostos a contextos de incertezas, e a maneira como estas são vistas pelas pessoas sempre tem impacto sobre os objetivos de tais ambientes. Explicações sobre níveis de incerteza é sempre um desafio devido à particularidade probabilística inerente. Por consequência, probabilidades são sempre difíceis de comunicar a um contingente grande de pessoas, principalmente quando o objetivo principal é minimizar perdas. A principal ideia sobre o entendimento da incerteza é tratada em muitos trabalhos por meio de apelos visuais de forma a criar conhecimento sobre previsões e possíveis acontecimentos (SPIEGELHALTER; PEARSON; SHORT, 2011).

Sob o contexto de riscos, matrizes e diagramas de riscos são tidos como ferramentas de visualização comumente trabalhadas para comunicar probabilidade e consequências em processos industriais, mas sua utilização vem sendo amplamente discutida devido às limitações de problemas atrelados à sua abordagem como a subjetividade da classificação de consequências e probabilidades, a definição (linear ou logarítmica) dos graus de riscos em

relação à escala de categorias e a agregação de cenários e consequências para um evento único (GOERLANDT; RENIERS, 2016). Vale ressaltar que a utilização de diagramas de probabilidade e consequência de riscos é explorada como uma ferramenta para visualizar a ideia do risco e não como uma ferramenta de análise.

Sob a necessidade da exploração de incertezas em gerenciamento de riscos e a comunicação do mesmo, Medeiros, Alencar e de Almeida (2017) conduz uma análise de sensibilidade para avaliar um resultado de ordenação de zonas de riscos multidimensionais para gasodutos de gás natural. Neste, as informações sobre o comportamento da ordenação de zonas de risco em um ambiente de incerteza são transformadas para uma escala cardinal e exibidas em gráficos de dispersão, barras e pizza, onde cada alternativa pode ser analisada individualmente quanto a sua variação estatística. Assim sendo, a análise indica as particularidades da robustez da decisão de priorização de riscos, onde as visualizações das informações geradas são base para tomada de decisão em medidas de prevenção.

Com base na estrutura abordada por Eppler and Aeschmann (2009), a avaliação de risco no contexto de gasodutos de hidrogênio é realizada por Medeiros, Alencar e de Almeida (2016) para elaborar um processo de visualização de riscos multidimensional. O escopo do processo visa responder às perguntas de porquê, o quê, para quem, quando e como as informações relacionadas ao risco precisam ser exibidas.

Assim, devido à natureza dinâmica incerta dos cenários nas operações de risco, há uma demanda constante para analisar níveis de risco, portanto, sendo um ponto particular a ser enfatizado na comunicação do risco (ALE; BURNAP; SLATER, 2015; GOERLANDT; RENIERS, 2016).

2.3 Síntese do estado da arte e posicionamento deste trabalho

No que tange a avaliação de riscos, Aven (2016b) explica que aplicações em contexto mais específicos são necessárias de forma que contribua para novas ideias e estabeleça métodos específicos para conduzir as avaliações. Diversos tratamentos são dados para que se avalie riscos em gasodutos, no entanto Brito e de Almeida (2009) ressaltam que se neste tipo de avaliação específica é avaliada somente em uma dimensão, como a financeira, esta é insuficiente para o contexto de riscos. Assim, a abordagem multidimensional para o tratamento de riscos em gasodutos de gás natural é mais apropriada (DE ALMEIDA et al., 2017). Brito, de

Almeida e Mota (2010) viabilizam a avaliação de riscos tomando em conta a multidimensionalidade para classificação de seções de um gasoduto de gás natural.

Sob um contexto de incerteza e de avaliação de riscos, Zio (2018) enfatiza a importância da AS na avaliação de risco uma vez que é necessário observar uma variedade de conjuntos combinatórios de eventos, cenários e condições, porque alguns levam a condições críticas e inseguras. Neste sentido, para que se tenha uma precisão maior sobre a decisão a ser tomada, são necessárias mais informações sobre como aspectos de incerteza se comportam diante das métricas de riscos obtidas. Julga-se que o comportamento probabilístico (incertezas naturais) de alguns parâmetros pode afetar os resultados da análise de riscos, enfatizando a necessidade de delinear uma observação probabilística de risco adequada (BORGONOV, 2017), o que é apresentada neste trabalho como um procedimento estruturado de simulação para incertezas por meio da abordagem Monte Carlo.

Goerlandt et al. (2017) apresenta a importância de delinear escopos de abordagens metodológicas em AS prestando muita atenção na validade e validação da análise quantitativa de riscos. As limitações nessa área são explícitas e há escassez de estudos adequados para refinar as medidas de risco. Na visão de classificação, se um há influência significativa na avaliação mediante uma pequena modificação de parâmetros, o modelo se torna sensível para tomada de decisão. Por exemplo, modificar uma zona de risco de magnitude média para alta, pode acarretar danos irreversíveis ao sistema como mortes, ferimentos, destruição da fauna e flora, entre outros. Portanto, traz-se a investigação de aspectos de incerteza sob o modelo de classificação de riscos sob uma proposta de validação estatística dos resultados.

Ainda sobre o ponto de vista de incerteza, os parâmetros do ELECTRE TRI apresentam oportunidade de exploração para sensibilidade, pois há variações acerca das preferências de um decisor que possam afetar a classificação (DIAS et al., 2018b; KADZIŃSKI; SŁOWIŃSKI, 2015; TERVONEN et al., 2009). Algumas abordagens são utilizadas quanto ao teste de sensibilidade, mas a maioria infere sobre variações nos parâmetros como nível de corte, índices de credibilidade e pesos (VETSCHERA et al., 2010), sendo uma oportunidade para o estudo das consequências do problema de decisão diante do problemática de sobreclassificação. Além disso, a incerteza em modelos numéricos implica na necessidade de investigações tal como apresentado em comportamento de gerentes de risco, premissas envolvendo o pensamento preventivo (BORGONOV, 2017), que às vezes é superior à estimativa correta. Na prática, este ponto indica mudanças frequentes nos parâmetros dos modelos (AVEN, 2016a), pautada neste trabalho sob a visão dos dois procedimentos de alocação do ELECTRE TRI. Medeiros,

Alencar e de Almeida (2017) apontam que há necessidade de estudos que abranjam a sensibilidade global de parâmetros de avaliação e risco.

Ainda sob um ponto de vista de Análise de Sensibilidade com o ELECTRE TRI, as ações podem ser classificadas em um intervalo de categorias, que para Dias e Clímaco (2000), é interessante explorar as possibilidades de categorias a quais uma ação flutua através de uma Análise de Sensibilidade (AS). Os mesmos autores afirmam ainda que a AS é desenvolvida sempre mudando um parâmetro isolado de cada vez, e isso pode ignorar possíveis relações de interdependência entre os parâmetros.

A análise de cenários para problemática de classificação, como também é definido a AS por alguns autores, de forma geral se limita a replicação de poucos cenários, performando parâmetros de preferência dos modelos de decisão multicritério como em Sara, Rui e Borbinha (2018) e Silva, Gusmão e Costa (2019). De forma semelhante, este trabalho traz a luz a noção sobre robustez em classificação incluindo um grande número de replicações de cenários e a validação estatística destes, o que é possível por meio do Sistema de Apoio à Decisão desenvolvido. Diante do exposto, o presente trabalho propõe como contribuição o estudo dos parâmetros envolvidos no modelo de avaliação de riscos multidimensional de Brito, de Almeida e Mota (2010) por meio da Simulação Monte Carlo de forma a gerar informações globais de sensibilidade de classificação diante de uma abordagem de validação estatística. Para este estudo, um Sistema de Apoio à Decisão é desenvolvido para consolidar as informações e suportar a tomada de decisão de classificação em um ambiente de incerteza.

3 MODELO PROPOSTO PARA O SAD

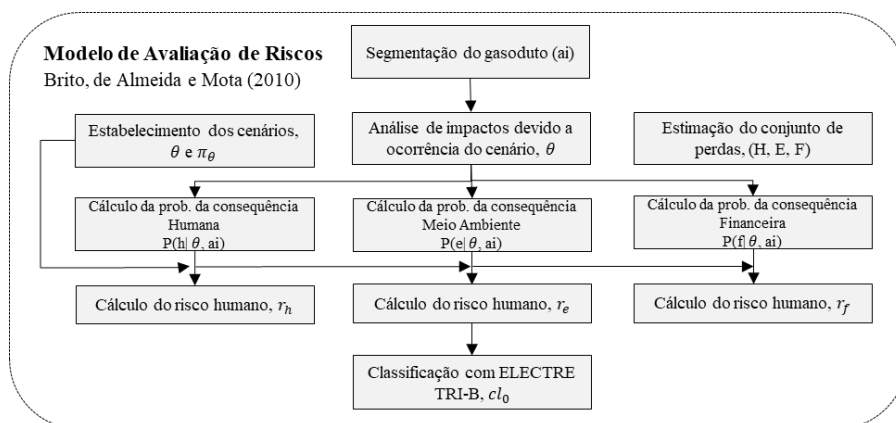
Neste capítulo é exposta a metodologia da pesquisa por meio da estruturação do modelo multicritério utilizado como base de Brito, de Almeida e Mota (2010). O modelo analítico para avaliar a sensibilidade é apresentada, ressaltando o procedimento matemático que explora a robustez dos resultados do modelo de risco. De mesmo modo, uma proposta visualização da sensibilidade é descrita.

3.1 Descrição do Modelo Multicritério com Método ELECTRE TRI e Função Utilidade

O modelo multicritério desenvolvido em Brito, de Almeida e Mota (2010) trata da avaliação de um conjunto de zonas de um gasoduto de gás natural a partir de três medidas de risco: Humana, Financeira e Ambiental. Tratado primeiramente em Brito e de Almeida (2009), o risco multidimensional avalia estas três medidas corroborando a importância de não julgar somente uma perspectiva financeira, adotando uma abordagem bem estruturada para tomada de decisão em ambiente de incertezas.

Ainda como parte do processo de gerenciamento de riscos, surge frequentes dificuldades em decidir como avaliar estratégias de mitigação, tais como eliminação, aceitação e redução de riscos nas operações, configurado como um problema de classificação. O modelo de decisão de Brito, de Almeida e Mota (2010) trabalha a problemática de classificação incorporando aspectos da Teoria da Utilidade ao método multicritério ELECTRE TRI para classificar as zonas seccionadas do gasoduto. A figura 1 resume o fluxo do procedimento do modelo multicritério, que é detalhado nas seguintes subseções.

Figura 1 – Estrutura do modelo de decisão para classificação de riscos



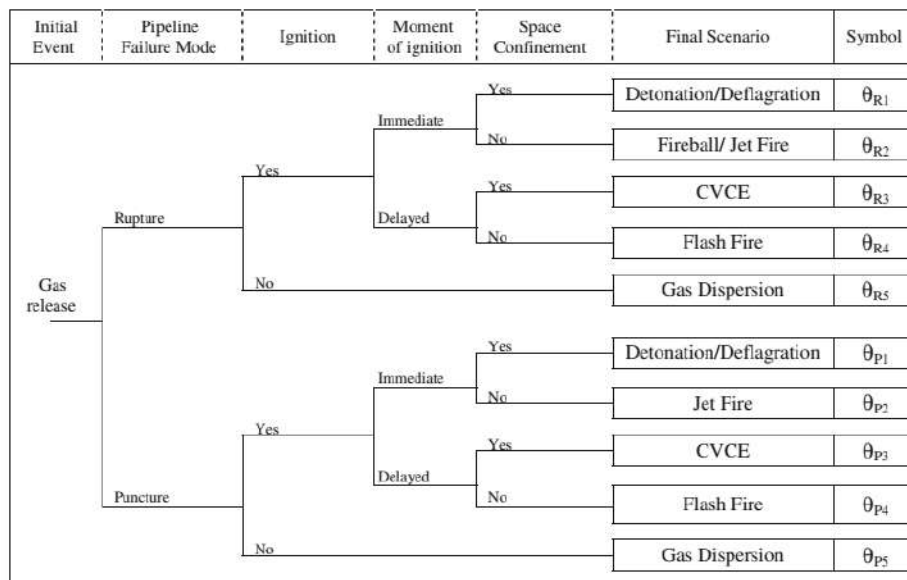
Fonte: Adaptado de Brito, de Almeida e Mota (2010)

3.1.1 Identificação dos cenários de perigo e estimação das probabilidades – $\pi(\theta)$

O desenvolvimento desta etapa se preocupa com a exploração de todos os cenários que podem se consumir quando o vazamento de um gasoduto acontece. O vazamento está relacionado a vários fatores que podem causar a evolução do acidente tais como o modo de falha, a fonte de ignição, barreiras de confinamento, entre outros, que influenciam a probabilidade de acontecimento de tais cenários de perigo. Estes, caracterizados como estado da natureza, pois não estão sob controle do decisor (DE ALMEIDA et al., 2015), são combinados com cada zona avaliada, obtendo assim uma consequência. Os cenários são entendidos como todos os impactos que perpassam os níveis críticos permitidos, tendo danos a pessoas, ao ambiente e à organização (DZIUBIŃSKI; FRĄTCZAK; MARKOWSKI, 2006).

A figura 2 ilustra os dez cenários do estado da natureza, denominado pelo conjunto $\Theta = \{\theta\}$, sendo j a representação para os cinco possíveis cenários atrelados a k , que denomina o módulo da falha, $k = 1$, ruptura e $k = 2$, falha.

Figura 2 – Árvore de eventos para o vazamento de gás natural e cenários de acidentes



Fonte: Brito, de Almeida e Mota (2010)

Ainda nesta etapa, obtém-se as probabilidades inerentes ao acontecimento de cada cenário, $\pi(\theta_{jk})$, apresentadas como conhecimento da distribuição *a priori* dos estados da natureza. Estas podem ser obtidas por duas vias: Dados históricos de acidentes em gasodutos

(PAPADAKIS, 1999) e elicitación do conhecimento *a priori* dos especialistas envolvidos (DE ALMEIDA et al., 2015) no gerenciamento de riscos do gasoduto. Para este último, a baixa frequência de acidentes e a idade de malhas dutoviárias dificulta a obtenção de dados para se estimar $\pi(\theta_{jk})$. Portanto, usam-se bases de dados internacionais de incidentes em gasodutos para estimar as probabilidades, tais como a European Gas Incident Data Group (EGIG), *Department of Transport of United States* (US DOT) e *Major Hazard Incident Data Service* (MHIDAS). Assim, a cada cenário uma probabilidade é estimada sabendo que a multiplicação das probabilidades dos ramos da Figura 2 configura uma condição para o cenário.

Ainda conforme Brito, de Almeida e Mota (2010), nesta etapa é importante discutir que o cenário de normalidade operacional também é configurado como parte do modelo, em que é apresentado como maior contribuinte do risco associado a cada zona, pois este cenário configura a situação em que o duto funcione sem nenhuma interferência, sem vazamentos ou impactos. Para este cenário, cada seção é tem um cenário de normalidade com valor 1, que é a utilidade da melhor consequência, sendo a perda -1.

3.1.2 Segmentação do gasoduto em zonas

Para que se desenvolvam estratégias para mitigação de riscos, é adequado se dividir o duto em partes menores a_i , pois alguns parâmetros de análise do risco mudam ao longo da sua instalação. Além disso, sabe-se que essas propriedades interferem na variação da taxa de falhas ao longo do duto, logo, na ocorrência de acidentes (BRITO E DE ALMEIDA 2009; MEDEIROS, ALENCAR E DE ALMEIDA, 2017). Portanto, a segmentação do gasoduto baseada em características homogêneas facilita a gestão operacional. Assim, as seções são definidas como um conjunto discreto que caracterizam as alternativas do problema multicritério, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, cada uma com respectivas propriedades técnicas relacionadas ao sistema de avaliação, tais como: diâmetro, pressão do gás, composição do material do duto, idade, componentes de manutenção etc. A segmentação de áreas é um procedimento comum em modelagem de riscos e pode ser vista em trabalhos como o de Bonvicini et al., (2015).

3.1.3 Análise de exposições devido à ocorrência dos cenários

Apesar das áreas já terem sido estimadas, assim como as probabilidades de ocorrência dos cenários, é preciso ainda atrelar cada cenário acidental θ a cada trecho a_i . Estima-se através dessa análise situações em que limites críticos são atingidos, obtendo perdas máximas as perspectivas analisadas. Para tanto, usa-se uma modelagem matemática que simula zonas críticas de perigo em volta de um ponto de falha, determinado como o raio máximo de perigo (*CDR – Critical Danger Radius*) sugerido por Jo e Ahn (2002). O raio é definido pela seguinte expressão:

$$CDR \cong 1,512 \cdot \frac{P_0^{1/2} d^{5/4}}{L_0^{1/4}} \quad (12)$$

Onde,

- CDR equivale à distância máxima de perigo, em metros, a partir de um fluxo máximo de calor de 15kW/m² com uma exposição de até 30 segundos tendo uma probabilidade de 1% para provocar uma fatalidade;
- P_0 é um valor de pressão constante (N/m²) na estação de compressão a montante;
- d corresponde ao diâmetro do duto;
- L é a extensão do gasoduto a partir da estação de compressão a montante.

A equação apresentada estima uma medida conservadora dos riscos em que há ocorrência de ruptura completa de um ponto do gasoduto e de um jato horizontal de gás, sendo essas zonas associadas a um valor limite de radiação térmica. É importante salientar que este raio só determina a região crítica caso a falha ocorra, as perdas atreladas as dimensões estudadas são avaliadas posteriormente.

3.1.4 Estimação do conjunto de perdas (H, A, F)

Para Brito, de Almeida e Mota (2010), estudar o impacto dos cenários não indica somente estimar as zonas de perigo de cada seção, mas é possível estimar os possíveis danos em meio ambiente, a propriedade, e efeitos na saúde e segurança das pessoas expostas aos eventos ocorridos. Os impactos (consequências ou *payoffs*) são determinados por estudos de vulnerabilidade, em que o pior cenário é estimado para cada dimensão do resultado, tido como

a visão mais pessimista da combinação dos fatores. Assim, existe um conjunto de perdas que envolvem consequências humanas, ambientais e financeiras advindas de um acidente com o gasoduto de gás natural.

Para dimensão humana, a estimativa usada é referente ao número de pessoas atingidas fisicamente quando um cenário ocorre, tendo pelo menos queimaduras de segundo grau. Assim, o modelo assume um decisor de caráter conservador, não correspondendo somente número de mortes como indicação para gerenciamento das áreas, mas que qualquer impacto a população deve ser evitado.

Os impactos ocorridos devido à interferência ambiental são mensurados pela região de vegetação destruída em metros quadrado decorrente do vazamento. O gás natural quando se mistura com ar, tido como um espaço não confinado, se dispersa de forma significativa rápida, causando geralmente incêndios e queimadas nos arredores da vegetação. A consequência de perda dessa dimensão pode também ser expressada em termos de integridade da fauna, mas não é justificada para os fins desse modelo.

Vale ressaltar que estas duas dimensões não são expressas sob proporção da medida financeira. Os efeitos causados em humanos e vegetação são observados de forma isolada, sendo estas perdas tratadas de forma independente. Tratar a dependência destas inferindo ressarcimento incorre em uma discussão ética, dado que não são compensadas monetariamente.

As consequências financeiras são decorrentes dos prejuízos causados pela falha no gasoduto, tendo relação direta de perda com receita interrompida por não fornecimento, gastos com estrutura operacional como tubulações e mão-de-obra, indenizações por morte, dano físico e vegetação, entre outros.

3.1.5 Elicitação da função utilidade

A integração da teoria da utilidade na avaliação de múltiplos critérios permite a avaliação inter-critério de cada dimensão através do comportamento probabilístico e subjetivo das dimensões. Isto é possível, pois uma das particulares do uso da função utilidade deve-se a comparabilidade compensatória entre os impactos, obtendo uma função utilidade para cada dimensão de impacto $u(p_h, p_a, p_f)$. No entanto, a modelagem de preferências para o gerenciamento de riscos de perdas permeia uma avaliação utilitarista mais complexa, pois, diante de restrições éticas e técnicas, o decisor pode não ser capaz ou ter informações de fazer *trade-offs* entre as consequências humanas, ambientais e financeiras. Para tanto, assume-se que

o decisor tenha racionalidade não compensatória, utilizando somente as utilidades unidimensionais para o cálculo do risco, que, por conseguinte, é entrada para construção das relações de sobreclassificação. A primeira instância, por se tratar de um método com características compensatórias, surge questionamentos à adequação deste a um cenário diferente como para o uso de um método com relações de sobreclassificação. Mas, avalia-se que as interações entre as dimensões de consequências para este modelo não afetam fortemente a estrutura de preferências do decisor, contanto que seja apropriado para contextos em que tais dimensões possam ser desconsideradas. O rigor no processo de modelagem é simplificado para obter-se mais informações acerca das preferências do decisor (EDWARDS; BARRON, 1994).

Ao invés de utilizar valores absolutos de consequências, o decisor estabelece uma noção em termos de intervalos fechados das consequências $[0,1]$. Isto é possível, pois o valor desejado nas três dimensões é zero, ou seja, nenhuma perda (valor mais preferido), e, o valor máximo dentro da zona de perigo (determinado por CDR) corresponde a valor de um na escala de utilidade. Dessa forma pode-se estimar uma função utilidade do decisor frente aos conjuntos de perdas dentro de um intervalo fechado das consequências. O procedimento de *levantamento da função utilidade* é descrito em (GOMES; GOMES; DE ALMEIDA, 2006) como adequado a problemas com um número alto de consequências.

A partir da utilidade de algumas consequências das três dimensões, ajusta-se uma curva de regressão, tida como a função utilidade unidimensional, em que é possível determinar qualquer valor de utilidade no conjunto de consequências. Na prática, usa-se frequentemente a função exponencial para o ajuste da função utilidade (BERGER, 1985; BRITO; DE ALMEIDA; MOTA, 2010; KEENEY; RAIFFA, 1976).

$$U(p) = e^{-\mu_p p} \quad (13)$$

Onde $p = h, a \text{ e } f$, e o parâmetro μ_p é obtido por meio do ajuste da curva da regressão.

3.1.6 Estimação das funções consequências $P(h, a, f | \theta_{jk}, a_i)$

As consequências para as três dimensões são tratadas de forma aleatória, independente e não correlacionada, tal que seus comportamentos são estimados por meio de funções de probabilidade. As dimensões ambiental e financeira apresentam comportamento contínuo, portanto, suas respectivas funções densidades de probabilidade, $f(a | \theta_{jk}, a_i)$ e $f(f | \theta_{jk}, a_i)$, são

usadas como direcionador para análise de sensibilidade. O comportamento discreto da dimensão humana infere o uso de uma função de probabilidade $f(h|\theta_{jk}, a_i)$.

3.1.6.1 Estimação da função consequência humana

A consequência dada para um evento acidental sob a dimensão humana, tal como um ferimento, corresponde a um ensaio de Bernoulli, definido pela equação 14. A interação e a comunicação entre as pessoas são desprezadas para fins dessa formulação.

$$P(p_h|\theta_{jk}, a_i) = \binom{n_{a_i}}{p_h} \cdot \delta^{p_h} (1 - \delta)^{n_{a_i} - p_h} \quad (14)$$

- θ_{jk} representa o cenário acidental sob estudo;
- a_i é a área do gasoduto sob análise;
- p_h é o número de pessoas com ferimentos, queimaduras de primeiro ou segundo grau;
- n_{a_i} indica o número máximo de pessoas a serem impactadas na zona de perigo de cada área a_i ;
- δ é a probabilidade de uma pessoa na zona de perigo ser atingida e sofrer os danos projetados pela danos conforme equação 15.

Os danos físicos causados a pessoas se ampliam a uma análise mais robusta e possivelmente incerta, pois cada pessoa reage de uma forma diferente dependendo do nível de radiação térmica recebida (HOCKEY; REW, 1996). Portanto, assume-se a ocorrência de queimaduras e não de fatalidades, considerado uma postura mais conservadora quanto a situação do risco. Assim, a probabilidade δ é obtida pela equação 15.

$$\delta = \alpha_{\theta_{jk}, a_i} \cdot \omega \cdot P \quad (15)$$

- ω representa quantas vezes mais provável que uma fatalidade é a ocorrência de, no mínimo, queimaduras de primeiro ou de segundo grau sobre as pessoas da área sob análise, a um fluxo radiacional de calor I, sendo que $\omega \cdot P \leq 1$;
- $\alpha_{\theta, i}$ representa a probabilidade de uma pessoa ser afetada pela radiação térmica dentro da zona de perigo em um cenário específico θ_{jk} na área a qual se encontra a_i .

Por sua vez, a probabilidade P de uma pessoa ser atingida é modelada por meio de uma equação que infere o acontecimento quando níveis críticos de risco são atingidos. A equação

probit determina a probabilidade P, tida como a probabilidade de ocorrência de um dano físico em uma pessoa, ao *probit* Y, dada pela equação 16 (HOCKEY; REW, 1996):

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-t^2/2} dt \quad (16)$$

Y é considerada uma variável aleatória gaussiana (hipótese que a distribuição das respostas individuais das pessoas dado um nível de radiação térmica é gaussiana) de média 5 e variância 1. Esta variável expressa uma medida conservadora para se obter a probabilidade de uma pessoa sucumbir a uma fatalidade, tida pela equação 17 (TSAO E PERRY, 1979):

$$Y = -14,9 + 2,56 \ln \left(t \cdot \frac{(I_{\theta_{jk}})^{\frac{4}{3}}}{10^4} \right) \quad (17)$$

Onde,

- t é o tempo de exposição da pessoa a radiação térmica (s);
- $I_{\theta_{jk}}$ representa o fluxo de radiação de calor ($J/m^2.s$), obtido pela equação 18 (JO; CROWL, 2008):

$$I = \frac{\eta \cdot \tau_a \cdot Q_{eff} \cdot H_c}{4 \cdot \pi \cdot (CDR)^2} \quad (18)$$

- η é a razão do calor irradiado pelo total de calor liberado pelo fogo (para o gás natural este valor assume uma constante de 0,2, tido como padrão para o caso do metano);
- τ_a define a transmissividade atmosférica;
- Q_{eff} é a taxa efetiva de gás (kg/s);
- H_c corresponde ao calor de combustão do gás natural ($5,002 \times 10^7 J/kg$);
- CDR é a distância radial do fogo ao local de interesse (m);

A transmissividade atmosférica pode assumir um valor constante de 1, mas para o trabalho de Brito, de Almeida e Mota (2010), o valor de τ_a é obtido pela equação 19 (JO; CROWL, 2008):

$$\tau^2 = 2,02 \cdot [P_w \cdot (RH) \cdot (CDR)]^{-0,09} \quad (19)$$

Onde:

- P_w é a pressão de vapor de água saturada (N/m^2);
- RH corresponde a umidade relativa;
- CDR é a distância radial de impacto do fogo ao local de interesse (m).

A taxa efetiva de vazamento Q_{eff} é definida por meio da equação 20 (JO; CROWL, 2008):

$$Q_{eff} = \begin{cases} \frac{1,783 \times 10^{-3} \cdot A_p \cdot \alpha \cdot P_0}{\sqrt{1 + 4,196 \times 10^{-3} \cdot \alpha^2 \cdot \frac{L}{d}}}, \alpha^2 \cdot \frac{L}{d} \leq 2410 \\ 5,349 \times 10^{-4} A_p \cdot \alpha \cdot P_0, \alpha^2 \cdot \frac{L}{d} > 2410 \end{cases} \quad (20)$$

- A_p representa a área transversal do duto (m²);
- α é a medida de proporção do tamanho do furo (adimensional) obtido pela razão da área efetiva do furo pela área transversal do duto;
- P_0 é a pressão sob condições de operação (N/m²);
- L é o comprimento do duto desde a estação de fornecimento do gás até o ponto onde o vazamento ocorre (m);
- d o diâmetro do gasoduto (m).

3.1.6.2 Estimação da função consequência ambiental

As consequências sob o meio ambiente são verificadas pela área de vegetação queimada na zona de perigo, tida por p_a , quando há vazamento do gás e começa-se um incêndio em um cenário acidental específico θ_{jk} em uma área a_i . Assume-se que esta área é função da carga de energia liberada sobre a vegetação, medida pela variável aleatória t_Q , sem influências de condições meteorológicas e topográficas. A função consequência ambiental é calculada pela equação 21 e p_a pela equação 22:

$$P(p_a | \theta_{jk}, a_i) = \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \cdot I_{\theta_{jk}}} \left[\left(\frac{1 - \frac{p_a}{s_{a_i}}}{\frac{p_a}{s_{a_i}} - 1} \right)^{\frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \cdot I_{\theta_{jk}}}} \right] \quad (21)$$

$$p_a = s_{a_i} \cdot \left[1 - \exp \left(-\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \cdot I_{\theta_{jk}} \cdot t_Q \right) \right] \quad (22)$$

Onde,

- s_{a_i} é a área de vegetação presente na zona de perigo associada ao trecho (m²);
- $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$ corresponde a uma constante associada ao cenário e ao trecho (m²/J);
- $I_{\theta_{jk}}$ é o fluxo de radiação de calor relacionado a um cenário acidental (J/m².s);

- t_Q é o tempo que as chamas sejam apagadas devido a ignição do gás e da queima do material (s);
- g_{θ_{jk}, a_i} é o inverso do tempo médio para apagar as chamas ($1/t_Q$).

Considera-se ainda uma variável atrelada ao tempo de interrupção automática t_i do fluxo de gás pela válvula a montante. Este tempo é considerado aproximadamente 10 segundos. Como t_Q é uma variável aleatória, o qual segue uma distribuição de probabilidade com parâmetros correspondentes ao cenário e a seção analisada. A suposição para esta variável é que seu comportamento é semelhante à manutenibilidade de sistemas (ALMEIDA, 2005) e segue uma distribuição de probabilidade exponencial com função densidade expressada pela equação 23.

$$f(t_Q) = g_{\theta_{jk}, a_i} e^{-g_{\theta_{jk}, a_i} t_Q} \quad (23)$$

Para outros cenários, onde há dispersão do gás, ou seja, não ocorre ignição ou degradação ambiental deve-se obedecer a expressão 24.

$$P(P_a \leq p_a | \theta_{jk}, a_i) = 1 \quad \forall p_a > 0 \quad (24)$$

3.1.6.3 Estimação da função consequência financeira

A função densidade probabilidade para perdas financeiras é representada na equação 25, em que tal perda p_f (equação 26) é função da soma do faturamento cessante $F(t_Q)$, com os danos decorrentes do ressarcimento devido à interrupção na produção dos clientes empresariais $W(t_Q)$, e as perdas financeiras devido a danos a propriedades, multas e indenizações $M(t_Q)$. Algumas suposições são delineadas para que a formulação do comportamento dessa consequência seja mais contundente. A primeira corresponde a definição do tempo necessário, a partir de t_Q , para restaurar o fluxo de gás regularmente. Esta é uma variável que é z_i maior que t_Q . Além disso, dá-se que cada trecho a_i do gasoduto é delimitado por válvulas, que são acionadas em casos de instabilidades em pressão ou até outros casos extremos.

$$P(p_f | \theta_{jk}, a_i) = \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\xi_i} \exp\left(-g_{\theta_{jk}, a_i} \cdot \frac{P_f - \varphi_i}{\xi_i}\right) \quad (25)$$

$$P_f = F(t_Q) + W(t_Q) + M(t_Q) \quad (26)$$

O faturamento cessante é modelado pela equação 27:

$$F(t_Q) = v \cdot R \cdot t_i + v \cdot L_{a_i} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + v \cdot Q \cdot z_i \cdot t_Q \quad (27)$$

Onde,

- F é o montante previsto de prejuízo dado pelo acontecimento da perda em um dado cenário de um trecho do gasoduto;
- v é o valor médio de venda do gás por m^3 (R\$/ m^3);
- R é a taxa de liberação de gás mediante furo ou ruptura (m/s);
- t_i é o tempo que o fluxo das válvulas foi interrompido, 10 segundos;
- L_{a_i} é o comprimento do trecho em estudo (m);
- d é o diâmetro do trecho de gasoduto em análise (m);
- Q corresponde a vazão regular do gás no gasoduto (m^3/s);
- t_Q o tempo até que as chamas sejam apagadas (s);
- z_i é uma constante de proporcionalidade que associa t_R e t_Q ;

As perdas atreladas a ressarcimentos devido a interrupção no fornecimento de gás para clientes empresariais são representadas pela equação 28.

$$W(t_Q) = W_{a_i} \cdot (1 + z_i) \cdot t_Q \quad (28)$$

- W_{a_i} é uma aproximação do valor de produção (\$/s) das empresas a jusante que operam seus processos com o gás proveniente do trecho a_i

Aos danos a propriedades, multas e indenizações por danos físicos ao atingidos, assume-se que os prejuízos, da mesma forma como os impactos ambientais, são proporcionais ao montante de energia liberado sobre a zona de perigo do trecho. A equação 29 expressa essa relação.

$$M(t_Q) = \beta \cdot I_{\theta_{jk}} \cdot A_{a_i} \cdot t_Q \quad (29)$$

Sabe-se que:

- β corresponde a uma constante de proporcionalidade referente a uma constante decorrente a danos às propriedades, multas e indenizações por danos físicos, dado à energia liberada pelo cenário acidenta (R\$/J);
- A_{a_i} é área da zona de perigo relacionado ao trecho estudado a_i (m^2);
- $I_{\theta_{jk}}$ é o fluxo de radiação de calor relacionado a um cenário acidental ($J/m^2.s$);

Na formulação da função consequência duas variáveis são dadas pelas seguintes expressões:

$$\xi_i = w_i(1 + z_i) + v \cdot Q \cdot z_i + \beta \cdot I_{\theta_{jk}} \quad (30)$$

$$\varphi_i = v \cdot L_{a_i} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z_i + v \cdot R \cdot t_i \quad (31)$$

O cálculo estimado dos riscos é ajustado de acordo com as distribuições de probabilidade das dimensões definidas. A utilidade dessas distribuições define outra parcela para a estimação do risco, a qual seu procedimento de elicitação é semelhante à noção de aceitabilidade para riscos individuais e sociais (AVEN; RENN, 2009), que são norteados pelo os níveis de exposição aos riscos inerentes na operação.

3.1.7 Estimação dos riscos

O risco é considerado como o valor esperado da perda, e esta perda é assumida quando um estado θ_{jk} ocorre, a qual é o negativo da função utilidade (BERGER, 1985). Fazendo uso da função utilidade estimadas nas três dimensões, apresentado no item 26, e das distribuições sobre as consequências, expostas no item 27, obtém-se a perda conforme exposto na expressão:

$$L(\theta_{jk}, a_i) = -u\left(P(p|\theta_{jk}, a_i)\right) = - \int_p P(p|\theta_{jk}, a_i) \cdot U(p) \cdot dp \quad (32)$$

De posse do exposto, de acordo com Berger (1985), o valor esperado da perda para cada trecho, tido como o risco, é obtido por meio da seguinte expressão:

$$r(a_i) = E_{\theta_{jk}} L(\theta_{jk}, a_i) = \sum_{\theta_{jk}} \pi_i(\theta_{jk}) L(\theta_{jk}, a_i) \quad (33)$$

Onde $\pi_i(\theta_{jk})$ representa a probabilidade de ocorrência de cada cenário acidental. Utilizando a equação 32 na equação 33, tem-se que o risco para cada trecho é calculado por meio da expressão 34:

$$r(a_i) = - \sum_{\theta_{jk}} \pi_i(\theta_{jk}) \cdot \int_p P(p|\theta_{jk}, a_i) \cdot U(p) \cdot dp \quad (34)$$

Utiliza-se ainda para a formulação do risco a adição do cenário de normalidade θ_N , ou seja, quando as consequências para esses cenários são nulas, dado por sua probabilidade $\pi_i(\theta_N)$. Assim, a formulação para o risco em cada trecho a_i é delineado pela expressão 35 (BRITO; DE ALMEIDA; MOTA, 2010).

$$r_p(a_i) = \sum_{\theta_{jk}} \pi_i(\theta_{jk}) \cdot \left[- \int_p P(p|\theta_{jk}, a_i) \cdot U(p) \cdot dp \right] + (-1)\pi_i(\theta_N) \quad (35)$$

O valor de magnitude de risco dado a cada trecho é tido pela soma das perdas associadas a cada cenário multiplicada pelas probabilidades de ocorrência do cenário e adicionada a probabilidade do cenário de normalidade. Dessa forma, para cada dimensão, humana, ambiental e financeira, estima-se o risco para cada trecho usando as formulações apresentadas. Para dimensão humana, calcula-se pela expressão 36.

$$r_h(a_i) = \sum_j \sum_k \left\{ - \sum_{p_h=0}^{n_{a_i}} \left[\binom{n_{a_i}}{p_h} \cdot \delta^{p_h} (1 - \delta)^{n_{a_i}-p_h} \cdot U(p_h) \right] \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1)\pi_i(\theta_N) \quad (36)$$

Similarmente, o risco calculado para dimensão ambiental é dado mediante um cenário de vazamento de gás representado pela equação 37.

$$r_a(a_i) = \sum_j \sum_k \left\{ - \left[\int_0^{s_{a_i}} - \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \cdot I_{\theta_{jk}}} \left[\left(\frac{1 - \frac{p_a}{s_{a_i}}}{p_a - s_{a_i}} \right)^{\frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \cdot I_{\theta_{jk}}}} \right] \cdot u(p_a) \cdot dp \right] \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1)\pi_i(\theta_N) \quad (37)$$

Por fim, o risco da dimensão financeira é estimado pela equação 38.

$$r_f(a_i) = \sum_j \sum_k \left\{ - \left[\int_0^\infty \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\xi_i} \exp \left(-g_{\theta_{jk}, a_i} \cdot \frac{P_f - \varphi_i}{\xi_i} \right) \cdot u(p_f) \cdot dp \right] \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1)\pi_i(\theta_N) \quad (38)$$

Uma vez calculado os riscos unidimensionais, os riscos que caracterizam um acidente de vazamento de gás podem ser identificados conforme três perspectivas de análise par gestão do risco, a saber: humano, ambiental e financeiro. O vetor de riscos de cada trecho $\overrightarrow{r(a_i)} = [r_h(a_i), r_a(a_i), r_f(a_i)]$ corresponde as consequências das dimensões do gasoduto, o qual permite a avaliação global do trecho em categorias conforme diretrizes organizacionais de risco.

Dado que o objetivo é minimizar as perdas desses riscos, o modelo usa uma escala decrescente de avaliação do risco unidimensional, onde a exploração par a par dos trechos-alternativas é fonte para o estabelecimento de relações lógicas de sobreclassificação. Sobre esta relação, a racionalidade não-compensatória é uma hipótese aceita, pois a visão sobre a compensação de desempenho das dimensões não é satisfatória no âmbito deste problema. Visto isso, o método ELECTRE TRI, que usa relações de sobreclassificação na sua formulação, é

apropriado e aplicado para designar os trechos às categorias ordenadas (estabelecidas anteriormente por preferências do decisor).

3.1.8 Especificação das categoriais dos riscos e perfis

Para casos em que seja necessário fazer classificações de áreas de riscos em categorias, o risco associado a cada seção é unidimensional, não sendo preciso agregar as várias dimensões. A relação de sobreclassificação é acreditada por meio de comparações dos trechos e os perfis (limites) das categorias, construindo-se relações de dominância entre as magnitudes das consequências de riscos e os perfis (BRITO, DE ALMEIDA E MOTA, 2010).

Os perfis de referência b_k formam vetores que fazem parte do espaço de consequência de riscos nas três dimensões, $\overrightarrow{r(b_h)} = [r_h(b_h), r_a(b_h), r_f(b_h)]$, onde b_h corresponde ao limite inferior de C_h e superior de C_{h+1} . O conjunto de dimensões é tal que as preferências decrescem com o aumento da escala, pois como ora discutido, o valor mais próximo de 1 (menos preferível) institui um risco alto.

O conjunto de categorias é determinado de acordo com os princípios normativos da organização, sabendo que este depende da configuração organizacional de avaliação do risco, ou seja, depende da disponibilidade de recursos, as estratégias para um dado horizonte de tempo, políticas internas e externas, e até as diferentes percepções que especialistas congregam sobre a determinação das categorias. Os trechos, neste trabalho, são delineados em três categorias:

- a) *Risco Alto*, representado por C_1 , demanda ações urgentes de intervenção do risco, pois suas probabilidades são mais elevadas em relação a tríade de perspectivas utilizada. A intenção é que se elimine ou reduza o risco a padrões aceitáveis (JONES-LEE; AVEN, 2011);
- b) *Risco Moderado*, definido por C_2 , compõe os trechos que estão em um nível de risco razoavelmente aceitável, mas não tão proporcional à categoria de baixo risco. Alguns dos trechos requerem somente ações de prevenção e de cunhos fiscalizatório, contanto que se as mantenha em níveis reduzidos de exposição a perdas;
- c) *Baixo Risco*, definido por C_3 , comportam trechos do gasoduto com níveis mais reduzidos nas três dimensões, tendo, portanto, um tempo de planejamento maior e soluções mais eficazes na relação custo-benefício;

Os perfis das categorias para este modelo correspondem a alternativas fictícias que caracterizam a noção do decisor para inferir bem as fronteiras entre as categorias. Os perfis podem corresponder a trechos de gasodutos de outras empresas, em que são tomados os desempenhos dos três critérios como referência para as categorias estabelecidas. A ideia é que por meio de comparações por dados históricos dos parâmetros utilizados se calcule o valor dos perfis das categorias.

3.1.9 Alocação multicritério das seções às categorias de riscos

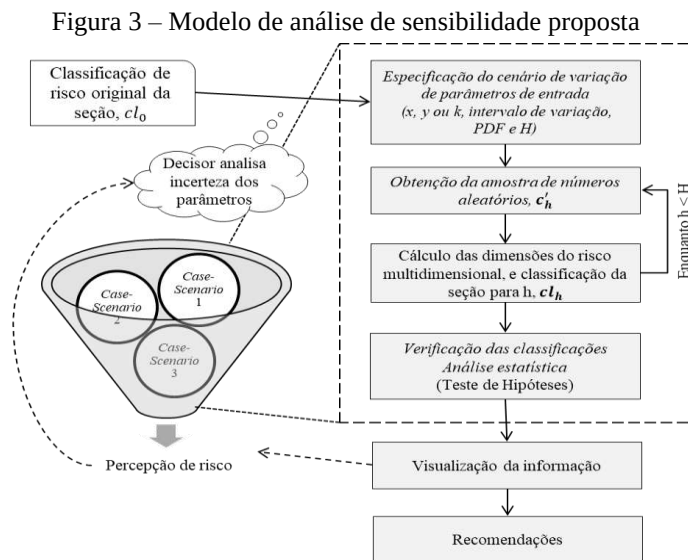
A designação dos trechos a categorias segue o procedimento do método ELECTRE TRI-B, que consiste na comparação de perfis únicos que limitam as categorias por meio de índices de discordância e concordância (BOUYSSOU; MARCHANT, 2015). A relação de sobreclassificação só é dada através do nível de corte, usada nas comparações tal que a designação só é possível se o nível for menor que o índice de credibilidade (FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2016).

Sequencialmente, na comparação de a_i e b_h , avalia-se a veracidade de aSb_h , caso esta afirmação seja verdadeira então, aloca-se o trecho a categoria mais alta C_h , para o procedimento pessimista.

3.2 Modelo para Análise de Sensibilidade

A partir do modelo de avaliação e classificação de riscos de Brito, de Almeida e Mota (2010) considera-se um conjunto C de todos os parâmetros. Estes parâmetros são avaliados globalmente mediante sua forma de variação em relação ao modelo de decisão utilizando a Simulação Monte Carlo (SMC). Um subconjunto $c \in C$ é um grupo de parâmetros testado que caracteriza um vetor de cenário de avaliação dado que $c > 1$, chamado de cenário-caso.

As etapas da sensibilidade do modelo são demonstradas na figura 3, e descritas detalhadamente nas subseções seguintes.



Fonte: O autor (2020).

A partir do vetor de parâmetros do *cenário-caso*, uma amostra aleatória deste é utilizada para recalcular o modelo de decisão, gerando uma replicação do modelo. A partir das alterações obtidas em cada replicação, diferentes níveis de significância são testados para verificar a significância em qual intervalo de proporção de mudança cada seção está. A informação gerada no teste é então base para estruturar visualizações sobre a flutuação das seções nas classes, desenvolvendo uma percepção sobre como melhor controlar as atividades inerentes a cada seção de perigo sob o aspecto de incerteza.

3.2.1 Especificação do caso de variação dos parâmetros de entrada

Cada cenário-caso é construído de tal forma que sua configuração indique como a variação conjunta no comportamento dos parâmetros pode influenciar o resultado final de classificação das seções. De mesma forma, aspectos atrelados à incerteza como a distribuição de probabilidade e os intervalos de variação também são inerentes a esta etapa. Para efeitos de melhor entendimento das características desses parâmetros, três principais subconjuntos $\mathbf{c}$ são apresentados:

- A) Parâmetros que caracterizam as seções dos gasodutos, $\mathbf{x}$. Definem aspectos atrelados somente ao trecho, ou seja, os cenários de ocorrência não influenciam tais parâmetros. Este grupo de parâmetros é relacionado à operacionalização do gasoduto tais como comprimento, diâmetro, etc.;
- B) Parâmetros inerentes a Seção e Cenário de ocorrência de falha, $\mathbf{y}$, tais como taxa de liberação do gás, probabilidade de ocorrência do cenário acidental e fator que estima a queimaduras em pessoas;
- C) Parâmetros de preferências do decisor, $\mathbf{z}$: refere-se a todos os parâmetros que refletem o julgamento do decisor, incluem-se nestes os parâmetros referentes a função utilidade e o método ELECTRE TRI. Para o ELECTRE TRI, não se assume variação no julgamento do decisor quanto aos limiares de preferência, de indiferença, veto e perfis de classes, pois se entende que o decisor para o contexto de classificação tem certeza sobre a determinação e diferença entre as classes. A incerteza na subjetividade é testada somente pelo valor do nível de corte e pelos pesos das dimensões.

Do ponto de vista processual, inicialmente, o decisor e sua equipe realizam uma análise aprofundada na classificação original, $\mathbf{cl}_0$, de forma a entender quais possíveis impactos tal classificação pode sofrer mudanças em domínios de incerteza, não só em relação aos parâmetros técnicos operacionais do gasoduto, mas em relação aos parâmetros dos métodos multicritérios utilizados. Uma análise estatística sobre dados históricos de controle dos parâmetros pode guiar esta etapa, ou apontando aquelas informações que são regidas por subjetividade tal como os perfis das categorias ou nível de corte. Segundo Medeiros, Alencar e de Almeida (2017), a intenção é analisar a qualidade das informações do resultado inicial sobre como melhor estabelecer uma decisão estável em relação às seções em termos de melhorias, manutenção, inspeções e outros benefícios.

De forma geral, os *cenário-casos* são representados pela especificação dos seguintes vetores e pelas variáveis que determinam a incerteza do caso. Sabendo que N é o número de seções do gasoduto, os elementos dos subconjuntos $\mathbf{x}$ e $\mathbf{y}$ são função do número de seções de gasodutos. Sendo assim, os vetores e variáveis assumem as seguintes representações:

- A) $\vec{X}$: vetor entrada de parâmetros tal que $\vec{X} = [X_i, X_{i+1} \dots X_N]$ determinado para cada área $\mathbf{a}_i$ do gasoduto;
- B) $\vec{Y}$: vetor de entrada y , o qual define as características do cenário tal que $\vec{Y}_{ji} = [Y_i, Y_{i+1} \dots Y_N]$, j corresponde ao módulo de falha (ruptura ou furo);
- C) $\vec{Z}$: vetor dos parâmetros de preferência dos modelos de decisão utilizados tal que $\vec{Z} = [k_h, k_f, k_a, \lambda]$, representando respectivamente a constante de escala humana, financeira, ambiental e o nível de corte do ELECTRE TRI;
- D) $\mathbf{d}_p$: tipo de distribuição de probabilidade, sendo $p=1$ para distribuição triangular, e $p=2$ representando a distribuição uniforme;
- E) $\mathbf{e}$: variável que determina o intervalo de modificação da distribuição de probabilidade p ;
- F) $\mathbf{R}$: número de replicações tal que $\mathbf{r}$ representa o índice de replicação da simulação.

Quando um dos parâmetros de $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ ou $\mathbf{z}$ não é utilizado, o valor nominal dos parâmetros é tomado em consideração nas replicações.

3.2.2 Obtenção da amostra de números aleatórios

A partir da distribuição de probabilidade assinalada, cada combinação de parâmetros assume uma forma estocástica c^r , tendo, portanto cada elemento do vetor assumindo uma função densidade probabilidade (fdp) $f_X(x)$, $f_Y(y)$, $f_Z(z)$ que gera um conjunto de valores utilizados na replicação r , sendo seus valores contínuos denotados como X_i^r , Y_{ji}^r , ou Z^r .

Os valores obtidos no vetor simulado c^r são obtidos empregando-se um gerador de número aleatório a partir de distribuições de probabilidade de interesse. O objetivo de produzir números aleatórios é inferir uma sequência de números que se aproximam de números que seguem uma distribuição de probabilidade f . Estes números são utilizados em experimentos estatísticos, simulação de sistemas estocásticos, análise numérica com Métodos Monte Carlo,

jogos de computador, criptografia e outros (L'ECUYER, 2001). Tal geração é baseada na produção de variáveis aleatórias uniformes em um intervalo $[0,1]$ por causa da distribuição uniforme $\mathcal{U}_{[0,1]}$ (L'ECUYER, 1994).

Um gerador é definido como uma estrutura $G = (S, s_0, f, U, g)$, onde S é um conjunto finito de estados, $s_0 \in S$ corresponde ao estado inicial, $f: S \rightarrow S$ é uma função de transição (função que transforma na distribuição de probabilidade), U é um conjunto finito de símbolos de saída e $g: S \rightarrow U$ é função de saída (L'ECUYER, 2001).

Tendo a amostra de números distribuídos uniformemente, procede-se para uma transformação que é função da distribuição de probabilidade de interesse. O modelo deste trabalho utiliza os procedimentos de transformação para distribuição uniforme e distribuição triangular. Sobre uso destas distribuições, assume-se a dificuldade em afirmar o comportamento dos parâmetros utilizados no modelo dentro do contexto de avaliação de risco, sendo estas distribuições úteis para esta condição (ROBERT; CASELLA, 2004).

Figura 4 – Algoritmo para gerar amostra aleatória do vetor de parâmetros do cenário-caso

Algoritmo 1:

Entrada: $c \in \mathcal{C}$
 Saída: c^r
 Início
 Inicialização
 Declara c ;
 Para cada elemento de c faça
 $U[0,1] * seed \mathbf{d}_p$;
 armazena cada elemento em c^r ;
 Fim.

Fonte: O autor (2020).

Tal valor é instituído com base em um comportamento uniforme aleatório, $U[0,1]$ e um gerador da distribuição escolhida (*seed*), que são obtidos mediante uma distribuição triangular ou uniforme, úteis no contexto em que são se conhece a distribuição de um dado parâmetro (ROBERT E CASELLA, 2004).

O valor original de cada parâmetro é usado como uma referência no cálculo do valor aleatório da distribuição. Assim, no caso da distribuição uniforme, o valor aleatório obtido está em um intervalo igualmente preferível entre os dois parâmetros da distribuição, um valor máximo, a , e mínimo, b , que o parâmetro do modelo de decisão pode assumir. Para distribuição triangular, o valor mais provável corresponde ao valor original do parâmetro de entrada.

3.2.3 Cálculo da classificação da replicação, cl_r

Com os valores obtidos do vetor simulado de parâmetros do *cenário-caso*, o procedimento de obtenção do valor de risco para cada seção é recalculado, formando uma nova matriz de decisão para o procedimento de classificação com o ELECTRE TRI.

Figura 5 – Algoritmo utilizado para calcular o método ELECTRE TRI para o cenário-caso

Algoritmo 2:

Entrada: c_r

Saída: cl_r

Início

 Inicialização

 Para cada comparação de a_i e b_h

 Calcula Concordância Parcial;

 Calcula Discordância Parcial;

 Calcula Concordância Global;

 Calcula Índice de Credibilidade;

 Atribui relações de preferência;

 Aloca cada zona em uma classe;

 Armazena cada elemento em cl_r ;

Fim.

Fonte: O autor (2020).

O resultado da classificação gera um vetor, cl_r , com o índice da classe de cada seção de risco trabalhada. O algoritmo utilizado para calcular a classificação é descrito na figura 5.

3.2.4 Significância das classificações replicadas

Para este trabalho, nesta etapa, visa-se verificar a significância da variação de acordo com os experimentos de simulação, sabendo que o resultado da classificação de riscos de a_i em C_h é função das consequências, da utilidade destas, a probabilidade de ocorrência dos cenários e dos parâmetros de preferência utilizados. Assim, assume-se uma *função classificação de risco*, definida pela expressão 39.

$$h = f(P(p|\theta_{jk}, a_i), U(p), \pi_i(\theta_{jk}), Z) \quad (39)$$

Um índice h nominal para cada área é tomado como referência a partir da classificação dada em cl_0 . A cada replicação r o índice h é verificado, e um índice de *mudança de classe*, p_r , é determinado.

$$p_r = \begin{cases} 1, & \text{se } h_i^r \neq h_i^0 \\ 0, & \text{se } h_i^r = h_i^0 \end{cases} \quad (40)$$

Como o resultado de p_r se refere a um evento em que se têm somente dois resultados possíveis, modela-se p_r como um evento de Bernoulli tal que a mudança na classe é denotado como um evento de sucesso ($p_r = 1$), e a estabilidade na classificação original é tida como um fracasso ($p_r = 0$), como descrito na expressão 3.35. Como cada replicação é um ensaio independente, assume-se uma distribuição de probabilidade binomial modelando todas as replicações do experimento. Além disso, assume-se que a probabilidade de selecionar um elemento de mudança de classe é p e a probabilidade de selecionar um objeto da classe original é $q = 1 - p$ (SIEGEL; N. JOHN, 1988).

Assim, deixe $\hat{p}$ ser uma variável aleatória binominal para uma amostra de tamanho n , sendo $\hat{p}$ a proporção de mudança de classe da amostra. Quando n cresce, a distribuição binomial tende para distribuição normal, pois um teste binominal exato só pode ser usado para $n \leq 35$ (SIEGEL; N. JOHN, 1988). Mais precisamente, quando n cresce, a distribuição de $\hat{p}$ se aproxima da distribuição normal, com média np e variância npq (AGRESTI, 2017; AGRESTI; COULL, 1998).

Como não se pode estimar a real proporção da população, dá-se uma interpretação sob quão distante da verdadeira população a amostra simulada pode ser assumindo diversos valores para p_i como referência, ou seja, esta abordagem infere que cada seção se apresenta em níveis de sensibilidade diferentes, representados por uma faixa de proporção de mudança de classe delimitado por um limiar p_i . Assim, determina-se a faixa cuja área i está variando significativamente para cada cenário-caso. Dito isto, usa-se o teste binomial de proporções para estimar a significância da *proporção de mudança das áreas*, assumindo que a hipótese nula é definida como $H_0: \hat{p} = p_i$, ($P(\text{classificação mudar}) = P(\text{proporção referência})$), e a hipótese alternativa como $H_a: \hat{p} > p_i$, a proporção de mudança da classe da seção é maior que o valor de $\hat{p}$ testado.

Para efeitos de simplificação usa-se o intervalo de confiança para proporções como parâmetro para validar as hipóteses testadas, onde pode ser definido pela expressão 41 (AGRESTI; CAFFO, 2000).

$$\hat{p} \pm z_\alpha \sqrt{\hat{p}(1 - \hat{p})/n} \quad (41)$$

Esta hipótese infere uma proporção para a simulação, que cada seção tem uma proporção de mudança de classe para as faixas $p_i \leq 0,05$; $0,05 < p_i \leq 0,10$; $0,10 < p_i \leq 0,15$; $0,15 < p_i \leq 0,20$; $0,20 < p_i \leq 0,25$; $0,25 < p_i \leq 0,30$; $p_i > 0,30$. Por este teste é possível inferir quantas e quais seções tem uma proporção de mudança de classe dentro de cada faixa, gerando informação de sensibilidade do modelo diante de uma variação do cenário-caso.

Diante do discutido, generaliza-se a ideia da análise de robustez apresentada por Vetschera et al. (2010) e as abordagens apresentadas, sendo possível fazer afirmações sobre a sensibilidade do modelo de Brito, de Almeida e Mota (2010).

As informações geradas nesta etapa verificam a significância das seções servindo como base para análise de duas principais visões de avaliação da sensibilidade. A primeira é pautada sob uma perspectiva gerencial em que o decisor considera crítica a variação das seções por intensidade do risco, sendo analisadas as seguintes informações:

- **Estabilidade na classificação original:** analisa a validação da classificação original ao longo dos experimentos;
- **Classe mais provável:** determina qual a classe mais provável dentro do experimento. Quando a classificação é robusta o suficiente, o índice analisado anteriormente se iguala a este;

Sob um ponto de vista de contribuição deste trabalho, a segunda visão determina uma noção sobre o comportamento da classificação ao longo dos experimentos, em que as informações de sensibilidade são projetadas por meio de:

- **Número médio de seções por classe:** identifica a variação no número de áreas por classe;
- **Estabilidade da classificação original:** demonstra a proporção de mudança da classificação ao longo dos experimentos de simulação;

Sequencialmente, as informações de riscos geradas nesta etapa corroboram a ideia da variação das replicações, sendo base para a estruturação da visualização do risco que finaliza o fluxo que cria a percepção sob o risco em gasodutos de gás natural apresentado na figura 3. De forma geral, a importância de estabelecer procedimentos estruturados de classificação para o gerenciamento de riscos facilita a noção sobre como melhor tomar decisão em contexto de incertezas, tal como alocação ou realocação de recursos em condições emergenciais ou em risco iminente.

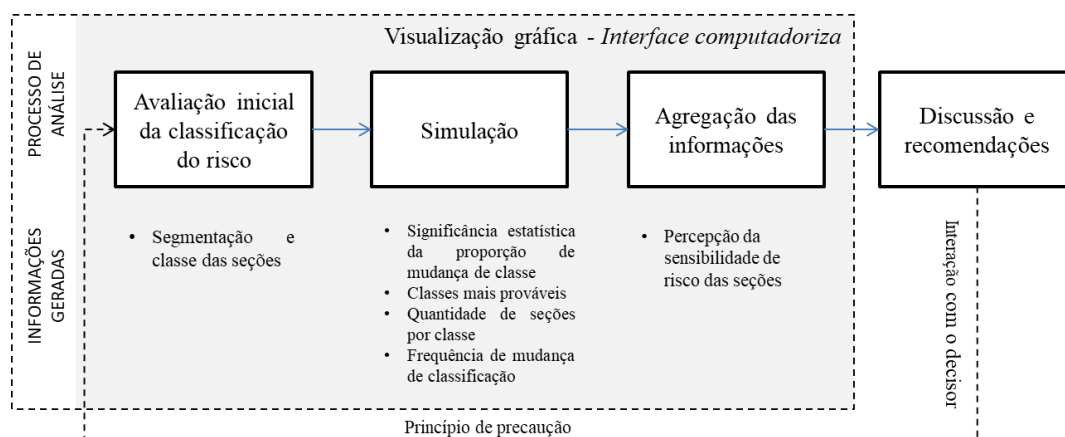
Portanto, para que se tenha uma noção compreensiva dos riscos, não é suficiente entender as suas causas, mas verificar o comportamento incerto destas causas (GOERLANDT; KHAKZAD; RENIERS, 2017). Isto é devido, pois o gerenciamento de riscos é um processo contínuo nas organizações, e o entendimento sobre possíveis diferenças nos modelos de classificação é crucial para reinicializar o procedimento de classificação entendendo a sensibilidade das recomendações.

3.2.5 Visualização da informação de risco de sensibilidade das seções

Atendendo a importância da discussão acerca da criação de percepção de risco e as estratégias visuais atreladas, a análise de sensibilidade para este modelo é apresentada na figura 6. Nesta, os processos da análise geram informações cruciais para agregar aos elementos visuais, tendo em vista que o detalhamento das informações pode gerar noções redundantes e/ou irrelevantes, desviando as interpretações necessárias, e direcionando efeitos adversos (MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016) na tomada de decisão final de classificação.

Portanto, a partir da observação e entendimento da classificação original dos riscos das seções, parte-se para a execução do experimento de simulação que gera as informações necessárias para consolidação dos resultados, como explicado no item 3.2.4.1. A intenção desta abordagem é mostrar que ao passo que as informações de sensibilidade são geradas por meio de uma interface computadorizada, o decisor tenha envolvimento para apresentar discussões e decidir sob medidas que possam evitar perdas em um tempo futuro, este comportamento é apresentado por Aven (2016b) como uma estratégia de precaução visto em condições de incerteza em que agentes potencialmente perigosos possam ter impactos a humanos e ao meio ambiente, mesmo que evidências não sejam conclusivas.

Figura 6 – Processo e informações para visualização da Análise de Sensibilidade do modelo



Fonte: O autor (2020).

Sob o delineamento desse fluxo apresentam-se os elementos visuais utilizados para a composição das informações que comunicam as incertezas dos parâmetros inerentes a classificação das seções.

Tabela 1 – Elementos visuais e motivação de uso

Elemento visual	Motivação
Histograma de seções sensíveis	Indica o resultado do teste de hipótese explicitado na seção 3.2.1 mostrando para qual faixa de proporção de mudança de classe a seção está localizada. Esta visualização demonstra a distribuição das seções sensíveis, quando maior for o pico do intervalo a direita, conclui-se variabilidade na classe original da seção
Gráfico radar de sensibilidade das seções	A forma do gráfico de radar representa o número de seções. Sob a visão de um procedimento de alocação, as linhas internas do gráfico representam as faixas de proporção de mudança a qual cada seção está, em que o primeiro nível (centro do gráfico) associa a uma faixa de proporção baixa ou nula, e, quanto mais próximo o ponto for do vértice, mais sensível é a seção. Além disto, por meio da comparação das áreas de cada procedimento, pode-se comparar a sensibilidade de cada modelo em relação aos dois procedimentos de alocação do ELECTRE TRI. Esta visualização é complementar ao histograma de seções sensíveis
Gráfico de barra empilhadas de variação das seções nas classes	A referência principal dessa visualização é fazer a comparação da classe original da seção e a variação das classes a qual as seções flutuam. Por meio dessa comparação pode-se associar qual a classe mais provável da seção
Diagrama de caixa	Esta visualização remete a quantidade de seções por cada classe. Por meio desse gráfico o decisor pode ter a noção da quantidade de seções que precisam de ações de mitigação, servindo como estimativa para alocação de recursos
Histograma de modificação da classificação	A frequência de modificação na classificação original é uma visão sob o experimento de classificação, onde visa-se identificar a frequência de modificação da classificação nominal para todas as seções sob a visão dos dois procedimentos: pessimista e otimista. Com essa visão pode-se identificar qual dos procedimentos sofre possíveis alterações na sua alocação, sendo uma abordagem crucial para a escolha de um procedimento que se adeque ao contexto de riscos usando o ELECTRE TRI

Fonte: O autor (2020).

4 APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo aborda a arquitetura e requisitos do Sistema de Apoio a Decisão elaborado para resolver avaliação de riscos de gasodutos. Aspectos relacionados à entrada, processamento e saída dos dados são apresentados. Sob uma perspectiva metodológica, alguns testes relacionados às limitações do método multicritério utilizado são discutidos. Na seção 4.2 é apresentado um caso aplicado do modelo e seus respectivos resultados.

Descrição do SAD

A partir do modelo descrito, um Sistema de Apoio a Decisão foi desenvolvido para auxiliar a execução de procedimentos que operacionaliza o tratamento dos dados de entrada, manipulação e processamento, até a saída de informações. Dito isto, o SAD propicia o alcance de eficácia no processo de tomada de decisão do usuário, característica de um modelo representativo (DE ALMEIDA; RAMOS, 2002).

Quanto à utilização do SAD, é essencial que haja a interação entre o decisor e o especialista, pois os elementos de inserção de dados e informações geradas são específicos para os métodos utilizados nas rotinas de cálculo, tais como os dados de entrada de parâmetros do ELECTRE TRI. De mesma, a interpretação das informações advindas da estatística utilizada para permite que o usuário entenda os resultados obtidos da maneira correta, como é discutido nos capítulos anteriores.

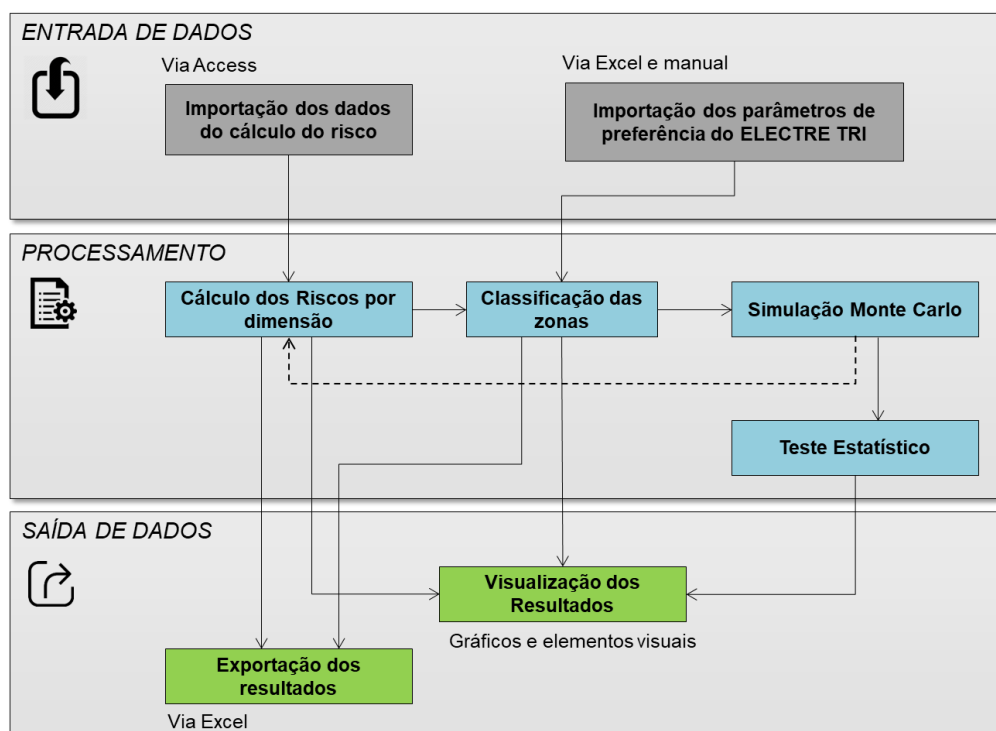
O SAD executa três principais rotinas: o cálculo do risco humano, financeiro e ambiental, a classificação das zonas de perigo, e por último, a análise de sensibilidade formulada para a classificação, que é deferida por meio de elementos visuais que ajudam na identificação da robustez do caso simulado.

Para que estas rotinas sejam executadas, a construção da arquitetura da aplicação foi desenvolvida em Ambiente Delphi 2010, utilizando a linguagem de programação Object Pascal em Windows voltada para desktop (*stand alone-based*). A aplicação integra outros sistemas como auxiliar as rotinas:

- Microsoft Excel: para importar e exportar dados de entrada e saída;
- Microsoft Access: para importar e exportar dados de entrada e saída;
- Biblioteca de gráficos *Teechart*: para visualizar as informações geradas em forma de gráficos;

Baseado na linguagem de programação utilizada, a aplicação é desenvolvida por meio da modularização, no qual as rotinas do software são divididas por unidades de execução, chamados de módulos, que quando integradas desempenham o objetivo proposto (PRESSMAN; MAXIM, 2014).

Figura 7 – Arquitetura do Sistema de Apoio a Decisão desenvolvido



Fonte: O autor (2020).

A figura 3 mostra a estrutura do sistema de apoio à decisão, que é apresentada a seguir detalhadamente.

4.1.1 Entrada de dados

Os dados de entrada são relacionados aos parâmetros do modelo de decisão utilizado, os quais incluem os usados no cálculo do risco de cada zona, que é independente do módulo de falha:

- L_i : extensão do gasoduto (m);
- d : diâmetro da seção do gasoduto (m);
- Q : vazão regular do gás (m³/s);
- v : valor da venda;

- w_{a_i} : estimativa da multa do contrato (\$/s);
- p_0 : valor da pressão constante (kgf/cm³);
- L_0 : extensão do gasoduto até o estado de compressão (m);
- Veg : quantidade de vegetação na zona de perigo crítica (%);
- β : constante de proporcionalidade (\$/J);
- n_{a_i} : número máximo de pessoas feridas;
- α_{a_i} : probabilidade de ter ao menos uma pessoa afetada pela radiação térmica;
- P_w : pressão de vapor de água saturada (N/m²);
- RH : umidade relativa (%);

Os parâmetros que variam por cenários, ou seja, a cada variação de cenário de ocorrência, seu valor muda, sendo eles:

- ω : fator que demonstra quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade ser uma queimadura de 1º ou 2º grau;
- $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$: constante relacionada ao cenário e seção (m²/J);
- g_{θ_{jk}, a_i} : inverso do tempo médio do apagamento das chamas (l/s);
- R : taxa de liberação do gás a partir do furo ou ruptura (m³/s);
- t_i : proporção do tamanho do furo (adimensional) obtido pela razão efetiva do furo pela área transversal do duto;
- z_{θ_{jk}, a_i} ;
- θ_{jk} : probabilidade de ocorrência do cenário acidental.

E os dados inerentes às preferências do decisor usados para determinação da função utilidade das dimensões e ELECTRE TRI:

- Os pesos dos critérios;
- Os parâmetros a , b e c relacionados às distribuições de probabilidade das utilidades das dimensões;
- Máxima perda para cada dimensão;
- Limiares de preferência, indiferença, veto e nível de corte;

Todos esses dados são inseridos na aplicação por meio de um arquivo de banco de dados do Microsoft Access, que é dividido em tabelas com os dados específicos apresentados. Assim, esses dados são computados, checados e arquivados de forma que suas configurações e locais

devem atender estritamente a maneira como foram projetados, ou seja, todos os campos devem estar devidamente preenchidos de acordo com a configuração do problema desenhado para a quantidade de alternativas, dimensões, cenários e restrições.

Tanto para o comportamento das utilidades quanto para as ordenações das constantes assume-se que o decisor é envolvido em um procedimento a parte junto ao especialista, no qual gera os dados de entrada necessários para esta aplicação. As utilidades unidimensionais para as três dimensões são assumidas através de uma aproximação sob a curva de preferência do decisor mediante distribuições de probabilidade, as quais citam-se exponencial, logística e linear. Os ajustes dessas distribuições são direcionados pelos valores de a , b e c , definidos pelas máximas perdas indicadas.

4.1.2 Processamento dos dados

Depois de inseridos os dados de entrada do modelo para a formulação do risco, a aplicação mostra o risco calculado para cada dimensão do problema. As perdas por dimensão associadas a cada área são multiplicadas pela probabilidade de ocorrência dos cenários acidentais e retiradas da perda de um cenário de normalidade. Assim, tem-se a matriz de consequência a ser utilizada na problemática de classificação, que exhibe as áreas em três classes, apontadas por 1 (classe de risco alto), 2 (classe de risco moderado) e 3 (classe de risco baixo). A classificação obtida nesta etapa é chamada de Classificação Original, cl_0 .

No que concerne à etapa de Análise de Sensibilidade, o usuário escolhe um conjunto de parâmetros referentes ao *cenário-caso* definido, uma distribuição de probabilidade (uniforme ou triangular), e o intervalo de variação. Com essa configuração, são gerados números aleatórios, que são utilizados para recalcular o risco associado a cada dimensão, e consequentemente a classificação das áreas do gasoduto.

No teste estatístico são avaliadas as mudanças nas classificações obtidas por seções dos gasodutos, identificando se houve uma proporção de mudança significativa assumindo que a mudança segue uma distribuição binomial. De forma mais específica, desde que o resultado das simulações para cada zona corresponde a dois resultados: mudança na classificação (1) e estabilidade na classificação (0), estes valores ao longo da replicação podem ser testados por um teste binominal de proporção. Para o caso estudado, obter variações significativas para as seções, indica que a mudança de classe passa a ser uma precaução para o decisor.

Então, através de um teste de hipótese, é possível avaliar classe do risco das seções com base no valor da proporção de mudança para as replicações, gerando a quantidade seções por faixas de proporção de mudança e as seções inerentes a estas faixas para valores de α 0,05 e 0,01.

4.1.3 Saída de dados

Sob a noção de significância estatística das seções, na análise dos resultados é verificado o percentual de vezes que uma seção permaneceu na classificação original assim como o percentual que variou ao longo das replicações.

Dado isso, gera-se uma visualização de gráficos em barras empilhadas com a margem de variação de cada classe de forma integrada. O objetivo desta visualização é determinar a variação de classificação por seção, tendo assim o decisor a informação necessária para avaliar as medias para a classificação do risco mais provável para cada seção. Complementando esta ideia, espera-se que o decisor faça a comparação da relação classificação original-classe mais provável.

O resultado da Análise de sensibilidade também é exibido por meio de um diagrama de caixa que aponta a quantidade de seções que permeiam as classes ao longo das replicações. Uma particularidade dessa visualização é que o decisor pode inferir sobre alocação de recursos diante dos cenários. Por exemplo, se o número de alternativas médio da classe 1 (risco alto) é maior que o demandado para classe posterior (risco moderado), há uma necessidade maior de gasto com mitigações. Mais detalhes sobre a visualização dos resultados são discutidos no item 3.2.5. Além disso, os resultados referentes a análise podem ser exportados quando necessário para o decisor.

4.1.4 Módulo de Classificação de Riscos

O procedimento de cálculo para o ELECTRE TRI é viabilizado por meio de condições lógicas para o Delphi. A manipulação matemática do ELECTRE usa funções e conjuntos de parâmetros para conseguir estabelecer as relações de preferência (FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2016). No entanto, algumas das formulações dessas funções não são necessariamente explícitas na literatura, tal como a influência do vetor na condição de discordância e as regras de alocação quando relações de incomparabilidade e indiferença são obtidas durante os

cálculos. Estas definições são cruciais para estabelecer a precisão dos resultados para análise de sensibilidade. Portanto, por meio de algumas suposições e condições lógicas, usa-se os trabalhos de Brito, de Almeida e Mota (2010) como teste de aplicação do procedimento lógico do algoritmo do ELECTRE TRI utilizado para o SAD. No final são feitas comparações entre as suposições com intuito de se obter definições mais claras em relação às implicações encontradas.

4.1.4.1 SAD na Aplicação 1

Para esta primeira aplicação usa-se o estudo de aplicação em Brito, de Almeida e Mota (2010), em que é obtida uma matriz de consequência para a mesma problemática tratada neste trabalho, esta matriz é exposta na tabela 2.

Tabela 2 – Matriz consequência do problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)

Trecho	Humano	Ambiental	Financeiro
a1	0,0093	0,0142	0,008
a2	0,018	0,0199	0,0326
a3	0,0249	0,0265	0,0101
a4	0,0085	0,027	0,0521
a5	0,0104	0,0113	0,0282
a6	0,0293	0,0181	0,0237
a7	0,0379	0,0152	0,0242
a8	0,0081	0,0128	0,0345
a9	0,0104	0,007	0,0233
a10	0,0205	0,0245	0,0554
a11	0,0565	0,044	0,0467
a12	0,019	0,0201	0,0738

Fonte: O autor (2020).

A matriz mostrada na tabela 2 é o resultado da avaliação do risco unidimensional para cada zona do gasoduto, utilizada para o procedimento de classificação com o ELECTRE TRI, anteriormente discutida da seção 3.1.7. Os parâmetros de preferências utilizados são exibidos na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do ELECTRE TRI para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)

Parameter	g1	g2	g3
Preference direction (min=0)	0	0	0
p	0,005	0,009	0,007
q	0,001	0,001	0,005
v (no veto)	-	-	-
weight	0,6	0,1	0,3
Profiles			
b1	0,025	0,025	0,05
b2	0,013	0,01	0,02

Fonte: Brito, de Almeida e Mota (2010).

Considerando um par de ações (a_1, b_1) , para estabelecer a relação de sobreclassificação tal que a_1 sobreclassifica (é tão bom quanto) b_1 faz-se a formulação dos seguintes índices: Concordância parcial, discordância parcial, concordância global e índice de credibilidade, discutidos de forma detalhada a seguir.

Para efeitos de comparação e discussão da manipulação matemática, tem-se um conjunto de critérios definido por j ($j = 1, \dots, n$), os quais suas performances em cada alternativa são analisadas a partir de limiares de indiferença q_j , limiares de preferência p_j e limiares de veto v_j . A relação de grandeza para estes parâmetros é apontada conforme expressão 41 (DIAS; CLÍMACO, 2000):

$$v_j \geq p_j \geq q_j \geq 0 \quad (41)$$

Assim, sabe-se que a vantagem de a_j em relação à b_j é representada por Δ_j , em que é estabelecido pela diferença da performance do critério j em uma alternativa $g_j(a_i)$ em relação a performance do perfil de cada categoria $g_j(b_h)$:

$$\Delta_j = \begin{cases} g_j(a_i) - g_j(b_h), & \text{se } j \text{ for para maximizar} \\ g_j(b_h) - g_j(a_i), & \text{se } j \text{ for para minimizar} \end{cases} \quad (42)$$

4.1.4.1.1 Índice de Concordância Parcial, $c(a_i, b_h)$

O cálculo da concordância parcial pode ser realizado de duas formas, a mais usual, como fora formulado originalmente por Roy e Bouyssou (1993), ou como elaborado por Mousseau e Dias (2004). Outras maneiras alternativas para o cálculo do índice são possíveis, como proposto em Dias e Mousseau (2003). No entanto, faz-se uma discussão no que concerne a formulação e estruturarão de uma diferença apresentada na primeira formulação por alguns autores, apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Formulação do índice de concordância

Referência	Formulação	Artigo
1	$\begin{cases} \Delta_j < -p_j, & 0 \\ \Delta_j \geq -q_j, & 1 \\ -p_j \leq \Delta_j < -q_j, & (\Delta_j + p_j)/(p_j - q_j) \end{cases}$	DIAS, L. C.; MOUSSEAU, V. IRIS: A DSS for multiple criteria sorting problems. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, v. 12, n. 4–5, p. 285–298, 2003.
2	$\begin{cases} \Delta_j < -p_j, & 0 \\ \Delta_j \geq -q_j, & 1 \\ -p_j \leq \Delta_j < -q_j, & (\Delta_j + p_j)/(p_j - q_j) \end{cases}$	DIAS, L. C.; CLÍMACO, J. N. ELECTRE TRI for Groups with Imprecise Information on Parameter Values. Group Decision and Negotiation, v. 9, n. 5, p. 355–377, 2000.
3	$\begin{cases} b_h - a_i \geq p_j, & 0 \\ b_h - a_i \leq q_j, & 1 \\ -p_j \leq \Delta_j < -q_j, & (a_i - b_h + p_j)/(p_j - q_j) \end{cases}$	MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R. Inferring an ELECTRE TRI Model from Assignment Examples. Journal of Global Optimization, v. 12, n. 2, p. 157–174, 1998.
4	$\begin{cases} a_i \geq b_j + p_j, & 0 \\ b_j + q_j > a_i, & 1 \\ (b_j + q_j \leq a_i < b_j + p_j, & (b_j - a_i + p_j)/(p_j - q_j) \end{cases}$	MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R.; ZIELNIEWICZ, P. Methodological Guide and User's Manual, 1999.

Fonte: O autor (2020).

O índice de concordância parcial expressa através das expressões apresentadas para qual extensão “a é tão bom quanto b”. Apesar da similaridade na representação dada essas inequações, percebe-se uma divergência na desigualdade da diferença de desempenho da alternativa e do perfil Δ_j com o limiar de preferência p_j . Esta divergência difere entre autores, e implica em resultados ligeiramente destoantes.

Com a codificação do SAD, as inequações das referências 1 e 2 apresentam uma condição ilógica na execução dos procedimentos para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010), sendo uma discussão a ser pontuada para o contexto de risco multidimensional. Esta condição é percebida na comparação da seção a_2 com o critério g_1 , onde o conceito de concordância parcial é refutado através da comparação com o limiar de preferência. Os cálculos desta comparação são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Cálculo do índice de concordância para comparação da seção a_2 com o critério g_1

	Referência 1 e Referência 2	Referência 4	Referência 3
$p_1=0,005$ $q_1=0,001$ $a_2=0,018$ $b_1=0,013$	1) Preferência $b - a < -p; 0$ $0,013 - 0,018 < -0,005$ $-0,005 < -0,005$ Afirmção não verdadeira 2) Indiferença $b - a \geq -q; 1$ $-0,005 \geq -0,001$ Afirmção não verdadeira 3) Preferência fraca Dessa forma, o valor da concordância deve estar entre o valor de 0 e 1. Mas a formulação do índice não corresponde a esse conceito, pois o valor do índice resulta em 0. Como percebido pelos cálculos abaixo: $(\Delta_j + p_j)/(p_j - q_j)$ $(-0,005+0,005)/(0,005-0,001) \rightarrow 0/0,004 = 0$ $c(a, b_1) = 0$	1) Preferência $a \leq b + p; 0$ $0,018 \geq 0,013 + 0,005$ $0,018 \geq 0,018$ A afirmação é verdadeira, portanto, $c(a, b_1) = 0$ 2) Indiferença $b + q > a; 1$ $0,013 + 0,001 > 0,018$ $0,014 \geq 0,018$ Afirmção não verdadeira	1) Preferência $a - b < p; 0$ $0,018 - 0,013 \geq 0,005$ $0,005 \geq 0,005$ Afirmção verdadeira 2) Indiferença $a - b \leq q; 1$ $0,005 \leq 0,001$ Afirmção não verdadeira

Fonte: O autor (2020).

Em termos de valor, o índice de concordância para este caso, e para as formulações apresentadas na tabela 5, não apresentam valores diferentes devido à igualdade na equação que expressa a preferência estrita em relação à diferença entre a alternativa e o perfil. Mas conceitualmente, a zona de hesitação do decisor deve ter um valor entre 0 e 1, o que não é explicitado, no caso da referência 1 e referência 2.

O problema tratado em Brito, de Almeida e Mota (2010) lida com uma matriz de decisão que possui números muito pequenos, fazendo com que a diferença trazida nas equações do modelo de classificação determine resultados diferentes conceitualmente, dependendo do caso, possivelmente não expressando a intenção dos conceitos dos índices. Neste caso, em que a quantificação do risco para cada seção é determinada pra um valor muito pequeno, qualquer diferença na avaliação pode acarretar resultados diferentes.

No entanto, o resultado final da classificação não muda devido à magnitude dos números para esse problema. Mas a diferença nas desigualdades, para outros problemas, pode causar mudanças no resultado, aumentando relativamente o valor do índice de concordância. Nenhum outro caso de modificação nas comparações entre as alternativas e os perfis foi encontrado para a matriz de decisão discutida em Brito, de Almeida e Mota (2010). Mesmo assim, adota-se as a referência 4 como base para a estruturação lógica do SAD.

4.1.4.1.2 Índice de discordância parcial, $d_j(a_i, b_h)$

Semelhante ao estado do índice de concordância, a discordância, apresenta certas diferenciações em relação a sua representação, tais como as desigualdades. No entanto, no problema de Brito, de Almeida e Mota (2010) não há critério discordante, portanto não foram testadas as diferenças das inequações que abrangem esse índice. A tabela 6 mostra a formulação dos índices para maximização de acordo com alguns autores.

Tabela 6 – Formulação do índice de discordância

Referência	Formulação	Artigo
1	$\begin{cases} a_j \leq b_h + p_j, & 0 \\ a_j > b_h + v_j, & 1 \end{cases}$	MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R. Inferring an ELECTRE TRI Model from Assignment Examples. <i>Journal of Global Optimization</i> , v. 12, n. 2, p. 157–174, 1998.
2	$\begin{cases} b_h \leq a_j + p_j, & 0 \\ b_h > a_j + v_j, & 1 \\ (b_h - a_i - p_j)/(v_j - p_j) \end{cases}$	FIGUEIRA, J. R.; MOUSSEAU, V.; ROY, B. ELECTRE methods. <i>International Series in Operations Research and Management Science</i> , v. 233, p. 155–185, 2016.
3	$\begin{cases} a_i - b_h \geq -p_j, & 0 \\ a_i - b_h < -v_j, & 1 \\ -v_j \leq a_i - b_h < -p_j, (a_i - b_h + p_j)/(p_j - v_j) \end{cases}$	J. R. FIGUEIRA, S. GRECO, B. ROY, AND R. SŁOWIŃSKI, “An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions,” <i>J. Multi-Criteria Decis. Anal.</i> , vol. 20, no. 1–2, pp. 61–85, Jan. 2013
4	$\begin{cases} a_j > b_j - p_j, & 0 \\ b_j - v_j \geq a_j, & 1 \\ (b_j + q_j \leq a_j < b_j + p_j, (b_j - a_j - p_j)/(v_j - p_j) \end{cases}$	MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R.; ZIELNIEWICZ, P. <i>Methodological Guide and User's Manual</i> , 1999.

Fonte: O autor (2020).

O índice de discordância se refere aos critérios que estão em oposição à afirmação que a sobreclassifica b. Ele atinge seu valor máximo quando a diferença de performance do critério em relação a e b atinge um determinado nível a qual se veta. Dessa forma, garante-se que um aumento significativo do desempenho de b pode influenciar a decisão de sobreclassificação. Esta característica mostra a não compensação do método (FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2016).

No caso de análise de riscos trabalhada, não se atribui veto. Nestes tipos de caso, o cálculo da discordância não é bem explicitado na literatura. Há porém, suposições acerca do índice. Como por exemplo, Figueira, Mousseau e Roy (2016) afirmam que quando não existe critério discordante, a credibilidade da relação de sobreclassificação é igual ao entendimento sobre o índice de concordância. Para isto, prova-se que:

$$\nexists d_j(a_i, b_h) \Rightarrow \sigma_j(a_i, b_h) = c_j(a_i, b_h) \quad (43)$$

Supostamente, o limiar de veto poderia assumir o valor de 0, mas para que seja 0, os limiares de preferencia e indiferença necessariamente precisam ser 0, satisfazendo uma restrição do modelo (DIAS; CLÍMACO, 2000). No entanto, o problema de riscos apresenta limiares de preferência e indiferença, que são maiores que 0, assim, o veto não assume valor de 0. Deste modo, a não existência desse limiar implica que o índice de discordância não atinge seu valor máximo, e, portanto não afeta a sobreclassificação de a em relação b, sendo apresentado pela relação seguinte.

$$\nexists v_j \forall a_i \wedge b_h \Rightarrow \nexists d_j(a_i, b_h) \wedge d_j(b_h, a_i) \quad (44)$$

Em outras palavras, se o efeito de veto é inexistente, então, o índice de discordância é também inexistente.

4.1.4.1.3 Concordância global

A concordância global computa o quanto da concordância que a sobreclassifica b é garantida pelo peso de todos os critérios (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998).

$$c(a_i, b_h) = \frac{\sum_{j \in F} k_j c_j(a_i, b_h)}{\sum_{j \in F} k_j} \quad (45)$$

Assim, a concordância global para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010) é calculado a seguir.

Tabela 7 – Concordância Global para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)

	(a _i , b ₁)	(b ₁ , a _i)	(a _i , b ₂)	(b ₂ , a _i)
a1	1	0	0,96	0,295
a2	1	0,04875	0	1
a3	0,99375	0,7	0,3	0,7
a4	0,9875	0,4	0,6	0,475
a5	1	0	0,69625	0,76
a6	0,505	0,62625	0,31125	1
a7	0,4	0,6	0,3475	1
a8	1	0	0,6775	0,415
a9	1	0	1	0,735
a10	0,94	0,475	0	1
a11	0,3	1	0	1
a12	0,7	0,35125	0	1

Fonte: O autor (2020).

4.1.4.1.4 Índice de credibilidade, $\rho(a_i, b_h)$

O grau de credibilidade expressa a que patamar se estende a relação de a sobreclassificação b de acordo com o índice de concordância global e o índice de discordância já calculado (FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2016).

$$\rho(a_i S b_h) = c(a_i S b_h) \prod_{j \in J: d_j(a_i S b_h) > c(a_i S b_h)} \frac{1 - d_j(a_i S b_h)}{1 - c(a_i S b_h)} \quad (46)$$

Para o problema tratado, o índice de credibilidade é igual ao índice de concordância global, devido à inexistência de critérios discordantes (FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2016), que é mostrado na tabela 8. A comparação par a par entre a alternativa e o perfil da classe é computada. Então, o valor do índice de credibilidade é comparado com um nível de corte λ , o qual assume-se o valor de 0,65, o mesmo aceito para o contexto de risco trabalhado em Brito, de Almeida e Mota (2010). O valor do nível de corte, pertencente ao intervalo [0,5;1] corresponde ao menor valor de $\rho(a_i, b_h)$ admissível a afirmação “a é ao menos tão boa quanto b” ser considerada como válida, que corresponde a analogia do poder do voto (FIGUEIRA et al., 2013). Na tabela 8, os valores acima de λ estão em verde, e os em vermelho estão abaixo.

Tabela 8 – Índices de Credibilidade para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)

	(ai, b1)	(b1, ai)	(ai, b2)	(b2, ai)
a1	1	0	0,96	0,295
a2	1	0,04875	0	1
a3	0,99375	0,7	0,3	0,7
a4	0,9875	0,4	0,6	0,475
a5	1	0	0,69625	0,76
a6	0,505	0,62625	0,31125	1
a7	0,4	0,6	0,3475	1
a8	1	0	0,6775	0,415
a9	1	0	1	0,735
a10	0,94	0,475	0	1
a11	0,3	1	0	1
a12	0,7	0,35125	0	1

Fonte: O autor (2020).

Para que uma alternativa sobreclassifique o perfil em comparação é necessário que o índice de credibilidade seja maior que o nível de corte, assim como o índice da comparação entre o perfil e a alternativa seja menor que tal nível (BOUYSSOU; MARCHANT, 2015).

$$a_i S b_h \Leftrightarrow \rho(a_i, b_h) \geq \lambda \wedge \rho(b_h, a_i) < \lambda \quad (47)$$

Assim pode-se obter as seguintes relações de preferência entre as alternativas e perfis (FIGUEIRA; MOUSSEAU; ROY, 2016):

- $\rho(a_i, b_h) \geq \lambda$ e $\rho(b_h, a_i) \geq \lambda$: a e b são indiferentes;
- $\rho(a_i, b_h) \geq \lambda$ e $\rho(b_h, a_i) < \lambda$: a é preferível a b;
- $\rho(a_i, b_h) < \lambda$ e $\rho(b_h, a_i) \geq \lambda$: b é preferível a a;
- $\rho(a_i, b_h) < \lambda$ e $\rho(b_h, a_i) < \lambda$: a e b são incomparáveis;

Tomando em consideração a definição para se estabelecer uma relação de sobreclassificação, apresenta-se as relações obtidas para o problema discutido na tabela 9.

Tabela 9 – Matriz de relação de preferencias para o problema de Brito, de Almeida e Mota (2010)

-	b0	b1	b2	b3
a1	>	>	>	<
a2	>	>	<	<
a3	>	I	<	<
a4	>	>	R	<
a5	>	>	I	<
a6	>	R	<	<
a7	>	R	<	<
a8	>	>	>	<
a9	>	>	I	<
a10	>	>	<	<
a11	>	<	<	<
a12	>	>	<	<

Fonte: O autor (2020).

4.1.4.1.5 Alocação das alternativas

No ELECTRE TRI, a partir das relações de preferência estabelecidas entre as alternativas e os perfis, podem-se adotar dois procedimentos de alocação de forma a determinar a que classe cada alternativa é designada, o procedimento pessimista e o otimista (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998).

A regra para o procedimento pessimista avalia que a alternativa é alocada a classe mais alta (com maior intensidade da relação de preferência $\mathcal{P}$), fazendo comparações iniciais do último perfil da classe alta até o perfil da classe mais baixa em preferência tal que aSb . Dias e Clímaco (2000) apresenta um algoritmo para esta alocação como segue:

Figura 8 – Algoritmo para alocação do procedimento pessimista

Algoritmo 3:

```

c ← h (melhor categoria)
ENQUANTO   não    $a_i S b_{c-1}$ 
FAÇA
  c ← c-1
FIM ENQUANTO
Aloque  $a_i$  na categoria  $\mathcal{C}^c$ 

```

Fonte: Dias e Clímaco (2000)

O procedimento otimista aloca cada alternativa a categoria com menor preferência tal que b^c é preferível a a_i :

Figura 9 – Algoritmo para alocação do procedimento otimista

Algoritmo 4:

$c \leftarrow h$ (pior categoria)
 ENQUANTO não $b^c P a_i$ FAÇA
 $c \leftarrow c+1$
 FIM ENQUANTO
 Aloque a_i na categoria C^c

Fonte: Dias e Clímaco (2000)

Como visto na tabela 9, a partir do índice de credibilidade é possível obter outras relações de preferência, formando um conjunto de pré-ordens completa no ELECTRE TRI. Quanto a estas relações, sabe-se que (ROY; BOUYSSOU, 1993):

- a) $aIb_h \Rightarrow (aSb_h) \text{ e } (b_hSa)$;
- b) $aR_{b_h} \Rightarrow (\text{Não } aSb_h) \text{ e } (\text{Não } b_hSa)$;

Figueira, Mousseau e Roy (2016) comentam que a maneira como as incomparabilidades que permanecem na pré-ordem são tratadas é, no entanto, sujeito ao criticismo. A noção sobre o tratamento dessa dificuldade é apresentada como uma dificuldade, pois a relação de sobreclassificação para estes casos não é necessariamente exposta.

No manual do software *Electre Tri 2.0* desenvolvido pelo laboratório LAMSADE (*Laboratoire d'Analyse et de Modelisation des Systèmes pour l'Aide à la Décision*) e descrito por Mousseau, Slowinski e Zielniewicz (1999) a relação de indiferença para o procedimento pessimista é vista como um impedimento para a alternativa ser alocada em uma classe de preferência maior, portanto sendo classificada na classe com menor preferência, para o procedimento otimista, a indiferença sustenta a afirmação de preferência do perfil em relação a alternativa comparada, propiciando a alocação da alternativa na classe mais baixa. No que diz respeito a incomparabilidade, no procedimento pessimista e no procedimento otimista, esta relação não viabiliza nenhuma das comparações entre o perfil e a alternativa, não tendo nenhum tipo de interferência na alocação.

No problema de Brito, de Almeida e Mota (2010) utiliza-se somente o procedimento pessimista, sendo obtida a seguinte classificação:

Tabela 10 – Classificação obtida em Brito, de Almeida e Mota (2010)

Alt	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
Classe	3	2	1	3	2	2	2	3	2	2	1	2

Fonte: Brito, de Almeida e Mota (2010)

Assumindo as mesmas condições para as relações de indiferença e incomparabilidade, baseado na matriz de relações dadas na tabela 9, obtém-se a seguinte classificação. Classe 1: seções 6, 7 e 11; Classe 2: seções 2, 3, 4, 10 e 12; Classe 3: seções 1, 5, 8, e 9.

Mesmo com essa divergência, a discussão acerca dos procedimentos de alocação é tida como uma dificuldade para contexto de riscos, pois o procedimento otimista faz alocações diferentes das seções nas classes de risco determinada. A diferença entre os dois procedimentos indica divergências significativas que podem dificultar a decisão sobre qual a melhor classe é adequada para o contexto de risco da seção.

Em termos práticos, uma seção que é classificada em classes extremas é inviável para o contexto administrativo. Apesar do conceito de cada procedimento de alocação ser claro em relação à postura do decisor, isto é, o decisor admite um comportamento otimista alocando uma seção em uma classe mais baixa, ou admitindo um comportamento pessimista, tal que sua percepção infere aquela seção em uma classe alta, pode ser de difícil análise. Esta dificuldade é devida quando se obtém muitas relações de indiferença e incomparabilidade nas comparações das seções e os perfis de perda.

Fazendo-se uma pequena alteração no nível de corte de 0,65 para 0,5 (menor valor admitido) para a aplicação discutida em Brito, de Almeida e Mota (2010), há redução na quantidade de relações de incomparabilidade e indiferença, o que consequentemente diminui a disparidade de classes alocadas para os dois procedimentos.

Assim, a percepção de risco e os procedimentos de alocação do ELECTRE TRI podem ser conjuntos, mas é necessário clarificar qual a melhor forma de tomar a decisão quanto à mitigação de risco. Assumir um comportamento de risco qualquer pode não ser a melhor postura quanto à minimização de perdas em ambiente de incertezas.

4.2 Aplicação do modelo

A aplicação deste modelo é necessariamente hipotética, advinda de dados simulados. Os dados gerados são baseados na aplicação de Krym et al (2012) e Brito, de Almeida e Mota (2010), onde são estudados os riscos das dimensões humanas, ambiental e financeira para um gasoduto de gás natural com extensão de 26.800 m, dividido em 8 seções, conforme visualizado na figura 10. As seções são definidas em um conjunto discreto de alternativas $S = \{S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8\}$ e independentes uma das outras. Para cada conjunto de cenário-caso de variação de parâmetros são gerados números aleatórios conforme distribuição estabelecida e replicadas 10.000 vezes.

Figura 10 – Visualização geográfica das seções



Fonte: O autor (2020).

O uso de dados simulados facilita o entendimento sob situações mais amplas ou sob situações extremas, em que não é possível estabelecer uma noção sob a consequência. Portanto, a cada replicação da Simulação Monte Carlo um vetor com amostras independentes é produzido a partir de distribuições teóricas de probabilidade.

Cada uma das seções apresentadas tem características distintas, mas apresentam alguns parâmetros uniformes. Por exemplo, a medida para diâmetro do gasoduto (d) é igual em toda sua extensão, com valor de 0,2031 metros. De mesma forma aos valores de pressão de operação $P_0 = 35 \text{ Kg/cm}^2$, pressão de vapor de água saturada $P_w = 3086 \text{ N/m}^2$, e umidade relativa RH 65%. Os demais valores que variam por seção, L_i , Q , v , w_{a_i} , L_0 , Veg , β , n_{a_i} , α_{a_i} , apresentam valores específicos ao longo dos trechos e são apresentados no ANEXO 1.

No que tange os valores dos parâmetros que variam por seção e cenário, a proporção do tamanho do furo t_i assume valor de 0,0181453 para uma ocorrência de ruptura no gasoduto e 0,00363 caso ocorra furos. Considerando esta condição, é atribuída a taxa de liberação do gás um valor de 2,82 e 1,35 m³/se para ruptura e furo, respectivamente.

O valor dado a quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade seja de uma queimadura de 1º ou 2º grau ω , foi alcançado por meio de seu valor padrão, considerando o valor máximo possível assumido nesta aplicação apresentado na equação 3.3. Isso significa que o produto entre ω e P_{fat} adicionada a probabilidade da fatalidade deve ser menor ou igual a 1. O valor dos outros parâmetros que variam por cenário e seção $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$, g_{θ_{jk},a_i} e z_{θ_{jk},a_i} apresentam valores diferentes para cada combinação de seção e cenário. As probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e o cenário de normalidade também são apresentadas no ANEXO 1.

Para o estabelecimento do conjunto de consequências foi considerado os três conjuntos de consequências mínima (sem danos) e máxima em cada dimensão. Para dimensão humana, foi estimado como 25 o maior número de pessoas com queimaduras de segundo grau por uma radiação de 15 kW/m² por um tempo de 30 segundos dentro de uma seção. Para o conjunto de consequências ambiental tomou-se como a área em metros quadrados atingida dentro dos cenários atingido, sendo para este contexto o valor aproximado de 413 m². Para dimensão financeira, o valor máximo assumido para o modelo equivale a R\$ 8.200.00,00. Os valores mínimos de perda, nas três dimensões é igual a zero, ou seja, a utilidade máxima é igual a 1 se não há perdas nas três dimensões.

Para as funções utilidades unidimensionais e os parâmetros de preferência do ELECTRE TRI, utilizou-se os dados de Brito, de Almeida e Mota (2010), a saber, estas funções são descritas por $U(h): \mu_h = 0,12$ ($R^2 = 0,91$), $U(a): \mu_a = 0,0017$ ($R^2 = 0,89$), $U(f): \mu_f = 3,5 \cdot 10^{-7}$ ($R^2 = 0,94$). De mesma forma, os limiares de preferência, indiferença, e perfis das categorias são apresentados como:

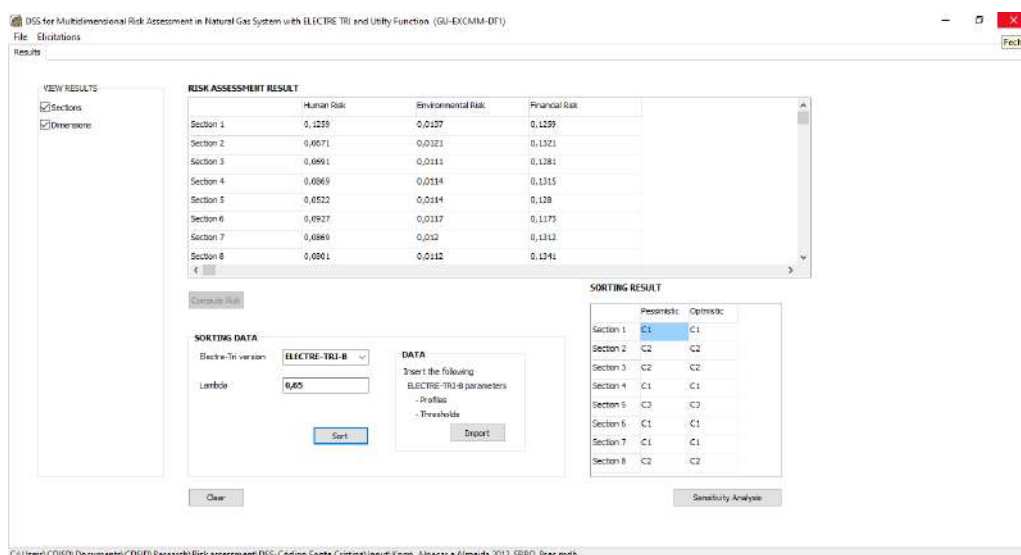
Tabela 11 – Parâmetros de preferência do ELECTRE TRI

Parâmetros	Humana	Ambiental	Financeira
p	0,005	0,009	0,007
q	0,001	0,001	0,005
Vetor	0	0	0
Pesos	0,41	0,34	0,20
Perfis			
b1	0,08	0,013	0,13
b2	0,06	0,011	0,11

Fonte: Brito, de Almeida e Mota (2010) e Krym et al (2012).

Os dados acima discutidos são inseridos no SAD, sendo exibida a matriz de riscos necessária para fazer a classificação das seções nas classes estudadas. Portanto, as duas classificações para os procedimentos pessimista e otimista são exibidas na Figura 11.

Figura 11 – Matriz consequência das seções e classificação original para o procedimento pessimista e otimista



Fonte: O autor (2020).

Percebe-se que as classificações tanto para o procedimento pessimista quanto para o otimista é a mesma. Isso significa que não existem relações de indiferença ou incomparabilidades na matriz de relações inicial. Baseado na condição da classificação original c_{l_0} , a sensibilidade de cada alternativa é estudada a seguir com aplicação do SAD desenvolvido.

Para efeitos de demonstração dos resultados gerados pelo SAD ao usuário tal qual o entendimento proposto destes, no primeiro cenário-caso, as informações de sensibilidade obtidas são detalhadas de acordo com o percentual de variação e distribuição de forma individual. Os resultados dos outros cenários são simplificados devido à quantidade de dados e

a diferença entre eles. Esta simplificação é construída a partir de informações que auxiliam o tomador de decisão na avaliação de sensibilidade, tais como:

- A simulação é realizada usando duas distribuições de probabilidade, a triangular e a uniforme, e por meio destas avalia-se aquela que representa um resultado mais crítico em relação à quantidade de seções que apresentam maior robustez. A distribuição que deveria ser assumida é aquela que infere mais sensibilidade ao modelo (níveis mais altos de sensibilidade das seções), pois representa uma análise mais conservadora, assim demonstrando com maior precisão a sensibilidade ao modelo em relação aos cenários-casos.
- Diferença entre os procedimentos de alocação. Se os resultados forem semelhantes para ambos procedimentos, então não há diferença;
- O mesmo é analisado para a diferença entre níveis de confiança.

Em alguns casos, os resultados não se diferem, tal como para diferença entre distribuição triangular e uniforme, ou para os dois procedimentos de alocação do ELECTRE TRI. Assim, verifica-se a importância de controle dos parâmetros atrelados a estas configurações de forma prática.

As informações de todos os cenários-casos com seus respectivos percentuais de variação são agregadas, proporcionando uma comparação mais holística da sensibilidade. Com estes resultados, algumas perguntas são direcionadoras para a tomada de decisão sob a avaliação de sensibilidade:

- Quantas seções com nível de sensibilidade alto são esperadas?
- Quais seções são mais sensíveis?
- Qual distribuição é mais conservadora para o experimento?
- Existe diferença entre os procedimentos de alocação da classificação?
- Existe diferença entre níveis de confiança?
- Quantas seções sensíveis são esperadas em classes de risco alto?
- Quais parâmetros (cenários) mais afetam a sensibilidade do modelo?

4.2.1 Cenário-Caso 1: Variação de todos os parâmetros do modelo

Nesta seção variam-se todos os parâmetros que compõem o modelo de decisão, tendo características que variam por seção (x) e por seção e cenário (y), e ainda aqueles que determinam as preferências (z). Neste intuito, verificam-se os percentuais de variação de 5%, 10% e 15% para distribuição triangular e uniforme para um número de 10.000 replicações. Neste caso são avaliados os parâmetros: L_i , d , Q , v , w_{a_i} , P_0 , L_0 , Veg , β , n_{a_i} , α_{a_i} , P_w , RH , ω , $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$, g_{θ_{jk}, a_i} , R , t_i , z_{θ_{jk}, a_i} , θ_{jk} , pesos das dimensões e nível de corte.

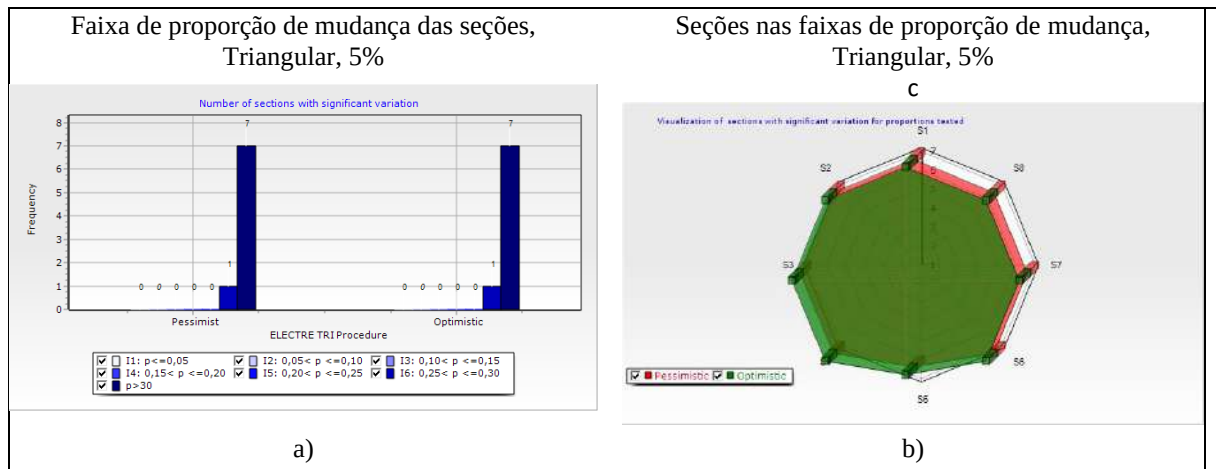
Para o cenário-caso, gera-se a avaliação para classificação usando o procedimento pessimista e o procedimento otimista. Espera-se aferir a robustez da classificação para seção indicando a quantidade de seções por faixa de proporção de mudança significativa, as faixas que cada seção pertence, a variação das seções nas classes de risco e a dispersão para cada replicação por meio da visualização gráfica destes.

O resultado em relação à sensibilidade da classificação das seções utilizando uma distribuição triangular é mais sensível comparada a distribuição uniforme. Dessa forma, a distribuição triangular infere um aspecto conservador mais evidente quando analisado os resultados, pois as seções tiveram níveis de sensibilidade maiores comparados aos da distribuição uniforme, a qual é suprimida.

4.2.1.1 Análise do Cenário-Caso 1 com distribuição Triangular

A partir da figura 12 é possível observar o resultado do teste de proporção para o cenário-caso 1 sob uma distribuição triangular com 5% de variação nos valores nominais dos parâmetros para 95% e 99% de confiança. Para os dois intervalos de confiança percebe-se que 1 seção está na faixa de $0,25 < p \leq 0,30$ e as outras 7 seções se encontram na faixa de $p > 0,30$. Isso quer dizer que quase todas as seções são sensíveis para o cenário-caso 1 tanto para o procedimento pessimista quanto para o otimista.

Figura 12 – Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe e faixa de proporção para sensibilidade das seções com alfa 0,05 e 0,01 e variação de 5% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1

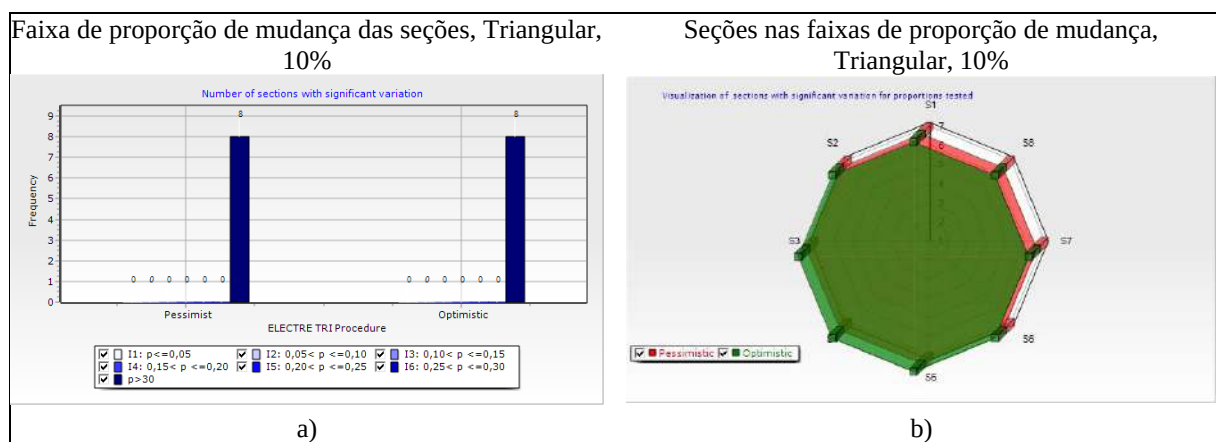


Fonte: O autor (2020).

Além disto, não há diferença nas quantidades de seções para os dois valores de alfa. Na figura 12, pode-se identificar que a Seção 5 é a única menos sensível em relação ao resto das seções para o procedimento pessimista e também para o otimista.

Em uma variação de 10% com a mesma distribuição, percebe-se uma mudança na quantidade de seções. Neste cenário, a modificação de todos os parâmetros conjuntamente com uma variação de 10%, implica que a proporção de mudança de classe para todas as seções é superior a 30%. O gráfico de radar (Figura 13b) corrobora essa afirmação mostrando que a área para os dois procedimentos alcança o extremo dos vértices, mostrando que todas as seções estão em faixas altas de modificação de classe.

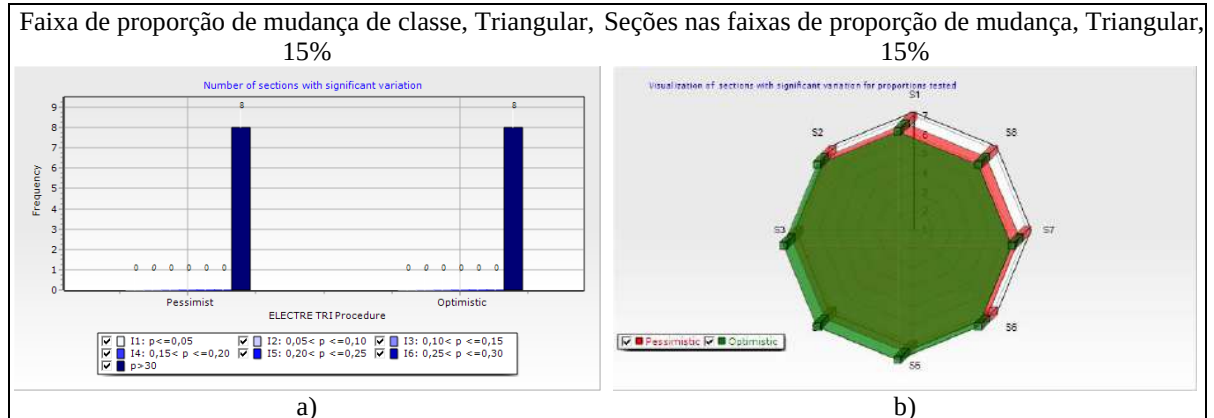
Figura 13 – Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe e faixa de proporção para sensibilidade das seções com alfa 0,05 e 0,01 e variação de 10% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1



Fonte: O autor (2020).

Outra variação para distribuição triangular de 15% é testada como visto na Figura 14. Como na configuração anterior do cenário-caso 1, todas as alternativas estão em uma faixa de proporção de variação da classificação maior que 30%, mostrando que não há diferenças na variação da distribuição dos dois cenários-caso, também para os dois intervalos de confiança.

Figura 14 – Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe e faixa de proporção para sensibilidade das seções com alfa 0,05 e 0,01 e variação de 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1



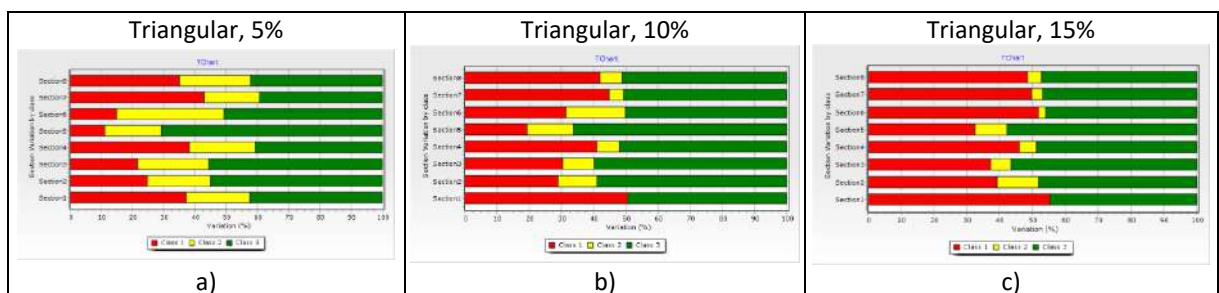
Fonte: O autor (2020).

Sob a perspectiva de proporção de mudança explicitada, verifica-se a variação em relação às classes mediante os dois procedimentos de alocação do ELECTRE TRI (figura 15).

A seção 1, classificada originalmente na classe 1, varia praticamente 50% do tempo em outras classes para todos os intervalos de variação, não sendo tão grande a diferença entre os mesmos.

Considerando que as seções 4, 6 e 7 estão em classes de risco alto, então sua flutuação em classes mais brandas de riscos significam uma situação amena em contenção do risco. De forma similar, para o procedimento otimista, as seções 1, 4, 6, 7 têm distribuições semelhantes ao pessimista mesmo com condições diferentes no intervalo da distribuição.

Figura 15 –Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1



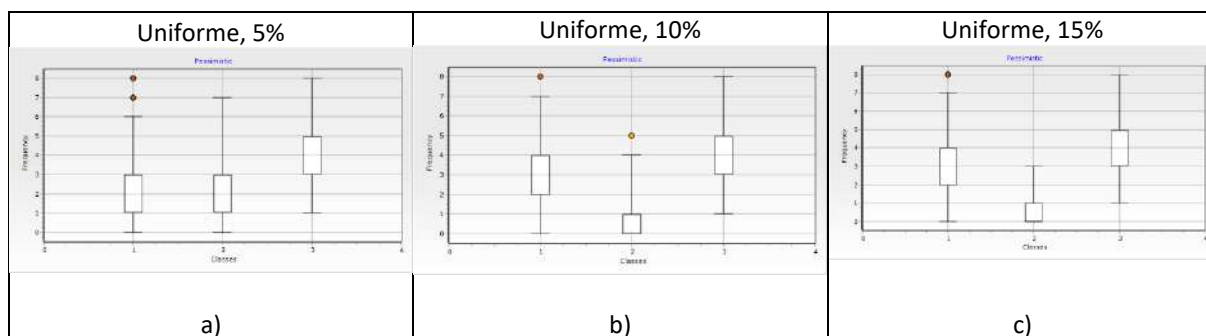
Fonte: O autor (2020).

Em contrapartida, as seções 2, 3 e 8 são alocadas em regiões das classes mais extremas como as de risco alto e baixo. Um fato importante sob o comportamento das seções é que a medida que o percentual de variação aumenta, a distribuição da classe de risco moderado diminui, sendo as seções classificadas praticamente nas classes 1 ou 3.

Sob a perspectiva do número de replicações, com a figura 16, observam-se variações na quantidade de seções por cada classe através dos gráficos de caixa. A efeito de informação, os gráficos gerados pela aplicação Delphi 2010 delineiam dois tipos de *outliers* (valores extremos da amostra), os *mild out* (pontos) e os *extra out* (asteriscos).

Nos dois procedimentos de classificação e para todos os intervalos de variação atribuídos, o desvio na quantidade de seções das três classes é alto. De um ponto de vista de alto risco, a classe 1 concentra de 1 a 4 seções. A classe 2, tem uma dispersão grande, mas concentra em média até 3 seções. E a classe 3, a mais branda em risco, apresenta de 3 a 5 seções classificadas.

Figura 16 – Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1

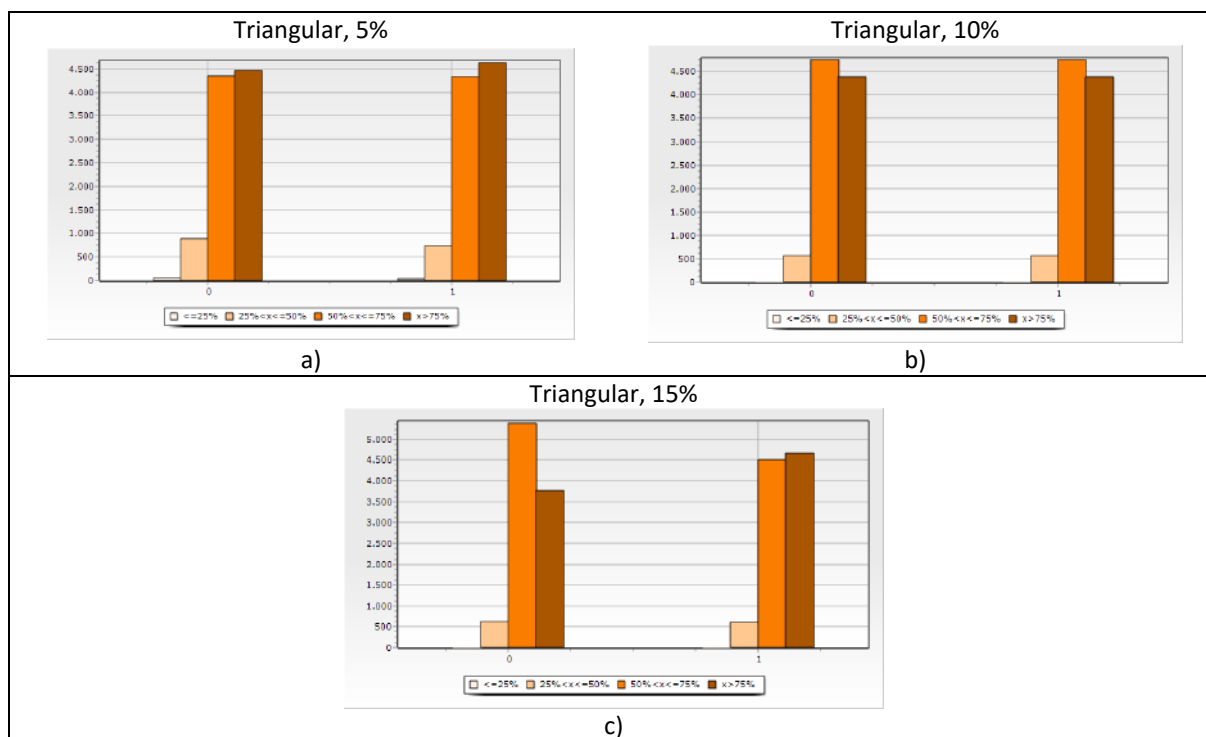


Fonte: O autor (2020).

Sob a visão das replicações, apresenta-se uma comparação de frequência de proporção mudança da classificação original entre os dois procedimentos de alocação, pessimista e otimista. Na Figura 17, diante de uma distribuição triangular de 5%, o procedimento pessimista, (representado pelo ponto 0) e o otimista (apontado no ponto 1) tem uma distribuição alta de frequência de modificação de classificação de 50% a 100% em relação as replicações. Esse comportamento é visto pela altura das barras na altura de 4200. Isso significa que em uma replicação de 10.0000, em 4200 vezes a classificação original cl_0 foi modificada em uma proporção de 50% a 100%.

A diferença entre os dois procedimentos é invertida quando a variação no parâmetro da distribuição aumenta para 10%, mas com frequências semelhantes. Para uma variação maior no cenário-caso de 15%, figura 17c, o procedimento pessimista apresenta uma vantagem em relação ao otimista, pois a frequência de proporção de mudança é menor.

17 – Frequência de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 1



Fonte: O autor (2020).

4.2.2 Cenário-Caso 2: Variação conjunta dos parâmetros que variam por seção

Este cenário-caso é proveniente de características físicas incertas do gasoduto, dentre as quais se cita: extensão do gasoduto, o diâmetro, a vazão do gás, valor da pressão constante, pressão de vapor de água saturada e umidade relativa.

De mesma forma, outros dependem da localização, tais como extensão do gasoduto até o estado de compressão, quantidade de vegetação na zona de perigo crítica, número máximo de pessoas feridas, probabilidade de ter ao menos uma pessoa afetada pela radiação térmica e outras. Além destes, há parâmetros que dependem do acordo entre o fornecedor e receptor do gás que são o valor de venda do gás e a estimativa da multa do contrato.

Mediante distribuição triangular e uniforme sob os valores de variação de 5%, 10% e 15%, 10.000 replicações são executadas de forma a projetar a sensibilidade do modelo de avaliação de risco discutido.

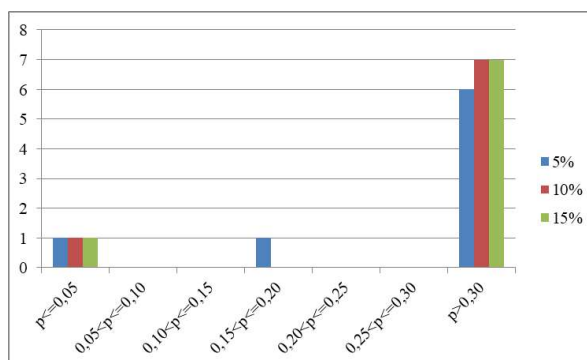
Para efeito de simplificação, a apresentação dos resultados a seguir consolidados e agregados para as discussões. O cenário-caso 1 foi delineado sob o fluxo do SAD, tendo suas demonstrações de forma que o usuário tenha as noções sob como manusear e obter os resultados projetados pelo SAD.

A distribuição uniforme nesta configuração infere mais sensibilidade ao modelo, portanto, é menos robusta as variações testadas. Dessa forma, o experimento com a distribuição triangular é suprimido para questões de análise.

4.2.2.1 Análise Cenário-caso 2 com distribuição Uniforme

Os resultados obtidos nesta configuração mostram que tanto para o grau de confiança e para o procedimento de alocação não existe diferença na quantidade de seções. Assim, na figura 18, três seções apresentam-se dispersas para proporções de modificações de classe com menos de 20% ao longo das replicações. Os diferentes valores de variação da distribuição, 5% (barra azul), 10% (barra vermelha) e 10% (barra verde) apontam que entre 6 e 7 alternativas apresentam sensibilidade para uma proporção de 30% em relação ao total simulado.

Figura 18 – Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para Cenário-Caso 2



Fonte: O autor (2020).

Pela tabela 12, as seções que são mais robustas para a variação de 5% são as seções 1 e 6, sendo o mesmo para o procedimento otimista. Com as simulações feitas para variação de 10% e variação de 15%, a seção 1 é a única que se permanece em um nível de robustez com

divergências em relação à sua classe original. Não existe diferença para os dois intervalos de confiança e nem para os procedimentos de alocação.

Tabela 12 – Faixa de proporções das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme e alfa para alfa de 0,05 e 0,01 para Cenário-Caso 2

Seções	Variação 5%	Variação 10%	Variação 15%
S1	1	1	1
S2	7	7	7
S3	7	7	7
S4	7	7	7
S5	7	7	7
S6	4	7	7
S7	7	7	7
S8	7	7	7

Fonte: O autor (2020).

Sabendo que as seções 1 e 6 são robustas a sua classe original, averigua-se o comportamento das classificações das demais seções de acordo com a configuração do cenário-caso testado. Primeiramente, os resultados para o procedimento otimista e pessimista são os mesmos. A seção 2, 3, 4 transita entres a classe 1 e 3. A seção 5, 6 tende a permanecer na mesma classe, e a seção 2 tem sua classe mais provável (células em cinza da tabela 13) tendendo a classe 1.

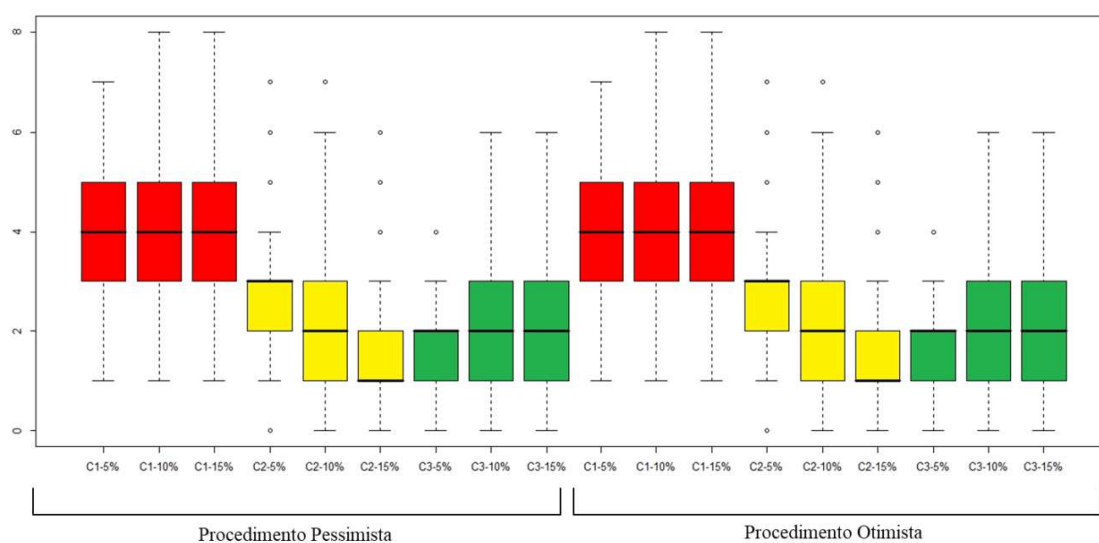
Tabela 13 – Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para o Cenário-Caso 2

Seções	Classe original	Variação de 5%			Variação de 10%			Variação de 15%		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
S1	1	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
S2	2	32%	23%	46%	41%	12%	48%	50%	9%	41%
S3	2	30%	29%	41%	40%	13%	47%	44%	10%	46%
S4	1	54%	35%	10%	51%	18%	30%	51%	12%	36%
S5	3	1%	32%	67%	21%	21%	58%	31%	14%	55%
S6	1	82%	18%	0%	66%	31%	3%	59%	25%	16%
S7	1	56%	44%	0%	53%	29%	19%	52%	19%	29%
S8	2	38%	55%	7%	44%	29%	27%	47%	19%	34%

Fonte: O autor (2020).

A quantidade de seções para as variações testadas permanece a mesma para classe 1, de 3 a 5 seções. Para a classe 2, risco intermediário, as quantidades de seções se alteram quando a variação é maior, tem-se de 2 a 3 seções para variação de 5%, e 1 a 2 seções para 15%. Já a quantidade de seções na classe 3 é em torno de 1 a 3 seções. O procedimento otimista apresenta o mesmo comportamento, conforme é ilustrado através no gráfico de caixa da figura 19.

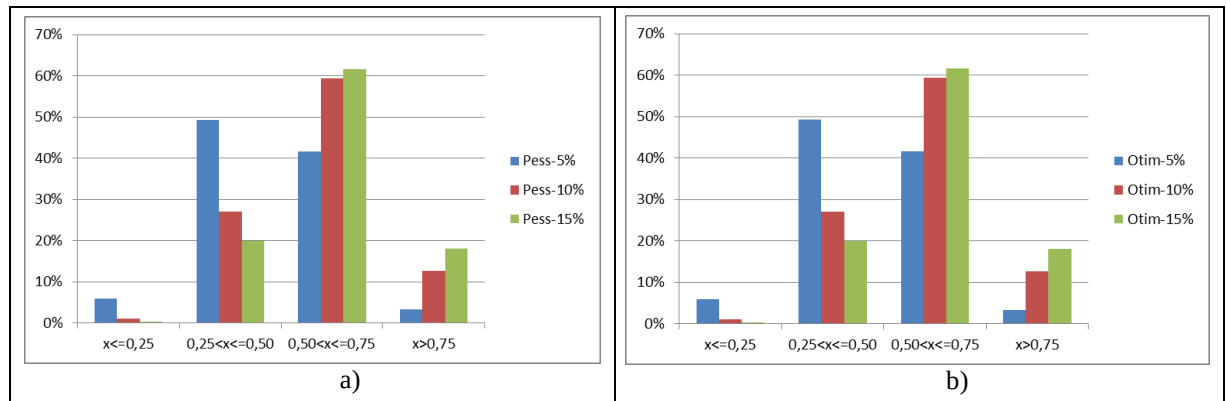
Figura 19 – Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para o Cenário-Caso 2



Fonte: O autor (2020).

A avaliação sob a mudança da classificação original é vista pela figura 20, em que é possível visualizar a distribuição de modificação para os três diferentes valores de variação da distribuição uniforme. As concentrações das amostras de classificação simuladas para 15% e 10% são próximas e mais direcionadas à direita da proporção de modificação. Isso significa que para este cenário-caso as classificações simuladas mudam na maior parte do tempo, não tendo sua classificação original estável.

Figura 20 – Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição uniforme para o Cenário-Caso 2



Fonte: O autor (2020).

4.2.3 Cenário - Caso 3: Variação conjunta dos parâmetros que variam por seção e cenário

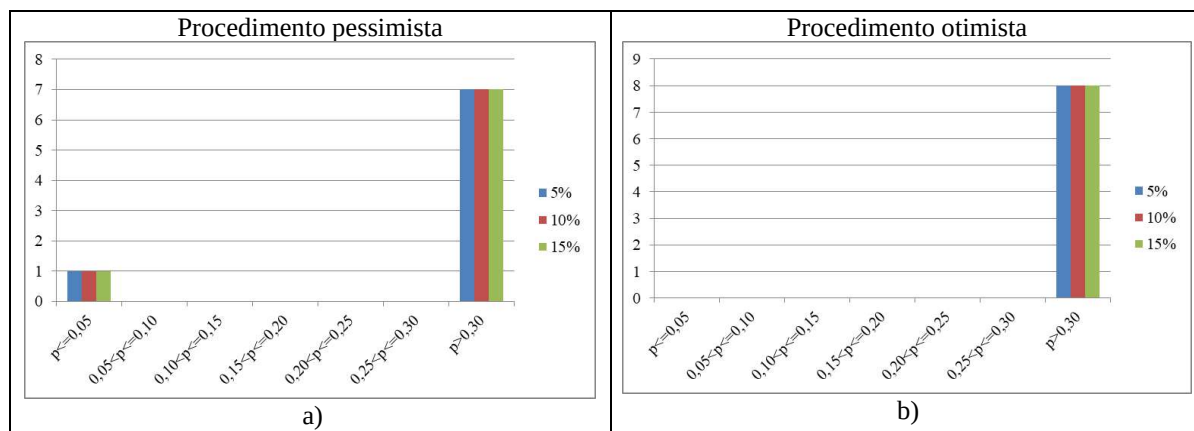
Os parâmetros que definem este cenário-caso é a base para investigar a instabilidade dos cenários de ocorrência. Para tal, analisa-se de forma global a variação dos parâmetros ω , fator que demonstra quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade ser uma queimadura de 1º ou 2º grau; $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$, constante relacionada ao cenário e seção (m^2/J); g_{θ_{jk}, a_i} , inverso do tempo médio do apagamento das chamas (l/s); R, taxa de liberação do gás a partir do furo ou ruptura (m^3/s); t_i , proporção do tamanho do furo (adimensional) obtido pela razão efetiva do furo pela área transversal do duto; z_{θ_{jk}, a_i} e θ_{jk} : probabilidade de ocorrência do cenário accidental. Foram simuladas 10.000 replicações para as variações de 5%, 10% e 15% utilizando a distribuição triangular e uniforme.

Neste cenário-caso a distribuição triangular é mais sensível às variações testadas, já a distribuição uniforme infere menos sensibilidade ao modelo, ou seja, infere mais robustez do modelo. Para efeito de análise, os resultados da distribuição uniforme são suprimidos.

4.2.3.1 Análise do Cenário-caso 3 com distribuição Triangular

Como é visto na figura 30, o procedimento pessimista apresenta menos seções com sensibilidade alta para todos os graus de confiança testado. Neste caso, não existe diferença entre os graus de confiança. Com o procedimento otimista, entende-se que a avaliação das seções se torna sensível com a simulação.

Figura 21 – Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 3



Fonte: O autor (2020).

Através da tabela 14, identifica-se que a seção 1 é a mais robusta para todos os valores de variação da distribuição com grau de confiança de 95% e 99%, pois os resultados são iguais.

Tabela 14 – Faixa de proporções de mudança das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para alfa de 0,05 e 0,01 para Cenário-Caso 3

Seções	Variação 5%		Variação 10%		Variação 15%	
	Pess	Otim	Pess	Otim	Pess	Otim
S1	1	7	1	7	1	7
S2	7	7	7	7	7	7
S3	7	7	7	7	7	7
S4	7	7	7	7	7	7
S5	7	7	7	7	7	7
S6	7	7	7	7	7	7
S7	7	7	7	7	7	7
S8	7	7	7	7	7	7

Fonte: O autor (2020).

Sabendo da sensibilidade da seção 1, as demais seções são expressas partindo do entendimento de classe mais provável, visto na tabela 15 para o procedimento pessimista e na tabela 16 para o procedimento otimista.

Tabela 15 – Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 3

Seções	Classe original	Variação de 5%			Variação de 10%			Variação de 15%		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
S1	1	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
S2	2	51%	10%	39%	49%	4%	47%	50%	3%	47%
S3	2	47%	12%	41%	50%	1%	50%	49%	0%	50%
S4	1	50%	50%	0%	50%	27%	23%	50%	6%	44%
S5	3	47%	3%	50%	50%	0%	50%	50%	0%	50%
S6	1	60%	40%	0%	50%	50%	0%	49%	20%	31%
S7	1	49%	51%	0%	50%	27%	23%	50%	4%	46%
S8	2	50%	50%	0%	51%	6%	43%	50%	0%	50%

Fonte: O autor (2020).

No procedimento pessimista, as seções 2, 3, 5 transita de forma mais provável entre as classes 1 e 3. As seções 6, 7 e 8 tem seus percentuais de variação maiores nas classes 1 e 2, mas quando a variação de 15% é aplicada para a configuração do cenário-caso 3, as seções tendem a ser mais provável entre as classes 1 e 3.

Tabela 16 – Variação das seções nas classes para o procedimento otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 3

Seções	Classe original	Variação de 5%			Variação de 10%			Variação de 15%		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
S1	1	51%	49%	0%	50%	22%	29%	50%	1%	49%
S2	2	34%	27%	39%	44%	9%	47%	48%	3%	49%
S3	2	41%	18%	41%	48%	2%	50%	49%	1%	50%
S4	1	50%	50%	0%	50%	27%	23%	50%	3%	47%
S5	3	0%	49%	51%	21%	29%	50%	42%	7%	50%
S6	1	50%	50%	0%	50%	0%	50%	49%	0%	51%
S7	1	49%	51%	0%	50%	27%	23%	50%	2%	48%
S8	2	50%	50%	0%	51%	6%	43%	50%	0%	50%

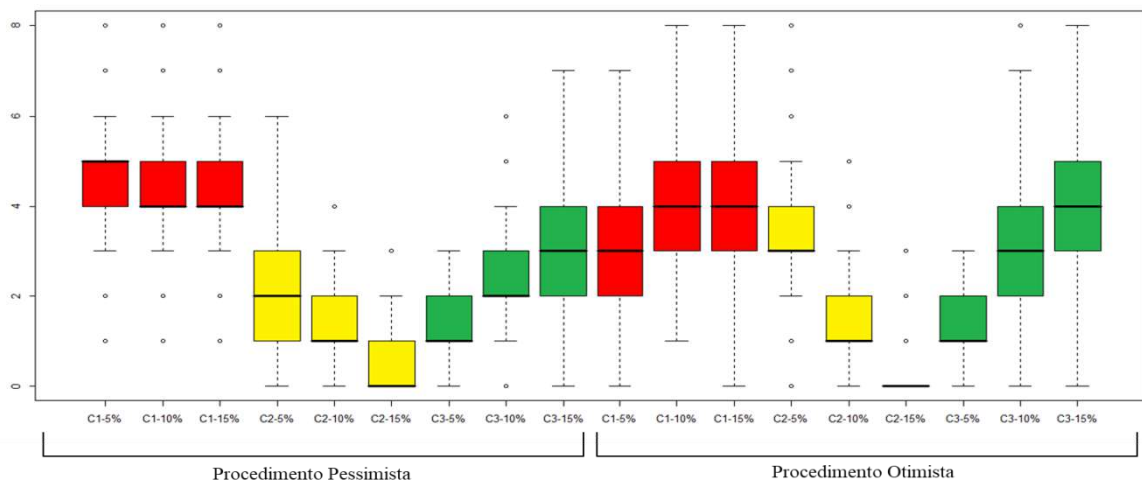
Fonte: O autor (2020).

Em seguida, no procedimento otimista, os valores atribuídos a variação das seções para classe são demonstrados na tabela 16, onde a seção 2 e 3 se dispersam entre as classes 1 e 3, e as seções 4, 6, 7 e 8 apresentam maior frequência nas classes 1 e 2 para uma variação de 5%, no entanto, quando o valor assume 10% e 15%, estas seções se acoplam às classes 1 e 3.

A visualização da figura 22 mostra que para o procedimento pessimista, tem-se uma quantidade de seções de 4 a 5 para os três valores de variação na classe de risco alto. Para classe

de risco intermediário, a quantidade de seções diminui para 1 até 3 seções quando a variação é 5%, mas essa quantidade é reduzida para 15%, com valores de 0 a 1 seção nesta classe. Já na classe 3, a quantidade de seções aumenta com o crescimento do valor de variação da distribuição, mas não ultrapassa a quantidade de seções em risco alto, sendo uma informação importante para o decisor quanto ao discernimento na alocação de recursos.

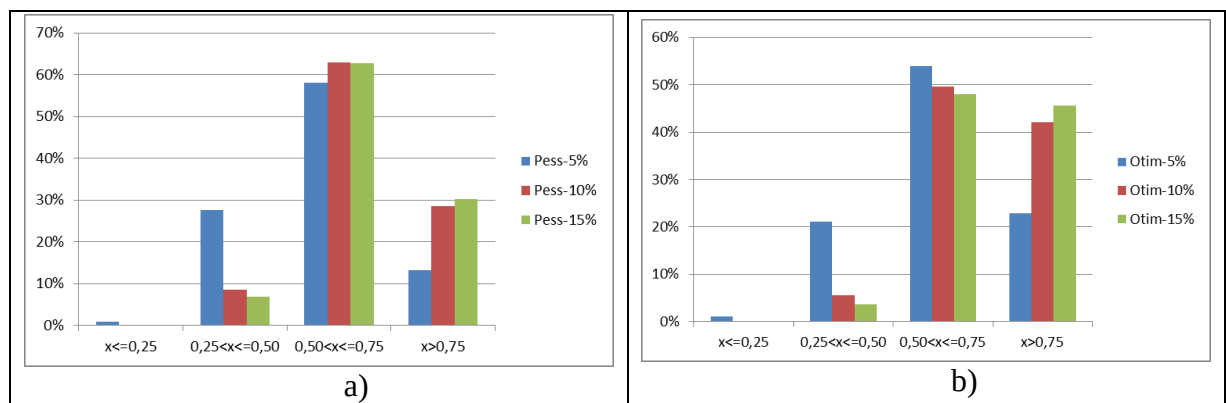
Figura 22 – Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 3



Fonte: O autor (2020).

A distribuição da frequência de modificação da classificação original para o cenário-caso 3 utilizando a distribuição triangular é vista na figura 23. Em mais de 50% das simulações, para todos os valores de variação da distribuição triangular há uma concentração das amostras de classificação entre 50% e 75% de modificação da classificação original.

Figura 23 – Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 3



Fonte: O autor (2020).

Para 10% e 15% a dispersão da frequência é semelhante tanto para o procedimento pessimista (figura 23a) quanto para o otimista (figura 23b).

4.2.4 Cenário-Caso 4: Variação dos parâmetros do Fluxo de Calor (I)

O fluxo de radiação média apresenta valores distintos para cada seção, pois varia de acordo com o cenário acidental, de furo ou ruptura. Os parâmetros inerentes a este cenário-caso é: P_w, RH , utilizados na formulação da transmissividade atmosférica (τ_Q); P_0, L_0, d, a_i associados à taxa efetiva de vazamento de gás Q_{eff} . Com a variação do fluxo de calor pode-se ter instabilidade na consequência ambiental, pois o fluxo interfere nos cálculos da extensão de área de vegetação queimada (p_a), e da função da variável aleatória t_Q , que é o tempo de apagamento das chamas.

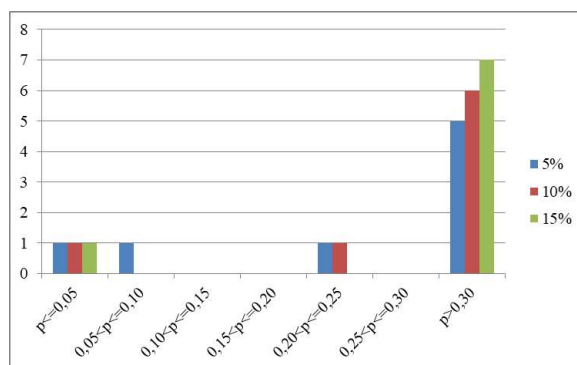
Sob outra visão, o fluxo de calor tem imediata influência no cálculo da probabilidade de ocorrer uma fatalidade (P_{fat}) a um indivíduo atingido. Por consequência, o parâmetro ω assume uma parcela de P_{fat} , sendo, portanto, estes dois parâmetros dependentes de I. Vale ressaltar que o estudo de I para dimensão humana, neste sentido, é importante, pois estabelece noções concisas sob o impacto às pessoas.

Sob o lado da dimensão financeira, os danos decorrentes do aumento ou redução do fluxo de calor liberado, afetam danos físicos, a propriedades e multas e indenizações.

Foram simuladas 10.000 replicações para as variações de 5%, 10% e 15% utilizando uma distribuição triangular.

O cenário-caso 4 apresenta seções mais dispersas nas faixas de proporção para os graus de confiança de 95% e 99% e para os dois procedimentos de alocação (figura 24), não tendo diferença nestas configurações em termos de quantidade de seções.

Figura 24 – Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 4



Fonte: O autor (2020).

Assim, com grau de confiança de 95% para o procedimento pessimista a otimista com variação de 5% (Ver tabela 17), as seções 1 e 6 são mais robustas. A seção 5 se encontra na faixa 5, $0,20 < p \leq 0,25$. Com 10% de variação, a seção 1 e 6 permanecem na mesma faixa de proporção, e com 15%, somente a seção 1 contém sua classe original de forma robusta.

Tabela 17 – Faixa de proporções de mudança das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para alfa de 0,05 e 0,01 para o Cenário-Caso 4

Seções	Variação 5%		Variação 10%		Variação 15%	
	Pess	Otim	Pess	Otim	Pess	Otim
S1	1	1	1	1	1	1
S2	7	7	7	7	7	7
S3	7	7	7	7	7	7
S4	7	7	7	7	7	7
S5	5	5	7	7	7	7
S6	2	2	5	5	7	7
S7	7	7	7	7	7	7
S8	7	7	7	7	7	7

Fonte: O autor (2020).

Conforme procedimento pessimista, o procedimento otimista apresenta os mesmos resultados para as faixas de proporções das seções.

Sabendo da sensibilidade das seções, visualiza-se a classe mais provável para cada uma das seções. Para uma variação de 5%, as seções 2, 3 permeiam entre as classes 2 e 3. As seções 4, 7 e 8 apresentam flutuação entre as classes 1 e 2.

Tabela 18 – Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 4

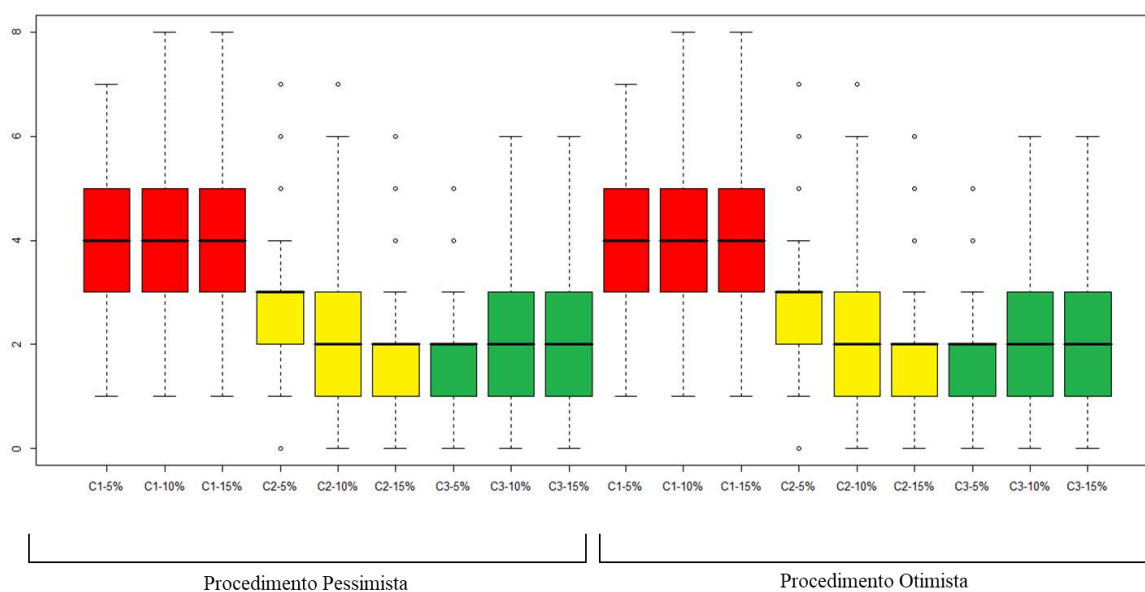
Seções	Classe original	Variação de 5%			Variação de 10%			Variação de 15%		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
S1	1	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
S2	2	23%	37%	40%	35%	20%	45%	43%	15%	42%
S3	2	18%	47%	35%	32%	25%	43%	37%	19%	45%
S4	1	57%	40%	2%	54%	29%	18%	52%	20%	27%
S5	3	0%	23%	77%	9%	26%	64%	19%	21%	60%
S6	1	92%	8%	0%	76%	24%	0%	68%	26%	6%
S7	1	61%	39%	0%	55%	36%	9%	55%	28%	18%
S8	2	32%	67%	1%	41%	43%	16%	45%	32%	23%

Fonte: O autor (2020).

De mesma forma, os resultados para a classe mais provável das seções no procedimento otimista são iguais ao procedimento pessimista.

Na figura 25, a quantidade de seções na classe 1 é apresentada entre 3 a 4 seções para todas as variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular. Para a classe de risco intermediário (classe 2), há diferenças na dispersão de acordo com a variação, mas a quantidade é vista em torno de 1 a 3 seções. Para classe 3, a dispersão é maior, tendo uma quantidade de 1 a 3 seções. O mesmo resultado é observado para o procedimento otimista.

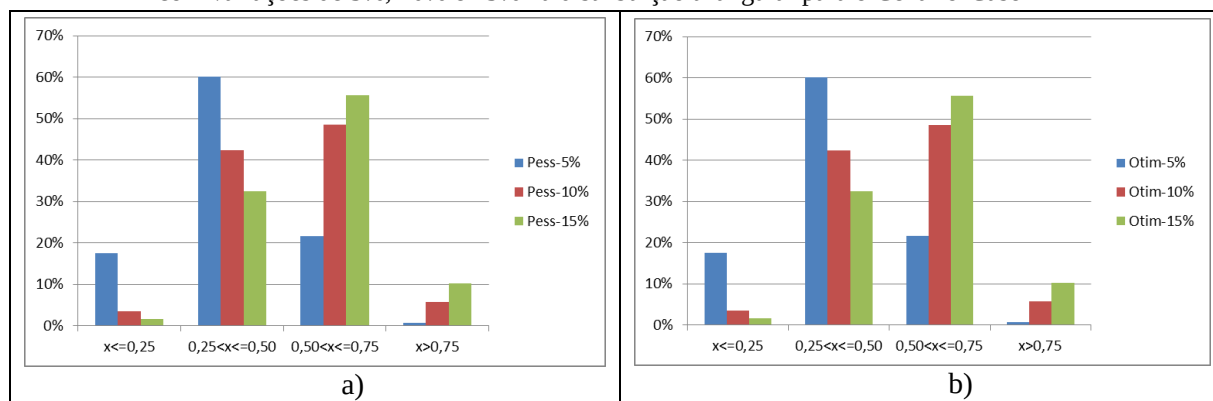
Figura 25 – Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário - Caso 4



Fonte: O autor (2020).

Com o procedimento pessimista (figura 26a), para uma frequência de 60% das simulações, as amostras de classificação com variação de 5% apresentam de 25% a 50% em relação a classificação original. Com uma frequência de 49% das simulações, as amostras de 10% de variação são encontradas em torno de 50% a 75%.

26 – Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 4



Fonte: O autor (2020).

O mesmo resultado é visto para o procedimento otimista com as variações de 5%, 10% e 15% para o cenário-caso 4.

4.2.5 Cenário-Caso 5: Variação dos parâmetros do Raio Máximo de Perigo

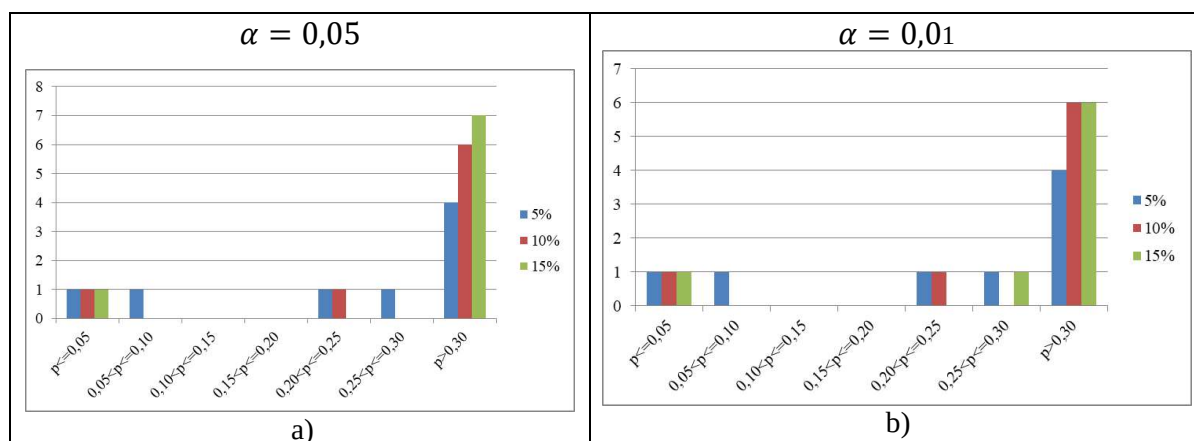
Visto que o Raio Máximo de Perigo (CDR) é calculado a partir de uma área de perigos sob a perspectiva de um jato horizontal do gás, tendo interação sobre vários parâmetros de cunho humanos, ambiental e financeiro. Os parâmetros variados para este cenário-caso são: pressão operacional do duto p_0 , o diâmetro do gasoduto d e o estado de compressão L_0 .

A variação de abrangência do raio pode afetar diretamente a área de vegetação atingida, pois este implica no cálculo da área multiplicada pelo percentual de vegetação atingido (parâmetro %Veg), na dimensão ambiental. Na dimensão financeira, sua relação impacta no cálculo da transmissividade atmosférica no valor de ξ_i , e nas perdas financeiras por danos a propriedades, multas e indenizações ($M(t_Q)$), dado na equação 3.22. Além destes, na dimensão humana, o CDR tem relação com o número máximo de pessoas feridas na área afetada, que corresponde ao parâmetro n_{a_i} . Além destes, o cálculo do fluxo de calor (I) também é afetado

pela instabilidade do CDR. Para este estudo foi verificado a variação de 5%, 10% e 15% para uma distribuição triangular para 10.000 replicações.

Como apresentado na figura 27, diferentes seções são avaliadas com maior robustez com o aumento da variação da distribuição, pelo menos uma seção encontra-se na faixa $p \leq 0,05$ (pelas barras azul, vermelho e verde) para ambos os procedimentos de alocação. A diferença é vista na comparação entre os graus de confiança, onde uma seção se encontra menos robusta na faixa $0,25 < p \leq 0,30$. Para 5% de variação, 5 seções são sensíveis; para 10%, 6 seções são sensíveis; e para 15%, 7 seções são sensíveis, pois estão na faixa de 30% de modificação da sua classe ao longo das replicações.

Figura 27 – Histograma das seções nas faixas de proporção de mudança de classe para os procedimentos pessimista e otimista com alfa de 0,05 e 0,01 com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 5



Fonte: O autor (2020).

Para o grau de 95% de confiança, tais seções sensíveis são expostas na tabela 19, em que no procedimento pessimista com variação de 5%, a seção 1 se encontra na faixa de proporção 1, e a seção 6 na faixa de proporção 2. As seções 5 e 8 encontram-se em um nível de sensibilidade maior, nas faixas 5 e 6, respectivamente. Na variação de 10%, as seções 1 e 6 são mais robustas que as demais. Para 15% de variação, somente a seção 1 é robusta.

Tabela 19 – Faixa de proporções de mudança das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular e alfa de 0,05 para o Cenário-Caso 5

Seções	Variação 5%		Variação 10%		Variação 15%	
	Pess	Opt	Pess	Opt	Pess	Opt
S1	1	1	1	1	1	1
S2	7	7	7	7	7	7
S3	7	7	7	7	7	7
S4	7	7	7	7	7	7
S5	5	5	7	7	7	7
S6	2	2	5	5	7	7
S7	7	7	7	7	7	7
S8	6	6	7	7	7	7

Fonte: O autor (2020).

Para um grau de 99% de confiança, a única diferença para 95% de confiança é em relação a robustez da seção 6, que sai se apresenta menos sensível na faixa de $0,25 < p \leq 0,30$, como supracitado.

Tabela 20 - Faixa de proporções das seções para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular e alfa de 0,01 para o Cenário-Caso 5

Seções	Variação 5%		Variação 10%		Variação 15%	
	Pess	Opt	Pess	Opt	Pess	Opt
S1	1	1	1	1	1	1
S2	7	7	7	7	7	7
S3	7	7	7	7	7	7
S4	7	7	7	7	7	7
S5	5	5	7	7	7	7
S6	2	2	5	5	6	6
S7	7	7	7	7	7	7
S8	6	6	7	7	7	7

Fonte: O autor (2020).

Pela visão de sensibilidade das seções, discute-se as classes mais prováveis àquelas que não apresentam robustez constante. Em uma variação de 5% da distribuição, a seção 2 e seção 3 transitam entre a classe 2 e 3. As seções 4, 7 e 8 permeiam entre as classes 1 e 2. A seção 5 se encontra na classe majoritariamente na classe 3, sua classe original, mas muda para classe 2 também.

Tabela 21 – Variação das seções nas classes para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 5

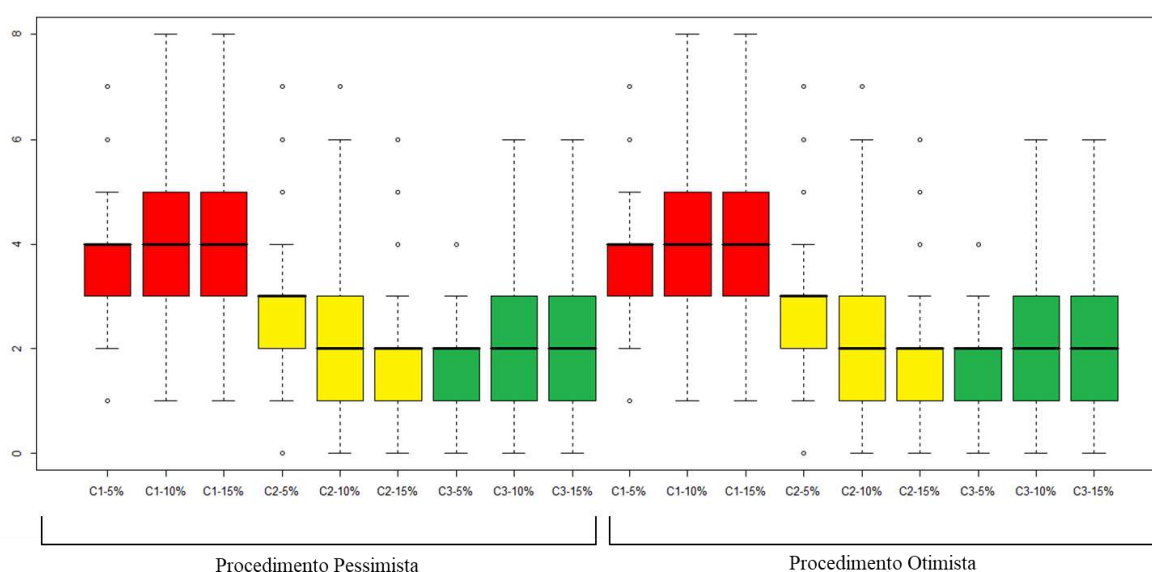
Seções	Classe original	Variação de 5%			Variação de 10%			Variação de 15%		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
S1	1	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
S2	2	22%	38%	40%	35%	20%	46%	41%	15%	44%
S3	2	18%	47%	35%	32%	26%	42%	37%	17%	46%
S4	1	57%	41%	2%	54%	28%	18%	53%	20%	28%
S5	3	0%	22%	78%	9%	26%	65%	19%	20%	61%
S6	1	93%	7%	0%	77%	23%	0%	69%	26%	5%
S7	1	61%	39%	0%	55%	37%	8%	53%	29%	17%
S8	2	30%	70%	1%	40%	45%	15%	43%	32%	24%

Fonte: O autor (2020).

O procedimento otimista (tabela 21) faz as alocações das seções nas classes de forma semelhante ao procedimento pessimista, a variação das seções nas classes é a mesma, portanto, os mesmos resultados supracitados.

Na figura 28 pode-se identificar que a quantidade de seções na classe 1 é em torno de 1 a 4 seções para uma variação de 5%, quando este valor aumenta, a dispersão aumenta para 3 a 5 seções. Em uma dimensão da classe 2, a quantidade de seções alterna entre 1 e 3 seções dependendo do valor de variação a distribuição. Para a classe 3, tem-se de 1 a 3 seções. Os mesmos resultados são vistos para o procedimento otimista.

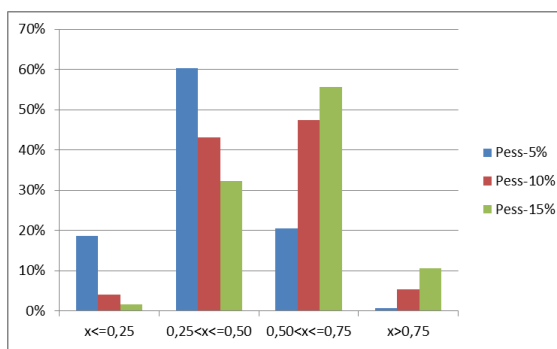
Figura 28 – Quantidade de seções por classe para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 5



Fonte: O autor (2020).

Com o procedimento pessimista (figura 29), para uma frequência de 60% das simulações, as amostras de classificação com variação de 5% apresentam de 25% a 50% em relação à classificação original. Com uma frequência de 43% das simulações, as amostras de 10% de variação são encontradas em torno de 50% a 75%. Com uma frequência de 56% das simulações, as amostras de 15% de variação são encontradas em torno de 50% a 75%.

Figura 29 - Histograma de modificação da classificação original para os procedimentos pessimista e otimista com variações de 5%, 10% e 15% na distribuição triangular para o Cenário-Caso 5



Fonte: O autor (2020).

Com o procedimento otimista (Figura 41), os mesmos resultados são identificados, tendo a mesma previsão de modificação que o procedimento pessimista.

4.3 Discussão dos resultados da análise de sensibilidade

Foram avaliados 5 cenários-casos, com variações de 5%, 10% e 15% utilizando a distribuição triangular e a distribuição uniforme. A partir deste estudo foi demonstrado que estas variações ocasionam mudanças na classificação original de cada seção em faixas de proporção significativos, sendo uma etapa inicial para desdobrar as informações de sensibilidade do risco, como as seções que diferem de sua classe original e a flutuação nas classes de risco alto.

Sob uma perspectiva de todos os cenários, pode-se avaliar todas as informações utilizadas neste trabalho. O nível de sensibilidade das seções nestes cenários pode ser visto na Figura 30, onde 1 representa o nível de sensibilidade menor e 7 o nível de sensibilidade maior. É possível verificar que a seção 1 tem uma sensibilidade menor em relação a maioria dos cenários. O procedimento otimista para esta seção é visto de forma diferente no cenário SECCEN, a sensibilidade para esta é alta nas configurações testadas.

A seção 5 e 6 apresentam sensibilidade menor em algumas das faixas de variação para os cenários de variação CDR e FLC. Portanto, a diferença nas configurações dos cenários afeta a classificação original da maioria das seções. No entanto, o cenário que mais causa sensibilidade nas seções é o Cenário-caso 1 (TP), onde todos os parâmetros do modelo são variados. Os cenários-casos 2 (SEC), 4 (CDR) e 5 (FLC) são semelhantes a nível de sensibilidade. Neste caso, infere-se somente sobre a sensibilidade, e não como esta sensibilidade afeta o processo de gerenciamento de risco. A sensibilidade e a ideia sobre a problemática de decisão são separadas, diferentemente da abordagem tratada por meio de índices de sensibilidade em que se pode inferir sobre o modelo de forma sistemática. No caso da ordenação, o índice de Tal de Kendall infere sobre a sensibilidade e o nível de reversão de uma ordenação.

Figura 30 - Níveis de sensibilidade das seções em todos os cenários-casos

Seções	Cenário - TP			Cenário - SEC			Cenário SECCEN						Cenário CDR			Cenário FLC		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%		10%		15%		5%	10%	15%	5%	10%	15%
	*	*	*	*	*	*	P	O	P	O	P	O	*	*	*	*	*	*
S1	7	7	7	1	1	1	1	7	1	7	1	7	1	1	1	1	1	1
S2	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S3	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S4	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S5	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	5	7	7	5	7	7
S6	7	7	7	4	7	7	7	7	7	7	7	7	2	5	7	2	5	7
S7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	7	7	7	7	7

Fonte: O autor (2020).

Mas de um ponto de vista de risco, essa sensibilidade é avaliada tomando a classe mais provável, resumido na figura 31. Mesmo com a sensibilidade alta do Cenário-caso 1 (TP), a maioria das seções variam para a classe de risco mais baixa. A situação fica mais preocupante no cenário-caso 3 quando a maioria das seções para as variações testadas estão de forma mais provável na classe 1, risco alto, representado por 1 na tabela 31. Por exemplo, nos cenários SECCEN, CDR e FLC, as seções 1, 4, 6, 7 e 8 se estendem para classificações em níveis de risco alto, sendo seções de constante preocupação do ponto de vista de mitigação. Na prática isto significa que os parâmetros atrelados a estes cenários devem ser controlados. Para os cenários-casos 2, 4 e 5 as classes mais prováveis para as seções estão entre as classes 1 e 3.

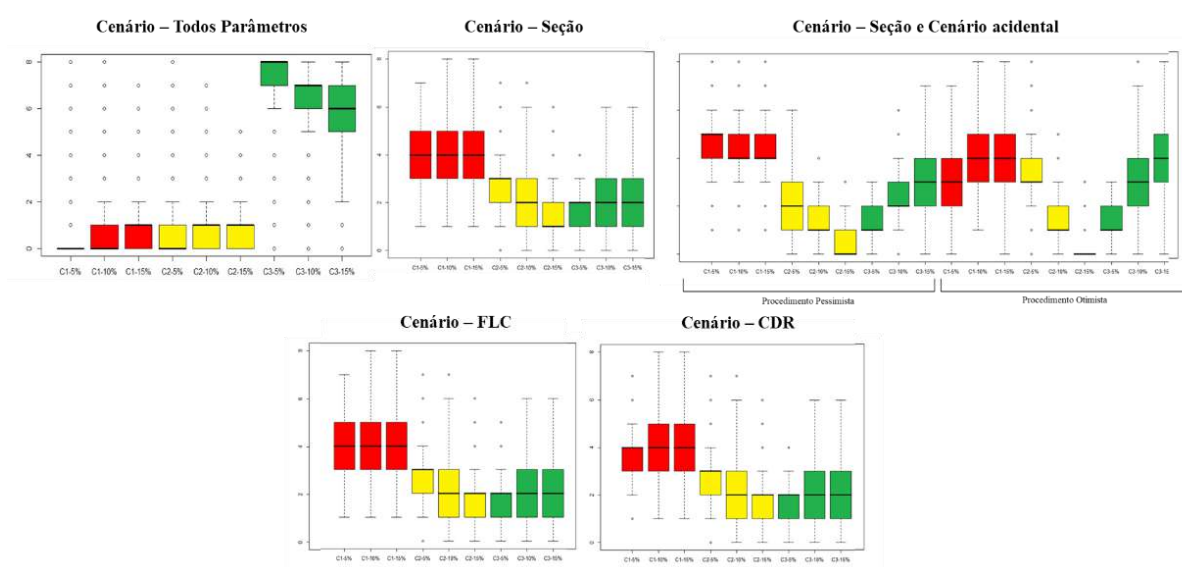
Figura 31 - Classe mais provável das seções para todos os cenários-casos

Seções	Cenário - TP			Cenário - SEC			Cenário SECCEN						Cenário CDR			Cenário FLC		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%		10%		15%		5%	10%	15%	5%	10%	15%
	*	*	*	*	*	*	P	O	P	O	P	O	*	*	*	*	*	*
S1	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S2	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	1
S3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3
S4	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
S6	3	3	3	1	1	1	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1
S7	3	3	3	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S8	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1

Fonte: O autor (2020).

A visão sob a quantidade média de seções para cada classe é complementar a classe mais provável (figura 32), em que é visto e comparado a quantidade entre os cenários. A intenção é que o decisor tenha a informação de um ponto de vista econômico de mitigação. Ou seja, na figura 32, vê-se que a dispersão maior de seções para os cenários-casos é para o cenário-caso 4 e 5 para classe 1, que tem de 5 a 7 seções esperadas. Esta quantidade de seções significa um preparo maior para que a tomada de decisão mitigue os riscos.

Figura 32 - Quantidade de seções por classe em todas os cenários-casos



Fonte: O autor (2020).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo descreve as principais conclusões oriundas do desenvolvimento deste trabalho, e sugestões para possíveis trabalhos futuros na linha deste trabalho.

5.1 Conclusões

A avaliação de riscos em gasodutos tem sido uma grande preocupação devido às consequências catastróficas associadas aos seres humanos, ao meio ambiente e à empresa. Com base nessa condição, o risco é avaliado por meio de uma abordagem multicritério, sendo adequado para guiar a tomada de decisão no que tange à alocação de recursos de forma a conter perdas, como ações voltadas a manutenção do gasoduto.

No entanto, sabe-se que o modelo de avaliação de risco multidimensional depende de muitos parâmetros que são regidos de forma probabilística, sendo uma dificuldade para instaurar medidas mitigatórias de contenção do risco. Isto é explicado, pois gerenciar incerteza em operações de risco requer mais esforços para manter níveis de segurança estáveis continuamente, explicitando uma necessidade de averiguar de forma mais aprofundada a precisão de modelos de risco em relação às recomendações dadas.

A análise de sensibilidade desempenha um papel importante neste contexto, pois identifica a influência dos parâmetros que causam perturbação sobre a recomendação estudada. Assim, este trabalho mostra que com o Sistema de Apoio a Decisão desenvolvido foi possível calcular o risco associado a cada seção e classificar cada uma em três classes de risco: risco alto, risco intermediário e risco baixo.

Além disto, o sistema propicia ao usuário a estruturação de panoramas de avaliações conjuntas de parâmetros para a sensibilidade discutida, onde é possível inferir distribuições de probabilidade para avaliação, o intervalo inerente à variação da probabilidade, e dispor de uma amplitude de simulações para o caso. Com isso, as informações geradas disponibilizam ao usuário a visualização das informações de incerteza do modelo de avaliação de risco sob uma abordagem de significância estatística. Nesta visualização, os elementos gráficos utilizados expõem ao decisor a noção sobre a seção no que tange a estabilidade na classificação original e sua classe mais provável; e sobre a robustez da classificação, permitindo criar conhecimento sobre o número médio de seções por classe e a estabilidade da classificação original.

Sob um ponto de vista de alocação de recursos, o resultado gerado mostra também o nível de incerteza relacionado a quantidade de seções nas classes determinadas. Este tipo de informação é importante, pois ajuda no planejamento das ações de mitigação à longo prazo.

Assim, a expectativa desse estudo é alcançada mostrando que com o auxílio de procedimentos que acessem a incerteza de modelos de avaliação de riscos, políticas de mitigação podem ser melhoradas e promova o uso eficiente de recursos, a segurança a todos envolvidos no sistema de transporte de gás, e evitando perdas a nível de pessoas, ao ambiente e à empresa.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros sugere-se utilizar outras distribuições de probabilidade para estimar a avaliação global dos parâmetros dos cenários-casos, considerando características inerentes ao comportamento do gás para aplicações reais, pois assim identifica-se de forma mais significativa o comportamento probabilístico dos parâmetros.

Sob uma perspectiva de modelagem, outros conceitos relacionados à contexto de decisão pode ser utilizados para obter os riscos das dimensões tal como *rank dependent utility* (RDU). Sob a perspectiva da problemática de classificação, sugere-se explorar a utilização de métodos de informação parcial para estimar riscos multidimensionais.

Para visualização, recomenda-se explorar outros elementos de análise para exibir a sensibilidade das classificações de forma mais abrangente, ou que possa conectar à informações de cunho espacial, tal como em plataformas de georreferenciamento. Na mesma condição, sob um ponto de vista cognitivo, estas visualizações podem ser projetadas considerando a percepção de risco de decisores que lidam com operações de riscos, podendo ser avaliado a eficiência as visualizações sob aspectos de neurociências.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAMSEN, E. B. et al. Safety oriented bubble diagrams vs. risk plots based on prediction intervals and strength-of-knowledge assessments. Which one to use as an alternative to risk matrices? **International Journal of Business Continuity and Risk Management**, v. 5, n. 3, p. 197, 2014.
- ACHILLAS, C. et al. The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review. **Waste Management & Research**, v. 31, n. 2, p. 115–129, 11 fev. 2013.
- ADGATE, J. L.; GOLDSTEIN, B. D.; MCKENZIE, L. M. Potential public health hazards, exposures and health effects from unconventional natural gas development. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 15, p. 8307–8320, 2014.
- ADUNLIN, G.; DIABY, V.; XIAO, H. Application of multicriteria decision analysis in health care: a systematic review and bibliometric analysis. **Health Expectations**, v. 18, n. 6, p. 1894–1905, dez. 2015.
- AGRESTI, A. **An Introduction to Categorical Data Analysis**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007. v. 13
- AGRESTI, A. **Statistical Methods for the Social Sciences**. Fifth edition. [s.l.] Pearson, 2017.
- AGRESTI, A.; CAFFO, B. Simple and Effective Confidence Intervals for Proportions and Differences of Proportions Result from Adding Two Successes and Two Failures. **The American Statistician**, v. 54, n. 4, p. 280–288, nov. 2000.
- AGRESTI, A.; COULL, B. A. Approximate is Better than “Exact” for Interval Estimation of Binomial Proportions. **The American Statistician**, v. 52, n. 2, p. 119–126, maio 1998.
- ALE, B.; BURNAP, P.; SLATER, D. On the origin of PCDS – (Probability consequence diagrams). **Safety Science**, v. 72, p. 229–239, fev. 2015.
- ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 8, p. 3610–3619, abr. 2010.
- ALMEIDA, A. T. Multicriteria Modelling of Repair Contract Based on Utility and ELECTRE I Method with Dependability and Service Quality Criteria. **Annals of Operations Research** **138**, p. 113–126, 2005.
- ALMEIDA DIAS, J. Multiple Criteria Decision Aiding for Sorting Problems: Concepts, Methodologies, and Applications. p. 307, 2011.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=68644>. Acesso em 13/10/2019.
- AVEN, T. A risk concept applicable for both probabilistic and non-probabilistic perspectives.

Safety Science, v. 49, n. 8–9, p. 1080–1086, 2011.

AVEN, T. On the use of conservatism in risk assessments. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 146, p. 33–38, 2016a.

AVEN, T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. **European Journal of Operational Research**, v. 253, n. 1, p. 1–13, ago. 2016b.

AVEN, T. Reflections on the Use of Conceptual Research in Risk Analysis. **Risk Analysis**, v. 38, n. 11, p. 2415–2423, 2018.

AVEN, T.; RENN, O. On risk defined as an event where the outcome is uncertain. **Journal of Risk Research**, v. 12, n. 1, p. 1–11, 2009.

BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple Criteria Decision Analysis**. Boston, MA: Springer US, 2002.

BERGER, J. O. **Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis**. New York, NY: Springer New York, 1985.

BONVICINI, S. et al. Quantitative assessment of environmental risk due to accidental spills from onshore pipelines. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 93, n. April, p. 31–49, 2015.

BORGONOVO, E. **Sensitivity Analysis: An Introduction for the Management Scientist**. [s.l: s.n.].

BORGONOVO, E.; CILLO, A.; SMITH, C. L. On the Relationship between Safety and Decision Significance. **Risk Analysis**, v. 38, n. 8, p. 1541–1558, 2018.

BORGONOVO, E.; HAZEN, G. B.; PLISCHKE, E. A Common Rationale for Global Sensitivity Measures and Their Estimation. **Risk Analysis**, v. 36, n. 10, p. 1871–1895, 2016.

BOSTROM, A.; FRENCH, S.; GOTTLIEB, S. (EDS.). **Risk Assessment, Modeling and Decision Support**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

BOUYSSOU, D.; MARCHANT, T. On the relations between ELECTRE TRI-B and ELECTRE TRI-C and on a new variant of ELECTRE TRI-B. **European Journal of Operational Research**, v. 242, n. 1, p. 201–211, 2015.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 2, p. 187–198, fev. 2009.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T.; MOTA, C. M. M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 3, p. 812–821, 2010.

BUTLER, J.; JIA, J.; DYER, J. Theory and Methodology Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models. v. 7, 1997.

DE ALMEIDA, A. T. et al. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability**

and Maintenance Decision Analysis. Internatio ed. [s.l.] Springer New York, 2015. v. 231

DE ALMEIDA, A. T. et al. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 28, n. 2, p. 153–184, 2017.

DE ALMEIDA, A. T.; WACHOWICZ, T. Preference Analysis and Decision Support in Negotiations and Group Decisions. **Group Decision and Negotiation**, v. 26, n. 4, p. 649–652, 21 jul. 2017.

DE ALMEIDA, A. T. DE; RAMOS, F. S. **Gestão da Informação na competitividade das organizações.** 2. ed. [s.l.] Editora Universitária UFPE, 2002.

DIAS, L. C. et al. A multi-criteria approach to sort and rank policies based on Delphi qualitative assessments and ELECTRE TRI : The case of smart grids in Brazil. **Omega**, v. 76, p. 100–111, 2018a.

DIAS, L. C. et al. A multi-criteria approach to sort and rank policies based on Delphi qualitative assessments and ELECTRE TRI: The case of smart grids in Brazil. **Omega (United Kingdom)**, v. 76, p. 100–111, 2018b.

DIAS, L. C.; CLÍMACO, J. N. ELECTRE TRI for Groups with Imprecise Information on Parameter Values. **Group Decision and Negotiation**, v. 9, n. 5, p. 355–377, 2000.

DIAS, L. C.; MOUSSEAU, V. IRIS: A DSS for multiple criteria sorting problems. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 12, n. 4–5, p. 285–298, 2003.

DZIUBIŃSKI, M.; FRĄTCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 5, p. 399–408, set. 2006.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 60, n. 3, p. 306–325, dez. 1994.

EPPLER, M. J.; AESCHIMANN, M. A systematic framework for risk visualization in risk management and communication. **Risk Management**, v. 11, n. 2, p. 67–89, 2009.

FIGUEIRA, J. R. et al. An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 20, n. 1–2, p. 61–85, jan. 2013.

FIGUEIRA, J. R.; MOUSSEAU, V.; ROY, B. ELECTRE methods. **International Series in Operations Research and Management Science**, v. 233, p. 155–185, 2016.

FISCHHOFF, B. Risk Perception and Communication Unplugged: Twenty Years of Process. **Risk Analysis**, v. 15, n. 2, p. 137–145, 1995.

FLACH, P.; KULL, M. **Precision-recall-gain curves: PR analysis done right.** Advances in Neural Information Processing Systems. **Anais...2015** Disponível em: <<https://papers.nips.cc/paper/5867-precision-recall-gain-curves-pr-analysis-done-right>>

GAN, Y. et al. A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. **Environmental Modelling & Software**, v. 51, p. 269–285, jan. 2014.

GARCEZ, T. V.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk assessment of manhole events as a decision tool for ranking the vaults of an underground electricity distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 2, p. 624–632, 2014.

GIGERENZER, G. On the Supposed Evidence for Libertarian Paternalism. **Review of Philosophy and Psychology**, v. 6, n. 3, p. 361–383, 2015.

GOERLANDT, F.; KHAKZAD, N.; RENIERS, G. **Validity and validation of safety-related quantitative risk analysis: A review** *Safety Science*, 2017.

GOERLANDT, F.; RENIERS, G. On the assessment of uncertainty in risk diagrams. **Safety Science**, v. 84, p. 67–77, abr. 2016.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; DE ALMEIDA, A. T. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 2. ed. São Paulo (SP): Atlas, 2006.

HELTON, J. C. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 42, n. 2–3, p. 327–367, jan. 1993.

HOCKEY, S. M.; REW, P. J. **Review of human response to thermal radiation**. [s.l.: s.n.].

IRELAND, G. N. et al. 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016) Comprising: Gas Networks Ireland (Ireland) DGC (Denmark) ENAGAS, S.A. (Spain) EUSTREAM (Slovak Republic) Fluxys (Belgium) Gasum (Finland) GRT Gaz (France) National Grid (UK). n. February 2015, 2018.

JATO-ESPINO, D. et al. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. **Automation in Construction**, v. 45, p. 151–162, set. 2014.

JO, Y.-D.; CROWL, D. A. Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 21, n. 6, p. 589–595, nov. 2008.

JO, Y. D.; AHN, B. J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 15, n. 3, p. 179–188, 2002.

JONES-LEE, M.; AVEN, T. ALARP — What does it really mean ? **Reliability Engineering and System Safety**, v. 96, n. 8, p. 877–882, 2011.

KADZIŃSKI, M.; SŁOWIŃSKI, R. Parametric evaluation of research units with respect to reference profiles. **Decision Support Systems**, v. 72, p. 33–43, 2015.

KAVETSKI, D.; KUCZERA, G.; FRANKS, S. W. Semidistributed hydrological modeling: A “saturation path” perspective on TOPMODEL and VIC. **Water Resources Research**, v. 39, n. 9, set. 2003.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decision with multiple objectives: preferences and value**

trade-offs. Wiley Series. New York: Wiley and Sons, 1976.

KHISHTANDAR, S.; ZANDIEH, M.; DORRI, B. A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant fuzzy linguistic term sets: The case of Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 1130–1145, set. 2017.

KOORNNEEF, J. et al. Uncertainties in risk assessment of CO₂ pipelines. **Energy Procedia**, v. 1, n. 1, p. 1587–1594, 2009.

KRYM, E. M.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. DE. Aplicação de modelagem multicritério para análise de riscos multidimensionais em gasodutos de gás natural. In: Congresso latino-iberoamericano de investigación operativa e Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. p. 24–28, 2012.

LINS, P. H. C.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 18, p. 13545–13554, 2012.

LÓPEZ-BENITO, A.; BOLADO-LAVÍN, R. A case study on global sensitivity analysis with dependent inputs: The natural gas transmission model. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 165, p. 11–21, set. 2017.

MARKERT, F.; MELIDEO, D.; BARALDI, D. Numerical analysis of accidental hydrogen releases from high pressure storage at low temperatures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 14, p. 7356–7364, maio 2014.

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

MEDEIROS, C. P.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk evaluation of natural gas pipelines based on a multicriteria decision model using visualization tools and statistical tests for global sensitivity analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 165, p. 268–276, set. 2017.

MOUSSEAU, V. et al. Resolving inconsistencies among constraints on the parameters of an MCDA model. **European Journal of Operational Research**, v. 147, n. 1, p. 72–93, 2003.

MOUSSEAU, V.; DIAS, L. Valued outranking relations in ELECTRE providing manageable disaggregation procedures. **European Journal of Operational Research**, v. 156, n. 2, p. 467–482, 2004.

MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R. Inferring an ELECTRE TRI Model from Assignment Examples. **Journal of Global Optimization**, v. 12, n. 2, p. 157–174, 1998.

MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R.; ZIELNIEWICZ, P. Methodological Guide and User ' S Manual. **Construction**, 1999.

PAPADAKIS, G. A. Major hazard pipelines: A comparative study of onshore transmission accidents. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 12, n. 1, p. 91–107, 1999.

PASMAN, H. J.; ROGERS, W. J. Risk assessment by means of Bayesian networks: A comparative study of compressed and liquefied H₂ transportation and tank station risks. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 22, p. 17415–17425, nov. 2012.

PERGHER, I.; DE ALMEIDA, A. T. A multi-attribute, rank-dependent utility model for selecting dispatching rules. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 46, p. 264–271, 2018.

PERNY, P. Multicriteria filtering methods based on concordance and non-discordance principles. **Annals of Operations Research**, v. 80, n. 0, p. 137–165, 1998.

PETERSON, M. The Precautionary Principle Is Incoherent. **Risk Analysis**, v. 26, n. 3, p. 595–601, jun. 2006.

PIANOSI, F.; WAGENER, T. A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions. **Environmental Modelling & Software**, v. 67, p. 1–11, maio 2015.

PRESSMAN, R. S.; MAXIM, B. **Software engineering: a practitioner's approach**. 8. ed. [s.l.] McGraw-Hill Science, 2014.

RAE, A.; ALEXANDER, R.; MCDERMID, J. Fixing the cracks in the crystal ball: A maturity model for quantitative risk assessment. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 125, p. 67–81, maio 2014.

ROBERT, C. P.; CASELLA, G. **Monte Carlo Statistical Methods**. New York, NY: Springer New York, 2004.

ROCHA, C.; DIAS, L. C.; DIMAS, I. Multicriteria Classification with Unknown Categories: A Clustering-Sorting Approach and an Application to Conflict Management. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 20, n. 1–2, p. 13–27, jan. 2013.

ROJAS-ZERPA, J. C.; YUSTA, J. M. Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 557–571, dez. 2015.

ROTH, F. **Visualizing Risk: The Use of Graphical Elements in Risk Analysis and Communications**. 3RG Report. [s.l.: s.n.].

ROY, B.; BOUYSSOU, D. **Aide multicritère à la décision: méthodes et cas**. Paris: Economica, 1993.

SACCO, T. et al. Portfolio decision analysis for risk-based maintenance of gas networks. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 60, n. October 2018, p. 269–281, 2019.

SALTELLI, A. et al. **Global sensitivity analysis: the primer**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.

SARA, A.; RUI, J.; BORBINHA, J. A multiple criteria nominal classification method based on the concepts of similarity and dissimilarity. **European Journal of Operational Research**, v. 271, n. 1, p. 193–209, 2018.

SHIELDS, M. D. et al. Refined Stratified Sampling for efficient Monte Carlo based uncertainty quantification. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 142, p. 310–325, out. 2015.

SIEGEL, S.; N. JOHN, C. J. **Nonparametric Statistics for The Behavioral Sciences**. 2. ed. [s.l.] McGraw Hill, 1988.

SILVA, M. M.; GUSMÃO, A. P. H. DE; COSTA, A. P. C. S. An Outranking Multicriteria Method for Nominal Classification Problems with An Outranking Multicriteria Method for Nominal Classification Problems with Minimum Performance Profiles. n. May, 2019.

SILVA MONTE, M. B.; TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO, A. A reliability-based approach to maximize availability in a water supply system. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 12, p. 3807–3812, dez. 2015.

SPIEGELHALTER, D.; PEARSON, M.; SHORT, I. Visualizing Uncertainty About the Future. v. 333, n. September, p. 1393–1401, 2011.

STRANTZALI, E.; ARAVOSSIS, K. Decision making in renewable energy investments: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 885–898, mar. 2016.

TERVONEN, T. et al. A stochastic method for robustness analysis in sorting problems. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 1, p. 236–242, 2009.

TROJAN, F.; MORAIS, D. C. **Using Electre Tri To Support Maintenance Of Water Distribution Networks**. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. 2012

VETSCHERA, R. et al. Robustness and information levels in case-based multiple criteria sorting. **European Journal of Operational Research**, v. 202, n. 3, p. 841–852, 2010.

VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1992.

WEINER, S. C. Advancing the hydrogen safety knowledge base. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 35, p. 20357–20361, dez. 2014.

WITKOWSKI, A. et al. Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects. **Energy**, v. 141, p. 2508–2518, 2017.

ZIO, E. The future of risk assessment. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 177, n. June 2017, p. 176–190, set. 2018.

ZOPOUNIDIS, C.; DOUMPOS, M. Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 138, n. 2, p. 229–246, 2002a.

ZOPOUNIDIS, C.; DOUMPOS, M. Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. v. 138, p. 229–246, 2002b.

ANEXO A - DADOS PARA AVALIAÇÃO DO MODELO

Este anexo mostra os parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade deste trabalho para estimar as funções consequências do problema de avaliação de riscos em gasodutos de gás natural descrito em Krym, Alencar e de Almeida (2012).

Tabela A1. 1 – Probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais causados por Furo e probabilidades do Cenário de Normalidade Operacional

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo	Normalidade
S1	0,000111	0,00000245	0,00000118	0,00073	0,0000758	0,998741098
S2	0,000116	0,0000027	0,00000122	0,000759	0,0000789	0,998679207
S3	0,000122	0,00000266	0,00000119	0,000732	0,000077	0,998719434
S4	0,000126	0,00000273	0,00000132	0,000747	0,000078	0,99868527
S5	0,000114	0,00000252	0,0000012	0,000741	0,0000777	0,99871996
S6	0,000101	0,00000211	0,000001	0,000698	0,0000715	0,998827291
S7	0,000128	0,0000026	0,00000123	0,000746	0,000075	0,998687672
S8	0,000119	0,00000277	0,00000124	0,00077	0,0000798	0,998658981

Tabela A1. 2 – Probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais causados por Ruptura e probabilidades do Cenário de Normalidade Operacional

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo	Normalidade
S1	0,0000211	0,00000236	0,000000212	0,000166	0,0000488	0,998741098
S2	0,0000233	0,00000244	0,000000233	0,000186	0,000051	0,998679207
S3	0,0000222	0,0000024	0,000000216	0,000172	0,0000489	0,998719434
S4	0,000023	0,00000246	0,00000022	0,0001841	0,0000499	0,99868527
S5	0,0000215	0,0000024	0,00000022	0,00017	0,0000495	0,99871996
S6	0,0000202	0,0000021	0,000000199	0,000133	0,0000436	0,998827291
S7	0,000022	0,00000238	0,000000218	0,000187	0,0000479	0,998687672
S8	0,000024	0,00000247	0,000000239	0,00019	0,0000515	0,998658981

Tabela A1. 3 – Parâmetros que variam por Seção e Cenário para modo de falha Furo

Seção	I (J/m ² .s)	Ω	R(m ³ /s)	t _c
S1	3306,687583	669603915	1,35	0,00363
S2	4017,915324	19255616124	1,24	0,00363
S3	4620,806364	927799586,3	1,17	0,00363
S4	4845,85947	347895844,5	1,03	0,00363
S5	5030,943143	163506349,9	0,94	0,00363
S6	5150,398979	115645653,8	0,87	0,00363
S7	5162,656335	98056107,22	0,8	0,00363
S8	5225,818796	77290563,69	0,	

Tabela A1. 4 – Parâmetros que variam por Seção e Cenário para modo de falha Ruptura

Seção	I (J/m ² .s)	Ω	R(m ³ /s)	t _c
S1	6323,959302	115,6539813	2,82	0,0181453
S2	8984,622271	100	2,38	0,0181453
S3	12761,67947	184,5859738	2,25	0,0181453
S4	14978,35689	44,25148966	2,16	0,0181453
S5	17453,2549	13,97836993	2,09	0,0181453
S6	19544,14991	8,04974705	2,01	0,0181453
S7	19788,23391	6,140674216	1,9	0,0181453
S8	21153,01227	4,105255414	1,78	0,0181453

Tabela A1. 5 – Valores de $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ (m^2/J) para modo de falha Furo

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo
S1	3E-08	0,00000013	8E-09	1E-11	7E-08
S2	2E-08	0,000000066	1E-08	1E-11	3,9E-08
S3	2E-08	0,00000009	1,8E-08	1E-11	2,2E-08
S4	2E-08	0,00000011	1,82E-08	1E-11	3,4E-08
S5	2E-08	0,000000066	8E-09	1E-11	5E-08
S6	3E-08	0,000000183	6,9E-09	1E-11	7,1E-08
S7	2E-08	0,000000051	7,2E-09	1E-11	7,1E-08
S8	2E-08	0,000000066	1E-08	1E-11	4,2E-08

Tabela A1. 6 – Valores de $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ (m^2/J) para modo de falha Ruptura

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo
S1	1,3E-08	0,000000039	1,1E-09	1E-11	7,7E-08
S2	1,4E-08	0,00000022	1E-08	1E-11	7E-08
S3	2,1E-08	0,000000055	1,3E-08	1E-11	2,1E-08
S4	1,73E-08	0,000000042	1,2E-08	1E-11	3,3E-08
S5	1,4E-08	0,00000023	1,1E-09	1E-11	7,4E-08
S6	2,7E-08	2,37E-08	7,1E-09	1E-11	6,2E-09
S7	2,12E-08	2,37E-08	9,4E-09	1E-11	6,3E-09
S8	1,4E-08	0,000000199	1E-08	1E-11	8E-08

Tabela A1. 7 – Inverso do tempo médio do apagamento das chamas (1/s) para modo de falha furo

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo
S1	0,0001	0,00022	0,00031	0,00393	0,00023
S2	0,0001	0,00016	0,00028	0,00397	0,00023
S3	0,0001	0,00023	0,00026	0,00461	0,00026
S4	0,0001	0,0002	0,00025	0,00464	0,00025
S5	0,0001	0,00019	0,00033	0,00441	0,00024
S6	0,0001	0,0003	0,00042	0,00452	0,00035
S7	0,0001	0,00014	0,00025	0,00337	0,00017
S8	0,0001	0,00018	0,00031	0,00399	0,00026

Tabela A1.8 – Inverso do tempo médio do apagamento das chamas (1/s) para modo de falha ruptura

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo
S1	0,00011	0,00024	0,00053	0,00534	0,00047
S2	0,0001	0,00026	0,00037	0,00577	0,00034
S3	0,00014	0,00037	0,00037	0,00565	0,00032
S4	0,00013	0,00039	0,0005	0,00555	0,00028
S5	0,00011	0,00027	0,00039	0,00578	0,0004
S6	0,00015	0,00038	0,00065	0,00936	0,00055
S7	0,000175	0,00042	0,00033	0,00941	0,00022
S8	0,00012	0,00026	0,00037	0,00588	0,00034

Tabela A1. 9 – Valores da constante que relaciona t_R e t_Q para modo de falha furo

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo
S1	24	24	24	50	22
S2	32	29	29	55	32
S3	28	29	23	49	27
S4	26	27	23	48	24
S5	27	29	23	53	24
S6	32	26	25	50	29
S7	33	26	26	53	31
S8	33	29	30	55	33

Tabela A1. 10 – Valores da constante que relaciona t_R e t_Q para modo de falha ruptura

Seção	CVCE	Detonação/ Deflagração	Flash Fire	Dispersão	Jato de Fogo
S1	35	40	31	48	31
S2	43	53	41	53	43
S3	37	41	36	51	40
S4	38	41	33	44	40
S5	40	44	36	42	42
S6	41	35	49	41	45
S7	43	49	44	45	42
S8	43	61	41	46	48

Tabela A1. 11 – Parâmetros relacionados às seções do gasoduto

Seção	Li (m)	D (m)	Q (m³/s)	v (\$/m³/s)	w_{a_i}	P_0 (kgf/cm³)	L_0 (m)	Veg %	β (\$/J)	η_{a_i}	α_{a_i}	P_w (N/m²)	RH	CDR
S1	2900	0,2032	2,44	1,2	7	35	2400	0,044	0,0014	15	0,03	3086	65	54,6007
S2	3500	0,2032	2,26	1,3	13	35	4700	0,04	0,0018	25	0,04	3086	65	46,1558
S3	4000	0,2032	2,16	0,78	22	35	9200	0,04	0,0014	10	0,06	3086	65	39,0215
S4	3300	0,2032	1,9	1	14	35	12500	0,04	0,0016	10	0,04	3086	65	36,1429
S5	2900	0,2032	1,37	1,25	7,5	35	16750	0,04	0,0016	20	0,045	3086	65	33,5929
S6	3500	0,2032	0,98	0,9	2	35	20800	0,07	0,0003	5	0,04	3086	65	31,8225
S7	1900	0,2032	0,85	1,15	4	35	21300	0,06	0,0016	10	0,04	3086	65	31,6341
S8	4680	0,2032	0,8	1,3	8	35	24200	0,04	0,0018	10	0,05	3086	65	30,6406