

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Estudo de Robustez e Análise de Sensibilidade no modelo  
Multicritério para Gerenciamento de Risco em Gasodutos  
baseado em MAUT**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE  
POR

**MÔNICA FRANK MARSARO**

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida, PhD

**RECIFE  
Novembro/2013**

Catalogação na fonte  
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M363e Marsaro, Mônica Frank.

Estudo de robustez e análise de sensibilidade no Modelo Multicritério para Gerenciamento de Risco em gasodutos baseado em MAUT / Mônica Frank Marsaro – Recife: O Autor, 2013.  
xi, 133f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2013.  
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia de Produção. 2. Modelo Multicritério. 3. Avaliação de Risco. 4. Análise de Sensibilidade. I. Almeida, Adiel Teixeira (Orientador). II. Título.



Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO ACADÊMICO DE  
**MONICA FRANK MARSARO**

***“ESTUDO DE ROBUSTEZ E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NO MODELO  
MULTICRITÉRIO PARA GERENCIAMENTO DE RISCO EM GASODUTOS BASEADO  
EM MAUT”***

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência  
do(a) primeiro(a), considera a candidata **MONICA FRANK MARSARO APROVADA**.

Recife, 06 de novembro de 2013.

---

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

---

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

---

Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente e sempre, à Deus. Em seguida, à minha família, meus pais Jacinto e Lisete, meu irmão Eduardo que mesmo distantes mantêm-se sempre presentes na minha vida nos momentos de alegria e nos momentos de dificuldade, fraqueza e solidão. Aos meus avós pelo apoio incondicional, e aos meus padrinhos Lisiâne e Adilson. Sem vocês, não teria conseguido concluir mais essa etapa da minha vida.

Ao meu namorado, Wanderson, que esteve presente em minhas vitórias e nas minhas derrotas desde antes de estarmos juntos e me apoiando a continuar pelo caminho que optei para o meu futuro. Aprendemos muito com a distância em respeitar um ao outro, aprender com os erros e aproveitar os acertos.

Aos meus amigos, velhos e relativamente novos conquistados durante o mestrado em Recife. Gostaria de agradecer a todos que se fizeram presentes durante essa etapa, agradeço muito pela paciência, compreensão e palavras de apoio nos momentos mais difíceis, apenas pela companhia quando as palavras faltam, ou até mesmo através de uma ligação e pelos momentos de união nas conquistas e na felicidade. Em especial Márcia Porto, Ciro Figueiredo, Naila Cristina, Simone Giraldeli, Loianny Azevedo, Fábio Chagas, Priscila Jácome, Mirian Bortoluzzi, Franciéli Ribeiro, o meu muito obrigado.

Ao meu orientador, Prof. Ph.D Adiel Teixeira de Almeida, pelas orientações e pelos ensinamentos em cada uma de nossas reuniões e pela oportunidade de acreditar em meu trabalho. Ao Prof. D.Sc. Marcelo Hazin Alencar, pelo apoio e pelas ideias durante a elaboração desse trabalho. Além de todos os outros professores do programa, que repassam seus conhecimentos através das aulas e dos projetos desenvolvidos.

À CAPES, pelo fomento ao desenvolvimento da minha pesquisa.

## RESUMO

Um modelo multicritério de apoio à decisão foi desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão (CDSID) para realizar a avaliação de risco associado ao transporte de Gás Natural por gasodutos, de forma que três dimensões de risco fossem levadas em consideração (critérios): Humana, Ambiental e Financeira. O resultado final gerado pelo modelo, devido ao valor de risco associado a cada uma das seções do gasoduto, é uma ordenação dessas seções, no sentido de fornecer informação ao decisor para utilização de recursos na análise de mitigação e gerenciamento do risco. Porém, com a evolução do modelo, muitas variáveis e parâmetros foram sendo inclusos para torná-lo mais completo, em contrapartida também mais complexo e extenso para sua utilização. Neste sentido, o presente trabalho trata de uma análise para identificar a robustez e a sensibilidade das variáveis e parâmetros do modelo, realizada em quatro casos em que o modelo foi anteriormente aplicado, através da utilização da análise de sensibilidade simples, possibilitando que, através das considerações propostas pelo trabalho, uma possível simplificação do modelo seja fundamentada e realizada futuramente. Observou-se que a maioria dos parâmetros que se demonstraram robustos pertencem à dimensão de risco financeira, e que alguns deles não caracterizam-se como robustos ou sensíveis, mas que devido a variação no valor original acarretam variação da razão das diferenças das seções do gasoduto.

**Palavras chave:** Modelo Multicritério; Avaliação de risco; Análise de Sensibilidade.

## **ABSTRACT**

A multicriteria model for decision aid was developed by the Centre for Development of Information Systems and Decision (CDSID) to perform risk assessment associated with the transport of Natural Gas by pipeline, so that three dimensions of risk are taken into consideration (criteria): Human, Environmental and Financial. The final result generated by the model, due to the value of risk associated with each section of the pipeline, is an ordering of these sections in the sense to provide information to the decision maker for the use of resources in the analysis of risk mitigation and management. Though with the evolution of the model, many variables and parameters were being included to make it more complete, however, also more extensive and complex to use. In this sense, the present work deals with an analysis to identify the robustness and sensitivity of the variables and parameters of the model, performed in four cases in four cases previously applied by the model through the use of sensitivity analysis simple, enabling, through the considerations proposed by the paper, a possible simplification of the model is grounded and made in the future It was observed that most of the parameters that demonstrate robust pertain to the financial dimension, and some of them are not characterized as sensitive and robust, but provide varying the difference ratio of the sections of the pipeline.

**Key-words:** Multicriteria Model; Risk Assessment; Sensitivity Analysis.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>3</b>
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
<b>1.2 Estrutura do Trabalho</b>	<b>4</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Fundamentação Teórica</b>	<b>6</b>
2.1.1 Decisão multicritério	6
2.1.2 Teoria da Utilidade Multiatributo	8
2.1.3 Análise de Sensibilidade simples e global	10
<b>2.2 Revisão Bibliográfica sobre Gerenciamento de Riscos</b>	<b>13</b>
2.2.1 Diversos conceitos atribuídos ao risco	13
2.2.2 Avaliação de riscos	15
2.2.3 Métodos para avaliação de risco	18
2.2.4 Normas internacionais para transporte de Gás Natural	22
2.2.5 Modelos Multicritério para gerenciamento de Riscos	33
<b>2.3 Síntese do estado da arte e posicionamento deste trabalho</b>	<b>36</b>
<b>2.4 Metodologia Adotada</b>	<b>38</b>
<b>3 DESCRIÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE</b>	<b>41</b>
<b>3.1 Descrição do Modelo</b>	<b>41</b>
3.1.1 Identificação dos cenários de perigo	42
3.1.2 Divisão do gasoduto em seções	43
3.1.3 Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e do cenário de normalidade operacional	44
3.1.4 Análise de exposição dos objetos de impacto	44
3.1.5 Estimação do conjunto de <i>payoffs</i> (H, E, F)	45
3.1.6 Elicitação da função utilidade Multiatributo	46
3.1.7 Cálculo das probabilidades de consequências	47
3.1.8 Estimação dos riscos	58
3.1.9 Ordenação das seções do gasoduto sob uma hierarquia de riscos	59
<b>3.2 Descrição dos casos estudados e da análise de sensibilidade</b>	<b>59</b>
3.2.1 Aplicação 1: predominância de área residencial	60

3.2.2 Aplicação 2: caracterizada por ter uma grande área industrial	70
3.2.3 Aplicação 3: prevalência de área comercial	82
3.2.4 Aplicação 4: predominantemente características de áreas residenciais e comerciais	91
<b>4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE</b>	<b>98</b>
<b>5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS</b>	<b>106</b>
5.1 Conclusões	106
5.2 Trabalhos Futuros	107
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO 1: DADOS REFERENTES A APLICAÇÃO 1</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO 2: DADOS REFERENTES A APLICAÇÃO 2</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO 3: DADOS REFERENTES A APLICAÇÃO 3</b>	<b>126</b>
<b>ANEXO 4: DADOS REFERENTES A APLICAÇÃO 4</b>	<b>131</b>

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1: Espaço de consequências	9
Figura 2.2: Princípio do ALARP	16
Figura 2.3: Classificação dos métodos de avaliação dos riscos	19
Figura 2.4: Fluxograma do processo de desenvolvimento da análise de sensibilidade	40
Figura 3.1: Etapas do modelo de decisão	42
Figura 3.2: Árvore de cenários de perigo	43
Figura 3.3: Dependência das variáveis e parâmetros para o cálculo da função consequência humana	48
Figura 3.4: Dependência das variáveis e parâmetros para o cálculo da função consequência ambiental	53
Figura 3.5: Dependência das variáveis e parâmetros para o cálculo da função consequência financeira	56
Figura 3.6: Representação visual do gasoduto da Aplicação 1.	60
Figura 3.7: Representação visual do gasoduto da Aplicação 2.	71
Figura 3.8: Representação visual do gasoduto da Aplicação 3.	82
Figura 3.9: Representação visual do gasoduto da Aplicação 4.	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Ordenação das seções em ordem de priorização para a Aplicação 1.	63
Tabela 3.2: Resultado da análise de sensibilidade para o diâmetro para a Aplicação 1.	64
Tabela 3.3: Resultado da análise de sensibilidade para a pressão de operação para a Aplicação 1.	64
Tabela 3.4: Resultado da análise de sensibilidade para a pressão de vapor de água saturada para a Aplicação 1.	65
Tabela 3.5: Resultado da análise de sensibilidade para: $L_{ai}$ , $Q$ , $v$ , $w_{ai}$ , $\beta$ , $\alpha_{ai}$ para a Aplicação 1.	66
Tabela 3.6: Resultado da avaliação de sensibilidade para a distância até a estação de compressão para a Aplicação 1.	66
Tabela 3.7: Resultado da análise de sensibilidade para porcentagem de vegetação na área crítica para a Aplicação 1.	67
Tabela 3.8: Resultado da análise de sensibilidade para o número máximo de pessoas afetadas para a Aplicação 1.	67
Tabela 3.9: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 1.	69
Tabela 3.10: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental para a Aplicação 1.	70
Tabela 3.11: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a Aplicação 1.	70
Tabela 3.12: Ordenação das seções em ordem de priorização da Aplicação 2	74
Tabela 3.13: Resultado da análise de sensibilidade para o diâmetro da aplicação 2.	75
Tabela 3.14: Resultado da análise de sensibilidade para $v$ , $Q$ , $P_w$ , $RH$ da aplicação 2.	76
Tabela 3.15: Apresentação dos resultados para análise de sensibilidade para a pressão de operação para a Aplicação 2.	76
Tabela 3.16: Resultado da análise de sensibilidade para: $L_{ai}$ , $w_{ai}$ , $\beta$ , $\alpha_{ai}$ da aplicação 2.	77
Tabela 3.17: Resultado da análise de sensibilidade para $\eta_{ai}$ da Aplicação 2.	78
Tabela 3.18: Resultado da análise de sensibilidade para %Veg e $L_0$ da aplicação 2.	78
Tabela 3.19: Resultado da análise de sensibilidade para: $I$ ; $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ ; $g_{\theta_{jk},a_i}$ ; $Z_i$ ; $R$ ; e $\alpha$ da aplicação 2.	79
Tabela 3.20: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 2	80
Tabela 3.21: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental para a Aplicação 2.	81
Tabela 3.22: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a aplicação 2.	81
Tabela 3.23: Ordenação das seções em ordem de priorização da Aplicação 3	85
Tabela 3.24: Resultado da análise de sensibilidade para o diâmetro e pressão de operação da Aplicação 3.	86
Tabela 3.25: Resultado da análise de sensibilidade para $P_w$ e $RH$ da Aplicação 3.	86

Tabela 3.26: Resultado da análise de sensibilidade para: $L_i$ , Q, v, $\beta$ , $w_{ai}$ , $\alpha_{ai}$ da Aplicação 3.	87
Tabela 3.27: Resultado da análise de sensibilidade para $L_0$ e %Veg da Aplicação 3.	88
Tabela 3.28: Resultado da análise de sensibilidade para $\eta_{ai}$ da Aplicação 3.	88
Tabela 3.29: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 3.	90
Tabela 3.30: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental	90
Tabela 3.31: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a Aplicação 3.	91
Tabela 3.32: Ordenação das seções em ordem de priorização para a Aplicação 4.	94
Tabela 3.33: Resultado da análise de sensibilidade para $\eta_{ai}$ da Aplicação 4.	95
Tabela 3.34: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 4.	96
Tabela 3.35: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental para a Aplicação 4.	96
Tabela 3.36: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a Aplicação 4.	97

## SIMBOLOGIA

**ABEGÁS** - Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Gás

**AHP** - *Analytic Hierarchy Process*

**ALARP** - *As Low as Reasonably Practicable*

**ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica

**API** - *American Petroleum Institute*

**ASME** - *American Society Mechanical Engineering*

**BS** - *British Council*

**CDR** - *Critical Danger Ratio*

**CDSID** - Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão

**CPD** - *Committee for the Prevention of Disasters*

**CVCE** – *Confined Vapor Cloud Explosion*

**DMRA** - *The decision matrix risk-assessment*

**ELECTRE** - *Elimination and Choice Expressing Reality*

**ETA** - *Event Tree Analysis*

**FTA** - *Fault tree analysis*

**GRI** - *Gas Research Institute*

**HAZOP** - *Hazard and Operability study*

**ISO** - *International Organization for Standardization*

**MAHP** - *Major Accident Hazard Pipeline*

**MAUT** - *Multiattribute Utility Theory*

**MCDA** - *Multiple-criteria Decision Aid*

**PCA** - *Polynomial chaos expansions*

**PRAT** - *The proportional risk-assessment technique*

**PROMETHEE** - *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*

**QRA** - *Quantitative Risk Assessment*

**SAD** - Sistema de Apoio a Decisão

**SMARTERS** - *Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings*

**SMARTS** - *Simple Multi-Attribute Rating Technique using Swings*

**UVCE** - *Unconfined Vapor Cloud Explosion*

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a crise energética que o Brasil passou em 2001 pelo desabastecimento de água das usinas hidrelétricas, e a eminent possibilidade de um apagão por todo o país, alavancou a necessidade de usinas termoelétricas para cobrir a falta de energia elétrica produzida a partir de água quando esta faltasse, proporcionando abertura para a entrada mais fortemente do Gás Natural na estrutura energética do país. A sua utilização desse gás pode ser para diferentes fins como, por exemplo, combustível veicular, para fins comerciais e residenciais, entre outras finalidades (GARCEZ, 2009).

No entanto, o que se viu no ano de 2012 foi uma especulação quanto a uma nova crise no setor de energia no país, devido alguns apagões ocorridos nas regiões Nordeste, Centro-oeste e Norte, ficando claro o necessário investimento em outras fontes de energia, a não ser na energia hidrelétrica. Em entrevista concedida pelo ex-ministro de Minas e Energia, nos anos de 1999-2001, Rodolpho Tourinho afirmou que a crise ocorrida em 2001 foi diferente do que foi apontado no ano de 2012, pois naquele ano não havia energia produzida a partir de termoelétricas, o que já estava ocorrendo no ano de 2012, produzindo 14 mil megawatts de energia térmica (MACEDO, 2013).

Han & Weng (2012) apontam que o gás natural é hoje uma das mais importantes fontes de energia, sendo que na União Europeia, do consumo total de energia, 20% é proveniente desse gás. No Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2013), de toda a matriz energética do país 10,36% é proveniente de gás, sendo esse, portanto, um setor de possível crescimento e desenvolvimento para o país.

A forma mais usual para o transporte de gás é o gasoduto, que é considerado por diversos autores como o mais seguro dentre as formas de transporte e mais eficiente, por possuir uma grande capacidade e baixo custo (MEDINA et al., 2012). Porém, a ocorrência de acidentes na extensão do gasoduto não é descartada, principalmente devido a influência de terceiros na integridade das tubulações, sendo que o gás pode ser liberado e inflamado ocasionando possíveis danos para a região que esse se encontra (JO & AHN, 2002; JO & CROWL, 2008; LIANG et al., 2012).

Entretanto, o Brasil, país com dimensões continentais, conta com apenas cerca de 22 mil quilômetros de dutos de transmissão de gás (ABEGÁS, 2012), enquanto que a extensão total de gasodutos na Europa era em 2010 de mais de 135 mil quilômetros, ficando evidente a necessidade do país em receber maior investimento nessa área.

Apesar de ser, como citado anteriormente, a forma mais segura de se transportar gás, a ocorrência de acidentes tem consequências muito severas (BRITO, 2007), associando baixas probabilidades de ocorrência, com consequências graves, e por isso, faz-se uma análise de risco quanto ao transporte de gás natural por gasodutos. Marhavilas et al. (2011) afirmam que a análise de risco tem recebido maior atenção nas últimas décadas, e tem sido aplicada em diversas áreas presentes na vida das pessoas como um procedimento “eficaz e abrangente”. Isso porque gestores na área da saúde, meio ambiente e sistemas de infraestruturas incorporaram essa análise na tomada de decisão, além da utilização por órgãos governamentais.

Dessa forma, é importante desenvolver um modelo que possa priorizar seções de gasodutos que devem ter maior atenção dos gestores, a fim de receberem ações que previnam acidentes e que possam receber maior cuidado na manutenção do seu funcionamento. E é de extrema importância analisar não somente mortes que possam ocorrer, mas também perdas financeiras causadas por interrupção do fornecimento de gás, e perdas ambientais ocasionadas pela combustão do gás vazado resultando em danos na fauna e na flora da região circunvizinha.

Por esses motivos, Brito & Almeida (2009) começaram o estudo sobre análise multidimensional do risco em gasodutos, pois segundo os autores havia restrições nos modelos até então desenvolvidos nessa área, por justamente não considerarem as múltiplas dimensões de riscos envolvidos, sendo que o papel de um modelo é avaliar um sistema para identificar de que forma esse sistema pode funcionar para a prevenção de acidentes (MARHAVILAS et al. 2011).

Um modelo trata-se de uma representação da realidade e, por isso, está errado, sendo que o problema é saber quão errado ele deve estar para melhor representar a realidade (BOX & DRAPER, 1987), sendo que Almeida (2013) afirma que a simplificação de um modelo pode compensar a perda de precisão quando a

formulação dele é feita. E por esse motivo, o modelo desenvolvido para análise de risco em gasoduto que considera três dimensões de risco, passa agora por um processo de avaliação das variáveis e parâmetros utilizados nessa modelagem, pois é necessário identificar o impacto que eles possuem na saída do modelo, e uma forma de avaliar isso é através da análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade fornecerá informação de quais variáveis/parâmetros são sensíveis à pequenas mudanças, ou seja, alterações no valor de entrada do modelo acarretarão em mudança no resultado final do modelo. Assim como identificará aquelas que não proporcionam mudança alguma no resultado final quando seus valores de entrada são modificados. Esse dado também é importante, uma vez que, espera-se com esse trabalho proporcionar o começo para futuras análises de remoção e ou alteração de variáveis/parâmetros do modelo.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como principal objetivo analisar o modelo de apoio à decisão para a análise de risco em gasodutos de transporte de gás natural desenvolvido pelo CDSID (Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão), de forma a fornecer um *insight* para trabalhos futuros. Isso acontecerá a partir da determinação de variáveis e parâmetros sensíveis e robustos do modelo, proveniente da análise de sensibilidade de quatro casos em que o modelo foi aplicado.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral determinado para o estudo, é possível identificar alguns objetivos específicos que nortearam o desenvolvimento dessa pesquisa, dentre eles:

1. Efetuar uma fundamentação teórica acerca dos conteúdos pertinentes ao estudo, dentre eles Decisão Multicritério, Teoria da Utilidade Multiatributo e Análise de Sensibilidade;
2. Realizar uma revisão bibliográfica sobre risco e análise de risco, assim como sobre os métodos utilizados para essa análise, além de normas utilizadas para o transporte de gás natural na Europa e nos Estados Unidos.

3. Fazer uma descrição completa do modelo de decisão multicritério de análise de risco para o transporte de gás natural via gasoduto, de forma a apresentar todas as variáveis e parâmetros utilizados para o cálculo do risco.
4. Apresentar os casos em que o modelo já foi anteriormente aplicado, assim como os resultados para a análise de sensibilidade desses casos.
5. Identificar as variáveis e parâmetros que possuem características de robustez e de sensibilidade, através da análise dos resultados da análise de sensibilidade.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Com o objetivo de proporcionar melhor compreensão da estrutura dessa dissertação, serão apresentados resumidamente como os capítulos estão estruturados para melhor entendimento de como os objetivos do trabalho serão alcançados, sendo estruturado em cinco capítulos.

No capítulo 1, a Introdução apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos do estudo.

O capítulo 2 expõe a fundamentação teórica para esse trabalho. Esta é embasada primeiramente nos conceitos de decisão, teoria da utilidade e teoria da utilidade multiatributo, e sobre Análise de Sensibilidade que é o foco do presente estudo. Posteriormente uma revisão bibliográfica sobre risco é apresentada, através dos conceitos atribuídos ao risco, a avaliação de risco e os métodos utilizados para avaliação de risco, assim como métodos multicritério que têm sido utilizados nessa área. Além disso, são expostas várias normas estudadas que regularizam o transporte de gás natural na Europa e nos Estados Unidos da América, e posteriormente uma breve análise das mesmas.

O capítulo 3 trata-se da descrição do modelo e da análise de sensibilidade. Na descrição do modelo são demonstradas as etapas do modelo foco desse trabalho, contendo explicação para todas as variáveis, parâmetros, e equações do modelo. Em seguida, é feita uma caracterização dos casos utilizados nesse estudo e em consequente são apresentados os resultados obtidos através da análise de sensibilidade simples.

O capítulo 4 apresenta uma análise dos resultados apresentados no capítulo anterior. E, por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com este estudo e a propensão de futuros trabalhos que podem ser gerados a partir desse.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esse capítulo tem com objetivo apresentar a fundamentação da teoria em que o estudo é baseado. Dessa forma, primeiramente são conceituados os termos referentes a fundamentação teórica, basicamente referentes a Decisão Multicritério, Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multiattribute Utility Theory*) e Análise de Sensibilidade. Em seguida é feita uma revisão bibliográfica sobre conceitos relacionados com análise de risco, assim como as normas que dão fundamentação para o transporte de Gás Natural por gasodutos em diferentes países.

### **2.1 Fundamentação Teórica**

#### **2.1.1 Decisão multicritério**

Um problema de decisão multicritério para Almeida (2013) é caracterizado por uma situação em que existam pelos menos duas alternativas de ação para realizar uma escolha, pretendendo-se atingir múltiplos objetivos, que em muitas vezes podem ser conflitantes entre si.

A construção do modelo de decisão utiliza um método de apoio à decisão. Métodos MCDA (*Multiple-criteria Decision Aid* – Apoio à Decisão Multicritério), para sua aplicação, pressupõe que haja conhecimento dos objetivos que o decisor deseja alcançar, utilizando para representá-los múltiplos critérios ou múltiplos atributos.

O MCDA teve seu surgimento da segunda metade do século XX como sendo um conjunto de métodos que proporcionam auxílio à pessoas e organizações na resolução de problemas de decisão, com a utilização de inúmeros pontos de vistas diferentes e até mesmo conflitantes (VINCKE, 1992).

Para Brito (2007), o processo de decisão é apoiado pelo MCDA, que faz recomendações de ações ou curso de ações que correspondam melhor às preferências do decisão, sendo que o processo de decisão é tomado como um processo de reflexão sobre essas preferências e sobre as características do problema. Não é objetivo dos métodos promover um processo mecânico para a análise de alternativas, mas sim desenvolver modelagens que incorporem os julgamentos de valores dos decisores, com a finalidade de incorporar suas preferências pelo desenvolvimento do conjunto de alternativas de ação, avaliadas pelos múltiplos critérios levados em conta.

De acordo com Belton & Stewart (2002) um dos principais objetivos do MCDA é auxiliar os decisores a organizar e sintetizar as informações importantes, para que possam sentir-se confiantes e confortáveis na tomada de decisão, minimizando o potencial de arrependimento com a decisão tomada pelo fato de todos os fatores e critérios terem sido levados em conta na resolução do problema.

Nos métodos MCDA a estrutura de preferência do decisor deve ser estabelecida, relacionando às consequências no problema de decisão, e proporciona a avaliação das alternativas que estão sendo consideradas no problema de decisão.

Na modelagem de um problema de decisão multicritério, é importante identificar qual a problemática que está envolvida na situação problema, que nada mais é do que se pretende numa situação de decisão (LOPES, 2008). Para tanto, Roy (1996), identificou quatro problemáticas principais que podem ser envolvidas:

1. Problemática de escolha ( $\alpha$ ): objetiva identificar um subconjunto de ações, tão pequeno quanto possível, a partir de um espaço de ações, composto de alternativas que sejam compatíveis com os objetivos do decisor;
2. Problemática de Classificação ( $\beta$ ): a partir de categorias pré-definidas, objetiva-se alocar cada uma das alternativas nessas categorias;
3. Problemática de ordenação ( $\gamma$ ): consiste em alocar as alternativas conforme uma ordem de preferência;
4. Problemática de descrição ( $\delta$ ): consiste em descrever formalmente e sistematicamente as ações e suas consequências, podendo ser em termos quantitativos e qualitativos.

Vincke (1992) descreveu que as metodologias de apoio à decisão podem ser subdivididas em duas grandes escolas de abordagens:

- a) Escola Americana: as metodologias utilizadas por essa escola trabalham com critério único de síntese, exemplos desses métodos são MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), SMARTS (*Simple Multi-Attribute Rating Technique using Swings*), SMARTER (*Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*).
- b) Escola Francesa ou Europeia: são construídas relações de sobreclassificação entre as alternativas, representando as preferências do

decisor em relação as alternativas, geralmente comparadas par a par. Exemplos desses métodos são a família ELECTRE e PROMETHEE.

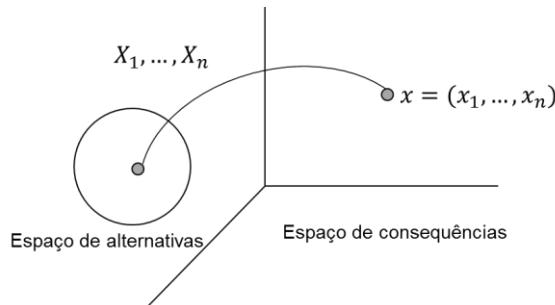
Dessa maneira, Souza (2007) conceitua Teoria da Decisão como sendo a formalização matemática do paradigma da escolha que o decisor deve fazer por uma ação de tal maneira a tornar as consequências as mais favoráveis possíveis para ele. Preocupa-se com o problema de como ser lógico em situações incertas, e também pode ser vista como uma maneira de abordar o estudo da estatística, através de uma caracterização mais aprofundada do raciocínio estatístico. Sendo que trabalha com o problema de como realizar uma decisão de o que fazer quando o que poderá acontecer é incerto, no entanto deve-se avaliar a partir de uma vasta lista contento as possíveis hipóteses de qual será o melhor processo decisório a seguir. A melhor regra de decisão estabelece que ação deve ser adotada a partir do que foi observado.

### 2.1.2 Teoria da Utilidade Multiatributo

A Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multiattribute Utility Theory*) derivou da Teoria da Utilidade e da Teoria da Decisão, incorporando aos problemas o tratamento de múltiplos critérios, pois se qualquer objeto pode ser valorado, e consequentemente avaliado, ele é valorado por mais de uma razão. Dentre o conjunto de métodos de MCDA, MAUT é o único que recebe a nomenclatura de teoria. Isso ocorre por apresentar uma estrutura axiomática e a sua aplicação depende da confrontação dos axiomas. Dessa forma, a determinação da função utilidade está atrelada a confirmação da estrutura axiomática e da estrutura de preferência do decisor (KEENEY & RAIFFA, 1976).

Na estrutura de MAUT pode ser considerado o elemento estado da natureza ( $\theta$ ), que representa as variáveis que não estão sob controle do decisor, fato que associa MAUT e teoria da decisão. Para cada combinação entre o estado da natureza e a alternativa de ação, há uma consequência, para isso é utilizado o conhecimento probabilístico, seja por meio de dados ou de conhecimento *a priori* de especialistas, ou mesmo a combinação dos dois. Assim, o tratamento de incertezas é inserido dentro da estrutura axiomática do MAUT, permitindo uma abordagem muito mais consistente para problemas multicritério de decisão sob situações de incerteza (ALMEIDA, 2013).

Este autor ainda afirma que o problema do decisor está em escolher uma alternativa  $a \in A$  que proporcione maior satisfação a ele com o resultado  $X_1(a), \dots, X_n(a)$ , no qual  $X_i$  representa os atributos de avaliação. Assim, é necessário um índice que combine  $X_1(a), \dots, X_n(a)$  em um índice de valor, a função utilidade (que é a avaliação das consequências em um contexto probabilístico). Dessa forma, deve-se obter uma função utilidade  $u$ , que é definida em um espaço de consequências, que atenda as propriedades da teoria, sendo que a Figura 2.1 apresenta a representação do espaço de consequências que deve ser objeto da avaliação.



**Figura 2.1: Espaço de consequências**

Fonte: Adaptado de Keeney & Raiffa (1976)

Basicamente, o problema consiste em como estruturar e quantificar uma função utilidade  $u$ , de maneira que:

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)] \quad (2.1)$$

em que  $u_i$  representa a função utilidade sobre o atributo  $x_i$ .

A utilização da função utilidade multiatributo no contexto de teoria implica na obtenção de uma função analítica através de um procedimento adequado de elicitação levando em consideração a estrutura axiomática da teoria. Portanto, é feita uma avaliação para averiguar se o decisor concorda com as condições que foram estabelecidas pela estrutura axiomática e em seguida o valor da utilidade das consequências é obtido através de um processo de entrevista fundamentado na teoria.

O procedimento de obtenção da função utilidade multiatributo faz com que MAUT seja conhecido como teoria prescritiva, pois para cada condição de independência que é observada existe uma forma analítica para a função utilidade,

sendo que essa forma analítica é derivada da aplicação dos axiomas da Teoria da Utilidade. O estudo das condições de independência preferencial deve ser feito, portanto, para obter a função utilidade multiatributo (ALMEIDA, 2013). Essas condições de preferência são a independência em utilidade e a independência preferencial, sendo que se há independência aditiva entre os atributos, há mútua independência em utilidade. No entanto, no caso em que a mútua independência em utilidade for identificada, não se pode afirmar que há independência aditiva entre os atributos.

A condição de independência aditiva permite a utilização da função utilidade aditiva, e quando há mútua independência em utilidade entre os atributos, é possível realizar a utilização de uma função multilinear para a avaliação da utilidade.

### 2.1.3 Análise de Sensibilidade simples e global

A Análise de Sensibilidade possui diferentes interpretações em diferentes comunidades técnicas e configurações dos problemas, porém uma definição para esse termo depende de como o *output* da análise é especificado, afirmam Saltelli et al. (2004). Esses autores ainda asseguram que o método de análise de sensibilidade a ser utilizado depende do objetivo que o modelo apresenta.

Para Hillier & Liberman (2006) um dos principais objetivos da análise de sensibilidade é identificar os parâmetros que são mais sensíveis, ou seja, aqueles que não podem ser alterados sem alterar a solução ótima do problema. Ou então para os parâmetros que não são identificados como sensíveis, pode-se avaliar o intervalo de valores ao longo do qual a solução do mesmo permanecerá a mesma.

Almeida (2013) afirma que a análise de sensibilidade é um estudo e análise que irá avaliar o impacto provocado na saída do modelo devido a variações feitas nos dados de entrada. Esse tipo de estudo é de extrema importância para o caso de modelos quantitativos, uma vez que tratando-se de dados de entrada, esses podem conter alguns erros, impactando no resultado final obtido. Os erros podem ser ocasionados por estimativas de alguns dados, uma vez que em muitos dos modelos aplicados, os dados não possuem valores exatos para as variáveis, possuindo alto grau de aproximação desses valores.

A análise de sensibilidade de um modelo poderá identificar em que ponto este é mais sensível dada a mudança de valores, resultando em diferentes propostas

para as variáveis. E, a partir dessa informação é possível avaliar quais as formas para fortalecer os dados ou parâmetros sensíveis do modelo.

Dessa forma, a análise de sensibilidade deve ser realizada a fim de identificar se conclusões preliminares provenientes de um modelo são robustas ou se são sensíveis a alterações (BELTON & STEWART, 2002). Pode-se investigar a significância de informações erradas, os efeitos que a incerteza do tomador de decisão possui sobre os valores e prioridades, ou mesmo ofertar diferentes perspectivas para o problema.

Segundo Sudret (2008) a análise de sensibilidade de um modelo visa quantificar a importância relativa de cada um dos parâmetros de entrada, sendo que ele classifica essa análise de duas formas: análise local e análise global. A análise local concentra-se no local de impacto do parâmetro de entrada do modelo, baseado no gradiente da resposta da variação em torno de um valor nominal, sendo que esse gradiente pode ser calculado de diferentes formas. Essa forma de análise para Homma & Saltelli (1996) proporciona a elucidação de parâmetros chaves em sistemas complexos, sendo considerada a saída do modelo (*output*) em si próprio ao invés da avaliação da incerteza dessa saída.

Já a análise global para Sudret (2008) tenta quantificar a incerteza dos parâmetros de saída causada pelos parâmetros de entrada, que são avaliados isoladamente ou combinados com outros. Homma & Saltelli (1996) complementam essa definição afirmando que a incerteza é avaliada em todo o intervalo de valores do parâmetro de entrada do modelo, podendo a análise de sensibilidade identificar quais parâmetros mais afetam o *output*.

Almeida (2013) afirma que existem muitas formas de se realizar a análise de sensibilidade, porém o autor cita duas formas dessa análise para quando se está trabalhando em um contexto de decisão. Essas duas formas são a avaliação isolada de parâmetros ou de dados de entrada de modelos, ou então a avaliação conjunta de todos os parâmetros e dados de entrada, ou mesmo um conjunto desses dados.

No caso da primeira forma de avaliação, Almeida (2013) afirma ser um procedimento muito simples, porém de grande valia, pois pode identificar o impacto de um parâmetro ou dado em específico cuja obtenção pode ter sido simplificada. Essa avaliação pode ter uma contribuição gerencial e informativa importante, e deve-

se avisar ao decisor sobre a sensibilidade de um determinado parâmetro ou dado para se ter atenção quando for necessário atribuir valores.

Quando da aplicação da segunda forma, Almeida (2013) assegura que é um procedimento que gera resultados com maior relevância, uma vez que um conjunto integrado de dados deve ser avaliado. De forma que essa análise pode ser feita de diversas maneiras, sendo uma delas pelo Método de Simulação de Monte Carlo, e a análise dos resultados finais pode ser de diferentes maneiras, por exemplo baseada no percentual de vezes que ocorrem mudanças, se a mudança é estatisticamente significativa.

Muitos estudos tem utilizado *polynomial chaos expansions* (PCA) para realizar a avaliação da análise de sensibilidade global (Sudret, 2008), utilizada principalmente em contextos de incertezas. Existem outros métodos também utilizados, porém a maioria utiliza um índice de sensibilidade Sobol' para avaliar as variáveis e parâmetros que são responsáveis pela incerteza gerada na saída do modelo. Porém, para esse trabalho, essa análise global de sensibilidade está fora do escopo da pesquisa, ficando como perspectiva para um trabalho futuro.

A análise de sensibilidade pode ser dita qualitativa, quando classifica-se os parâmetros de entrada de acordo com os impactos na saída do modelo, e pode ser quantitativa quando se obtém uma medida para esses impactos. Normalmente uma análise quantitativa também é qualitativa (CRESTAUX et al. 2009). De acordo com Campolongo et al. (2011), o índice de análise de sensibilidade quantitativo estima a porcentagem da variação do *output* de cada fator em relação ao componente de primeira ordem ou de um conjunto de fatores, porém para se obter uma boa estimativa desse índice, são necessários números muito grandes de cálculos no modelo de sensibilidade adotado.

Um estudo aprofundado do trabalho de Homma & Saltelli (1996) vem sendo desenvolvido, de forma que o índice de sensibilidade desenvolvido por eles, baseado no índice de Sobol', possa ser aplicado no modelo de decisão apresentado nesse trabalho. Por utilizar uma grande quantidade de equações matemáticas que precisam ser entendidas, esse trabalho tem demandado mais tempo, e ainda não pode ser implantado, porém se mostra uma boa opção para o trabalho consequente a esse, para a avaliação global de sensibilidade do modelo através de índices de

sensibilidade, analisando a relação entre as variáveis e seus impactos na saída do modelo.

Este trabalho utiliza a análise de sensibilidade simplificada em que cada uma das variáveis e parâmetros do modelo receba mudança nos seus valores, para um caso de aplicação específico, de cada vez. Espera-se ter como resposta o comportamento quanto ao aspecto sensibilidade ou robustez, em que ser sensível significa que pequenas alterações nos valores de entrada do modelo, podem ocasionar mudança no resultado final (*output*). Quando o aspecto de robustez é identificado, considera-se que mudanças nos valores não ocasionam mudança no resultado final. Outro aspecto pode também ser identificado, em que mudança no valor da razão das diferenças das seções é modificada, porém não o suficiente para ocasionar uma alteração de ordem das seções.

## 2.2 Revisão Bibliográfica sobre Gerenciamento de Riscos

Risco e gerenciamento de risco têm recebido ao longo dos anos diferentes significados, assim como vem sendo aplicados em diversas áreas de conhecimento, e por esse motivo, o presente item tem como objetivo apresentar os diversos conceitos atribuídos ao tema, as normas para o transporte de Gás Natural via gasodutos nos Estados Unidos da América e na Europa, por se tratar do tema do trabalho. Também é apresentado as diversas aplicações de análise de risco utilizando ferramentas de Decisão Multicritério.

### 2.2.1 Diversos conceitos atribuídos ao risco

Existem diversas definições para risco que podem ser encontradas na literatura (Aven, 2010). Geralmente na área de engenharia o conceito de risco está associado a perda esperada, no entanto, o que o autor afirma é que, dependendo da situação, o que deve ser avaliado também é o cenário em que está inserido o risco. Como ele mesmo cita, em casos em que a probabilidade de ocorrência de um acidente seja muito baixa e as consequências catastróficas e nos casos em que a probabilidade de ocorrência é alta e as consequências de baixo nível, a perda esperada é a mesma, mas para o gerenciamento de riscos a abordagem necessária para cada uma das situações deve ser diferenciada.

Algumas definições para risco são baseadas em probabilidades, possibilidades ou valor esperado, outros em valores indesejáveis, perigo ou incertezas. Há considerações que afirmam que o risco é epistêmico e subjetivo, enquanto outras consideram status ontológicos independente dos avaliadores (Aven, 2012).

Para Marhavilas et al. (2011) risco ocorre quando algo ou pessoas são adversamente afetadas por fontes de perigo, enquanto perigo é qualquer condição que gere insegurança, ou mesmo algo que seja fonte potencial de um evento indesejável que cause dano. Além disso, risco pode ser definido como uma medida da incerteza da ocorrência de um evento perigoso, através da avaliação da probabilidade e severidade de efeitos adversos.

Risco é, para Marhavilas & Koulouriotis (2008), qualquer condição insegura ou fonte potencial de um acontecimento indesejável com potenciais de danos e/ou prejuízos, de forma que algo ou alguém seja atingido negativamente por um acontecimento produzido por uma fonte de perigo.

O conceito de risco pode variar de acordo com o contexto em que ele está inserido, Hampel (2006) afirma que o entendimento básico de risco diferencia dentro da sociedade, em que leigos e cientistas possuem percepções diferenciadas para o risco. Para ele, o conceito científico do risco está relacionado com a probabilidade de ocorrência de um dano e a amplitude que os danos podem causar, possibilitando comparações entre diferentes valores para o risco, desde que alguns requisitos como padronização dos valores para o cálculo sejam assumidos, além de dados estatísticos suficientes para possibilitar análises estatísticas de qualidade.

A visão de que o risco está associado com a probabilidade de ocorrência de um evento e as consequências que podem resultar, segundo Almeida (2013) está relacionada a uma ação escolhida e utilizada pelo decisor em um contexto de decisão, e que está associada a um elemento conhecido como estado da natureza. Considerando um valor atrelado a probabilidade de ocorrência de um evento e suas consequências, segundo o autor citato, leva a utilização da abordagem de valor esperado, que em análise de decisão relaciona a utilização da teoria da utilidade.

### 2.2.2 Avaliação de riscos

Deve ser feito um processo essencial e sistemático para avaliar o impacto, ocorrência, e as consequências nas atividades nos seres humanos quando se deseja realizar uma avaliação de risco em sistemas com características de perigo inerente. Esse fato constitui uma ferramenta indispensável para uma política de segurança em qualquer tipo de empresa. Marhavilas et al. (2011) consideram que o risco é um valor que pode ser quantificado, que pode ser medido e expresso através de uma relação matemática com o auxílio de dados reais, sendo que a avaliação de risco é para a empresa a etapa mais importante dentro do processo de avaliação de perigos no trabalho, especialmente em empresas que as condições de trabalho são instáveis (MARHAVILAS & KOULOURIOTIS, 2008).

Aven (2012) afirma que devem ser avaliadas formas diferentes de risco além da perda esperada, envolvendo o cenário que o risco está inserido, os resultados esperados (consequências) e as probabilidades de ocorrência dos acidentes. Além disso, assegura que além de probabilidades que estão associadas a hipóteses e suposições deve-se levar em conta, quando da análise de risco, questões subjetivas relacionadas as incertezas, principalmente em problemas que envolvem alta incerteza sendo necessários outras formas de avaliação para apoiar as análises probabilísticas.

Ainda em relação a conceitos atribuídos para a análise de risco, Verma & Verter (2007) afirmam que o conceito de risco associado ao transporte de materiais perigosos é definido como a probabilidade de ocorrer a liberação desse produto multiplicada por sua consequência. Segundo eles, esse conceito é conhecido como “risco técnico” por necessitar de uma avaliação de risco em todo a extensão relacionada ao transporte, além de avaliar as mortes, ferimentos e evacuações ocasionadas devido um acidente.

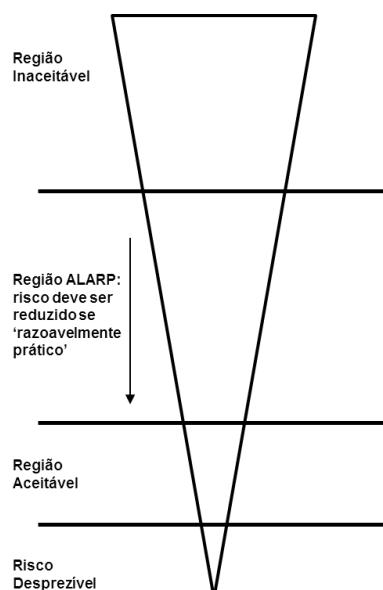
Hampel (2006) diz que uma visão diferenciada para o risco é utilizar a análise da incerteza concentrada no futuro e não em dados empíricos do passado, sendo essa visão conhecida como análise evolutiva do risco, dessa forma, a incerteza está atrelada, além de quando o dano vai acontecer, mas também qual o tipo de dano que pode ser esperado devido a um acidente.

Em relação ao risco percebido pela sociedade, Hampel (2006) afirma que esse está envolvido com a percepção quanto a ocorrência de dados, sendo

influenciado por uma série de características de riscos, como por exemplo, potencial catastrófico, incerteza, familiaridade, voluntariedade de exposição, entre outros. Ele ainda afirma que os riscos possuem maior impacto quando estão representados por um acontecimento catastrófico grande do que quando pequenos eventos distribuídos espacialmente e temporalmente possam acontecer.

Alguns autores como Jo & Ahn (2005), Jonkman et al. (2003) e Ma et al. (2013) dividem o risco em duas classes para avaliação mais difundidas, que são risco individual e risco social. Ainda segundo eles, risco individual refere-se a probabilidade da morte de uma pessoa em um determinado local devido a um acidente. Em contrapartida, o risco social é definido por eles como a relação entre a frequência de um acidente e a quantidade de mortes resultantes, não importando exatamente onde o acidente ocorreu.

Para a avaliação do risco individual, geralmente utiliza-se curvas de contorno e para o risco social utiliza-se a curva frequência-número (F-N) de falhas, que representa a frequência acumulada de acidentes e o número de pessoas afetadas (JO & AHN, 2005). O risco social também pode ser avaliado pelo princípio ALARP (*As Low as Reasonably Practicable*). Esse princípio mostra que existe um nível máximo, acima do qual o risco não pode ser tolerado em nenhuma circunstância (*Unacceptable Region*), e um limite inferior, que abaixo desse não é de interesse prático (Melchers, 2001), como pode ser observado na Figura 2.2.



**Figura 2.2: Princípio do ALARP**  
Fonte: Adaptado de Melchers (2001)

De acordo com Jones-Lee & Aven (2009) a análise de risco pode estruturar decisões difíceis e com resultados incertos de forma sistemática e equilibrada. Segundo eles, essa análise é uma metodologia destinada para determinar a natureza e extensão do risco, baseada sistematicamente de análises de probabilidades, sendo que a avaliação de incerteza é a principal tarefa da análise de risco, geralmente feita em três fases:

1. Identificação de perigos/ameaças;
2. Análise de causa e consequências, incluindo a análise de risco e vulnerabilidade;
3. Descrição do risco.

A análise de risco já foi amplamente aplicada em diferentes áreas, que conforme afirmam Ma et al. (2013) podem ser segurança, ciência ambiental, economia sociologia, entre outras, sendo essa análise utilizada para revelar a probabilidade de potenciais acidentes e suas causas, assim como estudar medidas necessárias para a redução do risco. Nesse mesmo sentido, Han & Weng (2012) conceituam análise de risco como sendo uma função matemática da probabilidade e consequência de um acidente, sendo que objetiva-se identificar possíveis acidentes, suas causas, e avaliar os efeitos que possíveis medidas de redução do risco podem resultar. Segundo Jones-Lee & Aven (2009) a análise de risco é utilizada como apoio à decisão, e cabe ao decisor equilibrar diferentes interesses e como dar peso às incertezas.

A gestão de risco está associada com todas as atividades implantadas para gerenciamento do risco e está preocupada em balancear a geração de valores de risco e evitar a ocorrência de eventos indesejáveis. Enquanto a avaliação de riscos está associada a descrição do risco para várias alternativas, identificando fatores contribuintes para o risco, e compara os resultados com valores de referência. Essa última suporta decisões de quais alternativas utilizar para reduzir o risco (AVEN & KROHN, 2014).

O problema apresentado pelas metodologias de análise de risco, é que elas somente levam em consideração danos provenientes de mortes, deixando de considerar danos intermediários (que não ocasionam mortes, mas prejudicam a normalidade da vida das pessoas) à população que também podem acontecer

devido a ocorrência de acidentes, além de não considerarem outros critérios de danos como o ambiental e financeiro.

Dessa forma, é possível afirmar que o modelo utilizado nesse trabalho trata-se de uma avaliação de risco, uma vez que identifica alternativas que necessitam de prioridade para a gestão aos olhos de um decisor. Não fornece atividades que devem ser implantadas para gerenciar o risco, apenas avalia quais são os fatores que influenciam na identificação de possíveis perdas, tais como as dimensões de risco humana, ambiental e financeira.

Além disso, é possível afirmar que trata-se de um contexto de riscos tecnológicos e industriais, pois abrange o escopo desse modelo, o sistema de transporte de gás natural via gasodutos. O modelo utiliza o conceito de que a avaliação do risco envolve a probabilidade de ocorrência de um determinado problema e as consequências que essa ocorrência irá causar na forma de payoffs para cada dimensão de risco. As probabilidades são avaliadas em relação a possibilidade de ocorrência de um acidente, mas também da não ocorrência, ou seja, haver um cenário de normalidade operacional.

Considera-se ao final que o risco é o esperado das consequências. Conceito esse provindo da teoria da decisão e exposto por Souza (2007), que formalizou o conceito de risco atrelado a teoria da decisão como sendo uma função que corresponde ao valor esperado da perda quando se segue um curso de ação, assumindo um estado da natureza  $\theta$ .

### 2.2.3 Métodos para avaliação de risco

Diversos métodos de avaliação de risco têm sido utilizados em diferentes áreas do conhecimento, porém esses métodos podem ser divididos em três técnicas principais: quantitativas, qualitativas e técnicas híbridas. No estudo feito por Marhavilas et al. (2011) foi avaliada a quantidade de pesquisas realizadas nessa área, e verificaram que os métodos quantitativos possuem maior frequência relativa entre os artigos avaliados (de seis periódicos científicos da Elsevier diferentes da década de 2000-2009), cerca de 65,63 %, enquanto os métodos qualitativos representavam 27,68% e os híbridos uma minoria de 6,7%. A pouca representatividade dos métodos híbridos os autores atribuíram a complexidade de

execução desses modelos, devido ao caráter de *ad hoc* impedindo ampla divulgação.

As principais técnicas para a avaliação de risco foram resumidas na Figura 2.3, subdivididas conforme os tipos de dados utilizados.

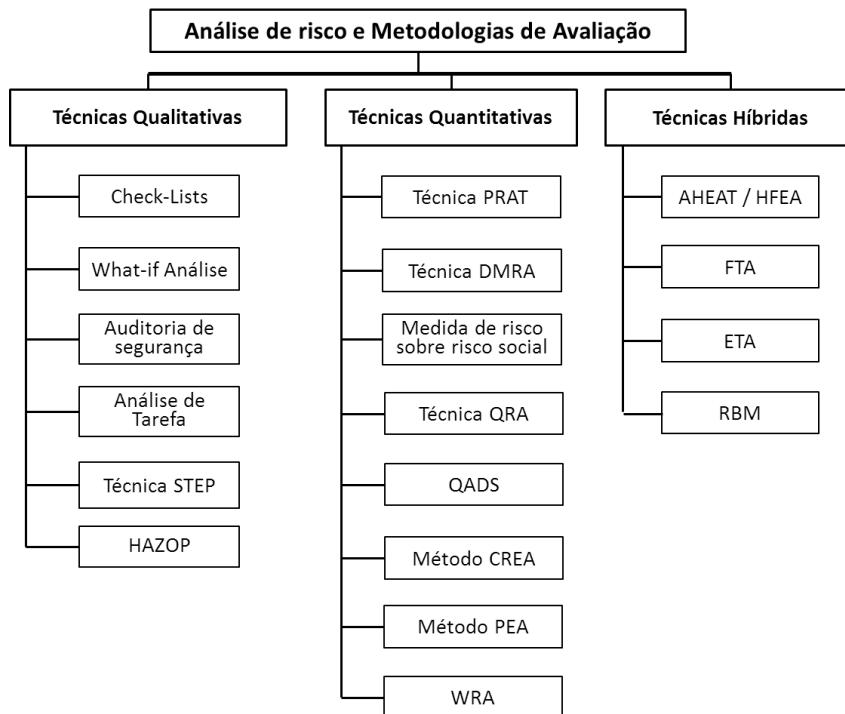


Figura 2.3: Classificação dos métodos de avaliação dos riscos  
Fonte: Tradução de Marhavilas et al. (2011)

### 2.2.3.1 Técnicas qualitativas

Essas técnicas são baseadas nas estimações analíticas de processos e no conhecimento de especialistas/gestores da área que se está realizando a avaliação.

1) *Checklists* (listas de verificação): realiza uma avaliação através de critérios pré-estabelecidos, na forma de um ou mais checklists. É o método mais simples para a análise de perigo, por meio de questões sobre funcionamento, organização manutenção e outras áreas;

2) *What-if analysis*: Essa técnica consiste em realizar uma série de questionamentos do tipo “O que acontece se...?” sobre um evento específico ou sobre um acontecimento operacional, objetivando construir uma visão inicial sobre as consequências relativas a um acontecimento. Isso permite que a identificação do risco ocorra ainda na fase de projeto, permitindo a tomada

de algumas decisões ainda nessa fase. Realizada normalmente por uma ou mais equipes com diferentes experiências, que em reuniões decidem as ações a serem tomadas.

3) *Safety audits* (auditorias de segurança): De acordo com Reniers et al. (2005), nessa metodologia os programas de segurança operacional de uma empresa são inspecionados por um auditor ou uma equipe de auditoria. O resultado disso é um relatório que pode fazer sugestões para melhoria dos padrões de funcionamento da segurança das operações, além da conscientização das pessoas envolvidas com a segurança operacional.

4) *Task Analysis* (Análise de Tarefas): Essa técnica analisa a maneira que as pessoas executam suas tarefas no ambiente de trabalho. Pode ser utilizada para criar um detalhamento do envolvimento humano com todas as informações necessárias para uma análise do nível de detalhamento que se deseja. Uma forma de realizar essa análise é através da “árvore de eventos” (MARHAVILAS et al., 2011).

5) *The Sequentially Timed Event Plotting (STEP) technique*: Essa técnica fornece informações sobre o sequenciamento das operações/eventos que podem contribuir para o acontecimento de um acidente, ou seja, como se fosse a construção de um fluxograma para os possíveis acontecimentos de acidentes.

6) *Hazard and Operability study (HAZOP)*: Identifica os possíveis desvios de um processo em relação as condições estabelecidas no projeto, ocasionando a formação de perigo. Procura identificar as causas e as consequências dos riscos e posteriormente propor medidas para reduzi-lo a níveis aceitáveis (RENIERS et al., 2005).

#### 2.2.3.2 Métodos quantitativos

Nessa técnica considera-se que o risco pode ser quantificado, estimado e expresso por uma relação matemática com o auxílio de dados reais ou através de experiência de gestores em um determinado local. Dentre esses métodos apresentados na Figura 2.3, pode-se destacar os a seguir (MARHAVILAS, KOULOURIOTIS & GEMENI, 2011):

1. *The proportional risk-assessment (PRAT) technique*: Esse método utiliza uma formula proporcional que leva em consideração as possíveis

consequências de um acidente, um fator de exposição e um fator de probabilidade, através de uma multiplicação entre essas três grandezas. Esse cálculo fornece as prioridades de atenção para situações perigosas, cuja validade dos resultados depende da qualidade dos dados avaliados.

2. *The decision matrix risk-assessment (DMRA) technique*: consiste em uma mensuração e categorização de risco avaliando uma base de dados contendo probabilidade e as consequências tanto quanto a importância relativa dos riscos. A combinação entre a consequência e o intervalo de probabilidade gera uma estimativa de riscos, ou seja, o produto entre a consequência e a probabilidade gera uma medida de risco. Essa técnica tem duas contribuições diferenciadas a) Ela diferencia os riscos relativos para facilitar a tomada de decisões, b) Melhora a consistência para base da decisão, tratando as consequências e as probabilidades em diferentes classificações.

3. *The QRA (Quantitative Risk-Assessment) tool*: Essa ferramenta foi desenvolvida em um ambiente industrial com perigo de explosão avaliando a segurança externa. Fornece uma consistente base de avaliação para o risco individual e risco social, consistindo em uma combinação de modelos. De acordo com Han & Weng (2010) esse método tem sido amplamente utilizado na avaliação de riscos em gasodutos de gás natural e é composto por quatro etapas: análise qualitativa, avaliação quantitativa, mensuração do risco e controle e medidas de redução do risco. No entanto, esses autores consideram que pode haver falha nessa técnica, uma vez que ela não leva em consideração todas as possíveis consequências de um acidente, e no caso de transporte de gás natural, se pode ter diferentes cenários formados por um escape de gás.

#### 2.2.3.3 Métodos Híbridos

1. *Fault tree analysis (FTA)*: É uma técnica dedutiva que concentra-se em um único particular evento, e preocupa-se em determinar as causas para esse evento. É uma técnica de análise visual em que modelos apresentam como as relações lógicas entre falhas de equipamentos, erros humanos, e eventos externos podem se combinar para causar acidentes específicos. É uma ferramenta lógica de modelagem para descobrir como e quantas vezes um

indesejado evento irá ocorrer, produzindo as vezes resultados quantitativos e outrora resultados qualitativos (RENIERS et al., 2005).

2. *The ETA (Event Tree Analysis) method:* Análise da árvore de eventos (ETA) é uma técnica que utiliza árvores de decisão e, logicamente, desenvolve modelos visuais dos resultados possíveis de um evento inicial. Além disso, é uma representação gráfica do modelo da lógica que identifica e quantifica os resultados possíveis após o evento inicial. Esses dois métodos diferenciam-se pelo procedimento utilizado para realizar a avaliação do risco.

#### 2.2.4 Normas internacionais para transporte de Gás Natural

Os gasodutos de transporte de gás natural, para serem construídos e mantidos em funcionamento ao longo do tempo, devem seguir normas que podem variar de acordo com o país em que estão sendo instalados, sendo que essas normas apresentam diferentes regras em vários âmbitos levando em consideração o tema central de transporte de gás via dutos. Desta forma, este item tem como finalidade apresentar algumas normas utilizadas em diferentes países e suas principais atribuições, possibilitando assim ter uma visão de quais as principais preocupações quando trata-se de gasodutos.

##### 2.2.4.1 Descrição das Principais Normas Americanas

###### 2.2.4.1.1 ASME B31.8

A Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (*American Society Mechanical Engineering – ASME*) publicou um documento intitulado *Gas Transmission and distribution Piping Systems, ASME code for Pressure Piping, B31* (*American Society Mechanical Engineering, 2010*) que estabelece requisitos de segurança para transporte de gás com alta pressão em tubulação, além de elementos necessários para a construção de um correto design. Sendo assim, o código inclui: matérias e padrões aceitáveis para os componentes da tubulação; requisitos para o design de componentes e montagem; requisitos para avaliação e limitação de stress, reações e movimentos relacionados à temperatura (mudanças), pressão e outras forças envolvidas; orientações e limitação na seleção e aplicação de materiais, componentes e métodos de união; requisitos para fabricação,

montagem e instalação da tubulação; requisitos para teste, exame e inspeção do gasoduto; processos de operação e manutenção que são essenciais para a segurança pública; e dispositivos para a proteção externa de gasodutos e corrosão interna.

O código ASME B31.8 apresenta uma série de definições importantes no âmbito desse trabalho, que são expostas a seguir:

- Componente: um item individual ou elemento de montagem em linha com a tubulação em um sistema de tubulação, tais como, mas não limitado a, válvulas, cotovelos, flanges e encerramentos.
- Seção do gasoduto: uma extensão contínua do gasoduto contido entre estações de compressão adjacentes, entre uma estação de compressão e uma válvula de bloqueio, ou entre válvulas de bloqueio adjacentes.
- Segmento: uma extensão do gasoduto que contenha características semelhantes em uma localização geográfica específica.
- Consequência: o impacto que uma falha no gasoduto poderia causar sobre o público, funcionários, propriedade e meio ambiente.

Além disso, a norma afirma que os principais danos sofridos pelos gasodutos são provenientes de interferência externa, tendo maior possibilidade de danos onde há maior concentração de edifícios destinados a ocupação humana. Dessa forma ela propõe um método para avaliar o grau de exposição da linha do gasoduto à danos, através de Classe de Locação (*Location Class*) que levam em consideração a densidade populacional em uma área e a distância para o gasoduto.

(a) *Location Class 1*: caracterizada por qualquer seção de 1,6 km, que tenha 10 ou menos edifícios destinados a ocupação humana, reflete áreas como deserto, montanhas, pastagens, campos agrícolas e áreas pouco povoadas.

(1) Classe 1, Divisão 1: Constitui um local de classe 1 em que o fator de criação do tubo é superior a 0,72, mas igual ou inferior a 0,80 e foi testado hidrostáticamente a 1,25 vezes superior à pressão máxima de funcionamento.

(2) Classe 1, Divisão 2: Constitui um local de classe 1 em que o fator de criação do tubo seja igual ou inferior a 0,72, foi testada a 1,1 vezes a pressão máxima de funcionamento.

(b) *Location Class 2*: qualquer seção de 1,6 km, que tenha mais de 10 mas menos de 46 edifícios destinados a ocupação humana, reflete as áreas onde o grau de população é intermediária entre *Location Class 1* e *Location Class 3*, como áreas marginais em torno das cidades e vilas, áreas industriais, fazendas ou propriedades rurais, etc

(c) *Location Class 3*: é qualquer seção de 1,6 km, que tenha 46 ou mais edifícios destinados a ocupação humana, exceto quando a *Location Class 4* prevalece, reflete áreas como desenvolvimento de subúrbios habitacionais, centros comerciais, áreas residenciais, áreas industriais e outras áreas povoadas que não cumprem os requisitos da *Location Class 4*.

(d) *Location Class 4*: inclui as áreas onde os edifícios de vários andares são predominantes (significa quatro ou mais pisos acima do solo, incluindo o primeiro ou o piso térreo), onde o tráfego é pesado ou denso, e onde pode haver muitas outras atividades subterrâneas. A profundidade de porões ou o número de pisos cave é imaterial.

#### 2.2.4.1.2 ASME B31.8s

A norma intitulada *Managing System Integrity of Gas Pipelines (American Society Mechanical Engineering, 2010)*, que é um suplemento a norma ASME B31.8, tem como objetivo proporcionar ao operador do sistema informações necessárias para desenvolver e implantar um sistema de gestão de integridade eficaz utilizando práticas comprovadas na indústria e processos, sendo aplicados a qualquer sistema de dutos.

Ela afirma que a análise de risco deve ser realizada para os gasodutos e para as instalações relacionadas, com a finalidade de priorizar atividades de gestão de integridade, servindo como dados e informação para a tomada de decisão. Risco é tipicamente classificado como o produto entre dois fatores primários: a probabilidade de ocorrência de um evento adverso e a consequência resultante para esse evento, sendo que consequências consideram o impacto potencial do evento para indivíduos, propriedades, negócios e meio ambiente.

Segundo a ASME B31.8s, a análise de risco em gasodutos pode ser resumida em seis pontos:

1. Priorização de gasodutos/segmentos para programação da análise de integridade e ações mitigadoras;

2. Avaliação de benefícios da tomada de ações mitigadoras;
3. Determinação de medidas mitigadoras mais efetivas para identificar ameaças;
4. Avaliação do impacto na integridade com modificação no intervalo de inspeção;
5. Avaliação da necessidade ou uso de metodologias de inspeção alternativas;
6. Alocação de recurso mais efetivamente.

#### 2.2.4.1.3 GRI 00-0189

O relatório GRI 00-0189 (*Gas Research Institute*, 2000) foi produzido a pedido do *Gas Research Institute* para desenvolver um modelo que tratasse de uma abordagem para o dimensionamento da área afetada em caso de falha em um gasoduto de transporte de gás natural em alta pressão. Segundo esse relatório, o tipo de risco existente e os possíveis danos ocasionados por uma falha dependem do modo de falha, da natureza da descarga do gás e do tempo de ignição, resultando em vários cenários de perigo semelhantes aos apresentados por Sklavounos & Rigas (2006).

O modelo proposto baseia-se em 3 etapas:

1. Relaciona a taxa de liberação do gás e a intensidade de calor do fogo como uma função da distância da fonte do fogo;
2. Um efetivo modelo de taxa de liberação que proporciona um aproximado estado constante relativo a atual taxa de liberação;
3. Um limiar de intensidade de calor que estabelece o nível de intensidade de calor sustentado, acima do qual os efeitos sobre pessoas e propriedades são consistentes com a definição de uma área de alta consequência.

Ao final, é proposta uma forma de se calcular a área de perigo associada ao transporte de gás natural em alta pressão. A fórmula sugerida é apresentada a seguir (2.2).

$$r = \sqrt{\frac{2348pd^2}{I}} \quad (2.2)$$

Em que:

- p: pressão (psi);  
d: diâmetro do duto (in);  
I: limiar de intensidade de calor (btu/hr/ft<sup>2</sup>).

#### 2.2.4.1.4 API 521

Essa norma foi publicada pelo *American Petroleum Institute* (Instituto Americano de Petróleo) no ano de 1997 intitulada como *Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems*, cujo objetivo é proporcionar um guia para avaliar as principais causas de sobre pressão, determinar taxas de alívio, selecionar e desenvolver sistemas incluindo componentes. Porém a norma não realiza nenhuma discussão sobre análise de risco.

#### 2.2.4.2 Descrição das Principais Normas Britânicas

##### 2.2.4.2.1 BS EN 14161

A norma BS EN 14161: *Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems* foi publicada pela *British Standards* em 2003 (*British Standards Institution*, 2003) e tem como escopo especificar requerimentos e propor recomendações para o design, materiais, construção, teste, operação, manutenção e abandono de sistemas de gasodutos utilizados para o transporte em indústrias de petróleo e gás natural. Ela pode ser aplicada somente a gasodutos metálicos rígidos em construção ou para modificações em dutos existentes.

Esta norma também propõe a utilização de *Location Classes* como na norma americana ASME B31.8 apresentada anteriormente, porém deixa mais claro a relação com a densidade populacional em uma área.

- *Location Class 1*: caracterizada por não existir atividade humana frequente nem habitação humana permanente, refletindo regiões inacessíveis como desertos.
- *Location Class 2*: destinada a áreas com menos de 50 pessoas por quilômetro quadrado, reflete regiões como pastagens, campos agrícolas, e outras áreas com pouco povoado.
- *Location Class 3*: composta por regiões em que a densidade populacional fica entre 50 e 250 pessoas por quilômetro quadrado, existindo várias unidades habitacionais como hotéis ou edifícios de escritório. Nessa classe a

densidade populacional é intermediária, refletindo áreas em torno de cidades, fazendas e propriedades rurais.

- *Location Class 4:* caracterizada por áreas em que a densidade populacional é superior a 250 pessoas por quilômetro quadrado, com exceção de áreas onde a *Location Class 5* prevalece. Representa habitações suburbanas, áreas residenciais e industriais, que não são abrangidas pela *Location Class 5*.
- *Location Class 5:* áreas onde há uma grande quantidade de edifícios com quatro pisos acima do solo ou mais, tráfego de pessoas denso e onde ocorra atividade subterrânea intensa.

#### 2.2.4.2.2 PD 8010-3: 2009

A norma PD 8010-3 *Code of practice for pipelines – Part 3: Steel pipelines on land – Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables* (British Standards Institution, 2009) foi publicada em 2009 em que é possível encontrar uma orientação para desenvolvimento de avaliação de risco nas proximidades de gasodutos contendo gases inflamáveis. Essa norma inclui recomendações para:

- Determinação de frequências de falhas;
- Modelagem de consequências;
- Suposições de algumas normas para aplicar na metodologia de avaliação de risco para ordenamento de zonas do território;
- Fatores de redução de risco para aplicar em métodos de mitigação;
- Resultados para risco individual e social.

Essa norma não cobre os riscos ambientais envolvidos, porém estabelece uma metodologia de melhores práticas para avaliação de riscos que envolve toda a população presente nas redondezas do gasoduto. Realiza uma avaliação de análise de riscos associado ao MAHP (*Major Accident Hazard Pipeline*), para quantificar o risco em novos e existentes gasodutos. Pode ser utilizada em gasodutos que transportam substâncias das categorias D e E<sup>1</sup>, que causam danos a população.

---

<sup>1</sup> Substâncias da categoria D são não tóxicas e *single-phase* do gás natural. Substâncias da categoria E são flamáveis ou fluidos tóxicos que são gases na temperatura ambiente e condições de

Avaliação de risco quantificado aplicada a um gasoduto envolve a estimativa numérica de risco, resultante do cálculo das frequências e consequências de um conjunto completo e representativo de cenários de acidentes credíveis. Segundo a norma, o cálculo para avaliação de risco envolve cinco passos:

1. Coleta de dados (por exemplo, sobre o gasoduto e sua localização, condições meteorológicas, propriedades físicas da substância transportada, população);
2. Previsão da frequência de falhas que serão consideradas na avaliação;
3. Previsão das consequências dos vários cenários de falhas, incluindo:
  - Cálculo da taxa do fluxo de liberação;
  - Estimação da dispersão de vapores inflamáveis;
  - Cálculo da radiação térmica emitida pelo fogo em uma liberação;
  - Quantificação dos efeitos da radiação térmica na população envolvida;
4. Cálculo do risco e avaliação de critérios:
  - Estimação do risco individual;
  - Estimação do risco social;
5. Identificação de medidas específicas do local para redução dos riscos.

Segundo essa norma, uma falha em um gasoduto de alta pressão pode ocorrer através de duas formas: *leak* (vazamento) e *rupture* (ruptura). Um vazamento é definido como a perda do fluido através de um defeito estável e a ruptura ocorre quando há perda de fluido através de um defeito instável, que se estende durante a falha, geralmente a área de liberação é equivalente a duas extremidades abertas.

Risco individual é conceituado pela norma como a medida da frequência que se espera que uma pessoa, localizada a certa distância da tubulação, esteja exposta a um nível de dano devido a ocorrência de alguns riscos. Já o risco social é considerado como a relação entre a frequência de acontecimento de um perigo e o número resultante de vítimas. Esse risco é muito importante pelo fato de que o gasoduto pode estar localizado em áreas altamente povoadas, ocasionando um impacto muito grande quando da ocorrência de acidentes.

---

pressão atmosférica, como o hidrogênio, gás natural (que não está classificado na categoria D, etano, etileno, gás liquefeito de petróleo entre outros (British Standard Institution, 2003).

#### 2.2.4.2.3 ISO 17776

A norma ISO 17776: *Petroleum and natural gas industries - Offshore production installations - Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment* publicada em 2002 tem como objetivo identificar algumas ferramentas e técnicas utilizadas para a análise de risco na exploração e produção de petróleo e gás, porém não proporciona detalhamento técnico para aplicá-las. Fornece uma série de definições de termos utilizados.

#### 2.2.4.3 Estudo sobre as Citações das Normas em Veículos Indexados no ISI

Diversos artigos citam várias das normas descritas anteriormente.

A norma americana ASME B31.8 é citada por quatro artigos (Batzias et al. (2011), Barrette (2011), Eldevik et al. (2009) Gomes et al. (2013)), sendo que esses afirmam que ela pode ser utilizada como um código para normatizar gasodutos de Gás Natural, não fornecendo nenhuma avaliação da norma, somente afirmando a existência e possível utilização dela. Noronha Jr. et al. (2010) fazem uma avaliação crítica do apêndice R da norma que apresenta um formulário para avaliação de tensões em “dentes” nos gasodutos Gás Natural, sendo que ao final eles propuseram mudanças em algumas fórmulas e evidenciaram a necessidade de maior detalhamento dos procedimentos a serem utilizados para o desenvolvimento do cálculo na norma.

A norma API RP 521 foi mencionada nos artigos de Jo & Ahn (2005, 2006), Jo & Crowl (2008), e Ma et al. (2013) para descrever a fórmula para o cálculo do calor utilizado em seus modelos de análise de risco em gasodutos.

As normas BS PD 8010 – 3 e BS EN 14161 são citadas por Eldevik et al. (2009) como sendo códigos que podem ser utilizados para avaliação do design e operação de gasodutos no mundo.

Em relação ao *Purple Book* publicado pelo CPD (*Committee for the Prevention of Disasters* – Comitê de Prevenção a Desastres), Jo & Ahn (2005), Han & Weng (2010, 2012), Ma et al. (2013), Koornneef et al. (2012), Brown et al. (2013), mencionam que o risco em gasodutos pode ser avaliado de diferentes formas, e que essa norma traz duas medidas de risco, a individual e a social. Dentre todas as etapas para se calcular o risco apresentadas pela norma, algumas delas são citadas por diferentes autores, tais como Badri et al. (2013) que referem-se à probabilidade de ignição imediata, Koornneef et al. (2010), Shebeko et al. (2007), Scenna & Cruz

(2007), Milazzo & Aven (2012), Tugnoli et al. (2012), Antonioni et al. (2009), e Gheorghe et al. (2005). Taveau (2010) afirma que o *Purple Book* é bastante prático porque ele inclui cenários padrões e frequência de falhas usadas na “Análise de Risco Quantitativa”, porém apresenta valores para taxas de falhas e alguns eventos são baseados em julgamentos de especialistas e poderiam estar defasadas.

Koorneef et al. (2010) utilizam dois softwares comerciais que podem ser acessados com mais detalhes no “*Yellow Book*” para avaliar os efeitos físicos causados por falhas em gasodutos, esse software também é citado por Mattei et al. (2011). Essa norma também é citada por Lins & Almeida (2012), Jo & Crowl (2005) como fonte de fórmulas para o cálculo da transmissividade atmosférica. Outros artigos que citam essa norma são Shebeko et al. (2007), Yang et al. (2013), Arnaldos et al. (1998), Gheorghe et al. (2005), Milazzo & Aven (2012), Tugnoli et al. (2012), Antonioni et al. (2009).

Para o estudo de Sklavounos & Rigas (2006) dados mais conservadores entre o “*Green Book*” e outra norma foram adotados para determinação da distância segura no cenário de “*jet fire*”. Jo & Ahn (2006) e Brito & Almeida (2009) utilizam esta norma como fonte para a fórmula do cálculo da Probit para avaliação da probabilidade de mortes em caso de acidentes em gasodutos.

#### 2.2.4.4 Interpretação das normas

O modelo proposto neste trabalho utiliza múltiplos critérios para avaliação dos riscos envolvidos no transporte de Gás Natural, que são ambiental, humano e financeiro. Esse fato torna o modelo diferenciado do que comumente apresentado na literatura e até mesmo nas normas estudadas, que basicamente levam em consideração como acidentes nesse cenário afetam os seres humanos ocasionando mortes.

Fica clara a necessidade de avaliar como o modelo pode quantificar o fato da perda de um ser humano para a sociedade, quais serão os possíveis efeitos dessa perda. Nesse sentido, cabe ressaltar que o modelo, diferentemente das normas, trabalha com perdas ocasionadas por ferimentos devido a queimaduras e não somente a morte, quando uma pessoa está deixando de ser produtiva por problemas de saúde.

O que pode ser alvo de questionamento do modelo é a análise de custo-benefício que esse pode proporcionar. No entanto, de acordo com Aven (2009),

essa análise é realizada com o intuito de atribuir valores monetários para uma lista de encargos e benefícios e resumi-los de acordo com o valor presente líquido esperado, proporcionando uma forma de comparação para a redução de riscos. Porém, o problema consiste em transformar consequências não monetárias em valores de custos, como por exemplo, o custo da morte de um indivíduo.

O ALARP, tem como princípio que os níveis do risco sejam tão baixos quanto possíveis, utilizando-se da análise de custo-benefício para avaliar os riscos envolvidos. Ele contabiliza aquilo que a sociedade está disposta a pagar para melhorar a segurança quanto ao risco de morte, sendo que o custo gasto com essa melhoria não pode ultrapassar os benefícios proporcionados por ela. Em alguns casos citados por Aven (2009, 2010) ocorre a mensuração de uma vida utilizada na avaliação de custo-benefício em um valor de £ 1-2 milhões. O que não parece ser um valor baseado em estimativas e muito menos em embasamento estatístico, além do mais não há explicação para assumir esse valor, por se tratar de um componente da análise de risco subjetiva. O autor quer dizer que a análise de custo-benefício avalia quanto as pessoas estão dispostas a pagar por uma melhoria que elas irão sentir, algo totalmente subjetivo, em comparação com o custo que essa melhoria irá acarretar.

De acordo com o que falam Jones-Lee & Aven (2009) para o processo de tomada de decisão a análise do custo-benefício social e a análise de risco são ótimos *insights* complementares, mesmo em casos onde há uma grande incerteza associada, como é o caso de transporte de Gás Natural por gasodutos. Esses autores afirmam que a análise do custo-benefício social tem como propósito fornecer um mecanismo pelo qual decisões que envolvem recursos escassos da sociedade podem ser levados em consideração de acordo com as preferências dos membros dessa sociedade que serão afetados pela decisão tomada. Associam esse termo ao fato de quanto as pessoas estão dispostas a pagar para ter sua segurança de vida assegurada, desenvolvendo uma metodologia denominada por eles como “*Value of a Prevented Fatality*” (VPF – Valor de Prevenção de Fatalidade).

Ersdal & Aven (2008) afirmam que o custo-benefício é uma forma de auxiliar os decisores na tomada de decisão, e quando essa metodologia for utilizada para avaliação de risco, é necessário incluir todos os custos sociais inclusive os associados à perdas de vidas e ambientais. As considerações observadas com essa

metodologia só devem ser aceitas se houver um benefício positivo através da aplicação de investimentos em segurança.

A norma BS PD 8010-3 trata da avaliação do risco subdividida em risco social e risco individual. Porém, quando o risco individual é avaliado, fica-se atrelado a probabilidade de ocorrência de uma morte vinculada a um ponto específico de distância do gasoduto, não considerando a possibilidade de diferentes danos causados ao indivíduo (como queimaduras), e que talvez não possam representar uma medida de risco geral e sim um conjunto de medidas individuais.

Em relação ao risco social, essa mesma norma utiliza uma curva FN, que expressa a frequência acumulada de ocorrência de acidentes, geralmente anual, e a ocorrência de N ou mais acidentes. Para a avaliação do risco para um grupo de pessoas a partir desse gráfico, submete-se a duas situações de risco em que acima da linha que divide o gráfico em duas partes remete a ser uma zona de avaliação aceitável e abaixo dessa linha trata-se de uma região tolerável pelo ALARP.

Essa avaliação, que é proposta pela norma BS PD 8010-3, é superficial uma vez que utiliza valores da frequência de acidentes variando em uma escala diferente da que pode ser na realidade, assim como o fato de que as características do entorno do gasoduto em toda sua extensão podem ser variadas, levando a uma inconsistência da utilização de métodos que assumem homogeneidade para o cálculo do risco. Dessa forma, a aplicação de recursos, tanto financeiros quanto de mão-de-obra e de tempo, para a mitigação de riscos uniformemente para todo o gasoduto torna-se ineficiente.

Esse fato explicitado acima garante maior aplicabilidade do modelo, uma vez que uma das primeiras etapas desse é a subdivisão da extensão total do gasoduto avaliado em seções, e todos os cálculos realizados para obter ao final uma ordenação por ordem prioritária de mitigação do risco, são feitos para cada seção identificada. Essas seções são estrategicamente subdivididas de acordo com as características do entorno do gasoduto, justamente para tornar os cálculos mais próximos da realidade e aplicar medidas de mitigação de forma mais eficiente e eficaz.

Quanto ao impacto ambiental causado por um acidente em gasodutos, as normas ASME B31.8s e a ISO 17776 afirmam que esse impacto deve ser levado em consideração, e a norma BS EN 14161 assegura que deve ser realizada proteção ao

meio ambiente quando houver a construção, manutenção ou abandono do gasoduto, porém nenhuma delas mencionam como a avaliação deve proceder. Essa avaliação possui menor impacto quando comparada à avaliação humana na maioria da literatura da área, porém com a atual conjuntura de leis mais severas para o impacto ambiental e estar em foco pela sociedade os aspectos relacionados com a preservação do meio ambiente, essa análise vem recebendo maior ênfase.

Além do que já foi mencionado, observou-se uma semelhança entre uma fórmula proposta no artigo de Jo & Ahn (2006) e a Normativa GRI 00-0189. No artigo, os autores citados definem uma proximidade mínima em volta do gasoduto, a fim de garantir maior segurança e reduzir as consequências de um acidente. Dessa forma, assumindo que a velocidade de propagação do gás e a área de perigo se tornam constante à medida que o ponto de ocorrência do acidente se afasta da fonte de fornecimento de gás, a proximidade mínima é definida como a área de perigo, e então eles propuseram a utilização de uma Equação (Equação 3.1 desse trabalho) para essa avaliação. Esta fórmula é muito semelhante a Equação (2.2) proposta pela GRI 00-0189 apresentada anteriormente, porém para a avaliação da área de perigo para o transporte de Gás Natural, que depende do diâmetro do gasoduto e da pressão do gás que está sendo transportado, sendo que não há citação no artigo de onde os estudos para desenvolver essa fórmula foram baseados.

Um diferencial do modelo utilizado no trabalho é o cálculo de uma área de perigo referente a cada uma das seções subdivididas do gasoduto. Fato esse que torna mais precisos os cálculos dos riscos do que o proposto pela norma ASME B31.8, em que afirmam que a distância do gasoduto para qualquer ponto deve ser maior que 0,3 m, não variando conforme as características do gasoduto.

## 2.2.5 Modelos Multicritério para gerenciamento de Riscos

Rogerson & Lambert (2001) já afirmavam que a organização dos riscos e a determinação dos objetivos de um sistema são tarefas cruciais, principalmente quando essas envolvem múltiplas dimensões de alocação de recursos e riscos complexos. Desta forma, destaca-se alguns trabalhos desenvolvidos na área de gerenciamento de risco utilizando métodos de decisão multicritério.

### 2.2.5.1 Modelos multicritério para gerenciamento de risco em diversos setores

Dentre os métodos de apoio à decisão multicritério, o AHP (*Analytic Hyerarchy Process*) tem sido utilizado para a avaliação de risco nas mais diferentes áreas do conhecimento, por se tratar de um método de fácil aplicação embora apresente algumas inconsistências. Aminbakhsh et al. (2013) utilizaram esse método para propor critérios de priorização de riscos de segurança na execução de projetos, definindo orçamento e metas para garantir investimentos em prevenção adequados, sem comprometer a segurança do projeto. Além deles, autores como Badri et al. (2012) propuseram uma avaliação de risco de segurança e saúde ocupacional dos trabalhadores e moradores de regiões circunvizinhas a partir da geração do projeto. O método proposto por Qiang & Wang (2007) trata-se de um modelo para avaliar o índice de risco associado a erosão do solo pela água através da integração do AHP com técnicas de sensoriamento. Outros autores que trabalham com essa ferramenta no cenário de análise de risco são Zhang et al. (2012), Zayed et al. (2008).

Um outro método multicritério utilizado para avaliação de risco é a família de métodos ELECTRE que foi utilizado por Cailloux et al. (2013) em que propõe a utilização do ELECTRE TRI para avaliar qualitativamente o nível de risco associado com diferentes zonas territoriais, conforme os critérios que o decisão entender serem mais convenientes de serem analisados em cada caso.

Na área de gerenciamento de risco financeiro, Doumpas & Zopounidis (2001) propuseram a utilização de um método de apoio à decisão multicritério para avaliar o risco de acordo com classes pré-estabelecidas. Segundo os autores, o método escolhido leva a avaliação de um conjunto de funções utilidade aditivas, que são empregadas para decidir a respeito da classificação do risco em cada uma das categorias selecionadas.

### 2.2.5.2 Modelos multicritério para gerenciamento de risco em gasodutos

Brito & Almeida (2009) propuseram a análise de risco com o auxílio de decisão multicritério em gasodutos de gás natural, baseado em MAUT. Os autores justificam que os acidentes em gasodutos podem produzir um grande conjunto de consequências, que envolvem mortes ou ferimentos humanos mas também perdas financeiras causadas pela interrupção no fornecimento de gás e também danos ambientais causados por incêndios em grandes áreas. Eles afirmam que apesar das

mortes receberem maior atenção, é necessário que as companhias fornecedoras de gás necessitem considerar seus objetivos financeiros e a legislação ambiental vigente podendo haver negligência de consequências ambientais graves, caso essa não seja considerada.

Brito et al. (2009) integraram o modelo explicado acima com a metodologia ELECTRE-TRI, como uma forma de ordenar e priorizar as seções que necessitam maiores recursos para a mitigação de risco.

Dessa forma, os autores propuseram um modelo multidimensional, que considera as três dimensões: humana, ambiental e financeira, de modo a priorizar seções da tubulação de gás natural propondo um ranqueamento dessas seções.

Alencar & Almeida (2010) propuseram um modelo semelhante ao proposto por Brito & Almeida (2009), porém para o transporte em gasoduto de hidrogênio. Foi incorporado o comportamento do decisor no processo de tomada de decisão, considerando três dimensões de risco: humana, ambiental e financeira, permitindo ao decisor definir ações mitigadoras para os riscos, de acordo com prioridades propostas pelo modelo.

Lins & Almeida (2012) propuseram uma variação aos modelos desenvolvidos e apresentados anteriormente, em que passa-se a considerar cinco dimensões de risco, sendo divididas cada uma das dimensões ambiental e humana em duas dimensões deixando o decisor mais consciente do problema. A dimensão humana foi dividida em fatalidades e danos humanos não letais, e a dimensão ambiental foi dividida em área impactada e diversidade afetada. Os autores afirmam que, dessa forma, o processo de elicitação torna-se mais preciso, visto que o decisor toma maior consciência de situações do que quando as dimensões estavam agregadas, quando poderiam passar despercebidas.

Assim, fica clara a importância do presente estudo, uma vez que Decisão Multicritério tem sido utilizada em maior quantidade para a análise de risco, e visto que fica perceptível a necessidade de se avaliar as perdas ocasionadas por acidentes, nesse caso em gasodutos, em diferentes dimensões de risco. Isso porque não pode-se afirmar que somente perdas de vidas são consequências desses acidentes. Além disso, o modelo é de grande importância para mostrar ao decisor quais as seções de toda a extensão do gasoduto estão mais vulneráveis a danos. Sendo assim, nessas seções é necessário mais recursos para mitigação do risco,

não empregando recursos dos mais diversos tipo, como financeiro, de mão-de-obra entre outros, desnecessários em áreas que não estejam tão susceptíveis aos risco.

### **2.3 Síntese do estado da arte e posicionamento deste trabalho**

Modelos de análise de risco vêm sendo desenvolvidos para a área de transporte de gases por gasodutos ao longo dos anos de uma forma geral, em sua maioria considerando como fator principal a quantidade de pessoas atingidas (ocorrendo fatalidade) quando um acidente nessa área ocorre. Esses acidentes podem ser causados por diversas formas, embora o principal fator seja por intervenção de terceiros e corrosão, a partir de duas formas: ruptura ou furo da tubulação (SKLAVOUNOS & RIGAS, 2006). Em outros casos, menos significativos em quantidade de estudos publicados, consideram perdas financeiras decorrentes de acidentes em gasodutos.

No entanto, Brito & Almeida (2009) identificaram a necessidade de investigar em um único modelo perdas referentes a diferentes critérios, de forma que o risco associado ao cenário de transporte de Gás Natural em gasodutos resultasse da influência de três critérios. Dadas as proporções e evidências para a população, um dos critérios estaria associado às pessoas existentes na região circunvizinha do gasoduto, através de quantidade de mortes e ferimentos que poderiam ocorrer. Além desse, as perdas financeiras ocorridas devido a um acidente devem ser levadas em consideração, uma vez que a empresa concessionária do transporte de gás poderá pagar multas por diversos motivos, irá gastar dinheiro para reestabelecer o funcionamento do sistema, além de que perderá volume de gás que será disperso no ar dado a ocorrência do vazamento.

Ademais, percebe-se no mundo uma preocupação muito grande com o meio ambiente e como ele está sendo afetado pelas mudanças que ocorrem no mundo e, por isso, esse critério também foi incluído no modelo. Um acidente pode ser identificado por haver perda devido a queima/explosão com o gás, ocasionando queimada da vegetação e morte de dezenas de espécies de animais, principalmente quando o gasoduto passa por locais com grande concentração de fauna e flora, até mesmo em áreas de preservação ambiental. Para tanto, a utilização de um modelo embasado em Decisão multicritério parece bastante adequado para tal situação.

Além disso, a análise de risco no transporte de gás por gasodutos envolve uma série de dados subjetivos, cuja probabilidade de ocorrência depende de vários fatores, como, por exemplo, o modo de falha que pode ser através de ruptura ou de furo, os possíveis cenários de perigo que podem ser formados. Por conseguinte, o caráter do decisor quanto à propensão, neutralidade e aversão ao risco, também era interessante ser englobada do modelo, e por essas razões Brito & Almeida (2009) utilizaram o método multicritério Teoria da Utilidade Multiatributo como base para desenvolver o modelo apresentado nesse trabalho.

Outros estudos foram feitos por integrantes do CDSID para melhorar e expandir o modelo desenvolvido por esses autores, tais como Brito et al. (2009), utilizando o método ELECTRE para proporcionar um ranking das seções dos gasodutos. Alencar & Almeida (2010), aplicaram o modelo para o gás hidrogênio Lins & Almeida (2012), propuseram a divisão da dimensão humana em duas subdimensões, assim como a dimensão ambiental, utilizando um índice de Margalef para avaliação do impacto ambiental através da quantidade de espécies atingidas.

No entanto, o modelo foi se tornando cada vez mais completo e complexo, no sentido de que muitas variáveis e parâmetros foram sendo adicionados ao mesmo para melhorar o seu desenvolvimento. Porém, nunca havia sido estudada a possibilidade de tornar o modelo mais simples, para facilitar a captura e elicitação dos valores necessários, para as variáveis e parâmetros de entrada do modelo, seja através de dados históricos ou diretamente com o decisor responsável pela tomada de decisão pelo gasoduto.

Dessa forma, foi identificada a possibilidade de um estudo que identificasse a robustez e sensibilidade das variáveis e parâmetros de entrada do modelo. A sensibilidade permite identificar quais variáveis e parâmetros devem ser elicitados de forma mais precisa e cuidadosa, pelo fato de que pequenas alterações podem proporcionar mudança no resultado final que gera uma ordem de priorização das seções do gasoduto para a mitigação e gerenciamento do risco. Enquanto a robustez é um fator impactante para esse trabalho, pois identifica os parâmetros e variáveis de entrada que não causam mudança no resultado final, quando seus valores são modificados.

Pretendia-se que a partir das normas internacionais para o transporte de gás natural apresentadas no capítulo anterior pudesse-se identificar um *insight* para a

simplificação do modelo multidimensional para gerenciamento de risco utilizado nesse trabalho. No entanto, o modelo é mais operacional, enquanto as normas apresentam, em sua maioria, especificações para os gasodutos, mas não relacionadas à análise de risco. Quando apresentam o tópico de análise de risco afirmam que uma análise deve ser feita, mas não apresentam a maneira ou o detalhamento sobre esse assunto, e como essa análise deve ser procedida. Dessa forma, a utilização delas como base para simplificação do modelo ficou impossibilitada, sendo somente uma fonte para o entendimento do funcionamento dos gasodutos.

Nesse sentido, esse trabalho tem a contribuir através da identificação das variáveis e parâmetros que são robustos para que, em um trabalho futuro possa ser realizado um estudo de simplificação do modelo. Como o trabalho de simplificação demanda uma quantidade de tempo muito grande, ficará como uma continuação do estudo iniciado pelas discussões desse trabalho. Dessa forma, mesmo que esse trabalho utilizasse um número extremo de aplicações anteriormente desenvolvidas com a utilização do modelo, não seria possível garantir a validade de se remover uma variável ou parâmetro do modelo, pois cada uma das aplicações possuem características diferenciadas. Porém, é possível identificar por onde essa investigação pode ser inicializada, pois algumas situações são mantidas, além de proporcionar algumas ideias para serem implementadas futuramente.

Dessa forma, é possível identificar as considerações que foram feitas através da utilização da análise de sensibilidade no capítulo quatro desse trabalho, em que os resultados são tratados e analisados. Algumas considerações quanto ao modelo são feitas nesse capítulo, a fim de promover um *insight* para a continuação desse trabalho.

## 2.4 Metodologia Adotada

Inicialmente uma pesquisa bibliográfica foi realizada a fim de agregar conhecimento na área de desenvolvimento do modelo de análise de risco para gasodutos de transporte de gás natural, para elucidar dúvidas e principalmente dar base para o desenvolvimento do estudo.

O fluxograma (Figura 2.4) apresenta o processo utilizado para a análise de sensibilidade desenvolvida nesse trabalho. Sendo assim, a primeira etapa consiste

no conhecimento do modelo multicritério de análise de risco no transporte de Gás Natural, familiarizando-se com as etapas para se chegar ao resultado final, que são apresentadas no item 3.1 desse trabalho. Isso é necessário para que em seguida possa-se entender o funcionamento do Sistema de Apoio à Decisão desenvolvido para o modelo. Esse SAD é característico para esse modelo de decisão, em que de uma forma geral todas as etapas necessárias, inclusive a elicitação da função utilidade multiatributo e das constantes de escala estão inseridos, com o intuito de facilitar a aplicação do modelo e gerar os resultados mais facilmente.

O próximo passo da análise de sensibilidade é a avaliação das variáveis e parâmetros do modelo que podem ser alvo da análise de sensibilidade, pois algumas variáveis estão intrínsecas na execução do cálculo e não é possível fazer variações nos seus valores. Essas etapas descritas até aqui, são pertinentes a avaliação do modelo, não envolvendo ainda sua aplicação em casos reais ou realísticos.

Consequently, faz-se necessário selecionar os casos em que o modelo já foi aplicado para poder realizar a análise de sensibilidade. Para este trabalho foram selecionados quatro casos, que são descritos na seção 3.2 desse trabalho, cada um com diferentes características. Posteriormente, para cada caso, são feitas variações no intervalo de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  em relação aos valores originais em cada um dos parâmetros e variáveis selecionadas anteriormente, o que gera resultados que devem ser analisados conforme apresenta a Figura 2.4. Dessa forma é possível classificar as variáveis e parâmetros como: sensíveis, caso haja mudança na ordenação das seções no resultado final do modelo; ou robusto, quando não ocorre nenhum tipo de alteração no resultado; ou então como mudança no valor da razão das diferenças, pois não é possível afirmar que nesse caso há robustez, nem ocorrendo mudança suficiente para alterar a ordenação das seções.

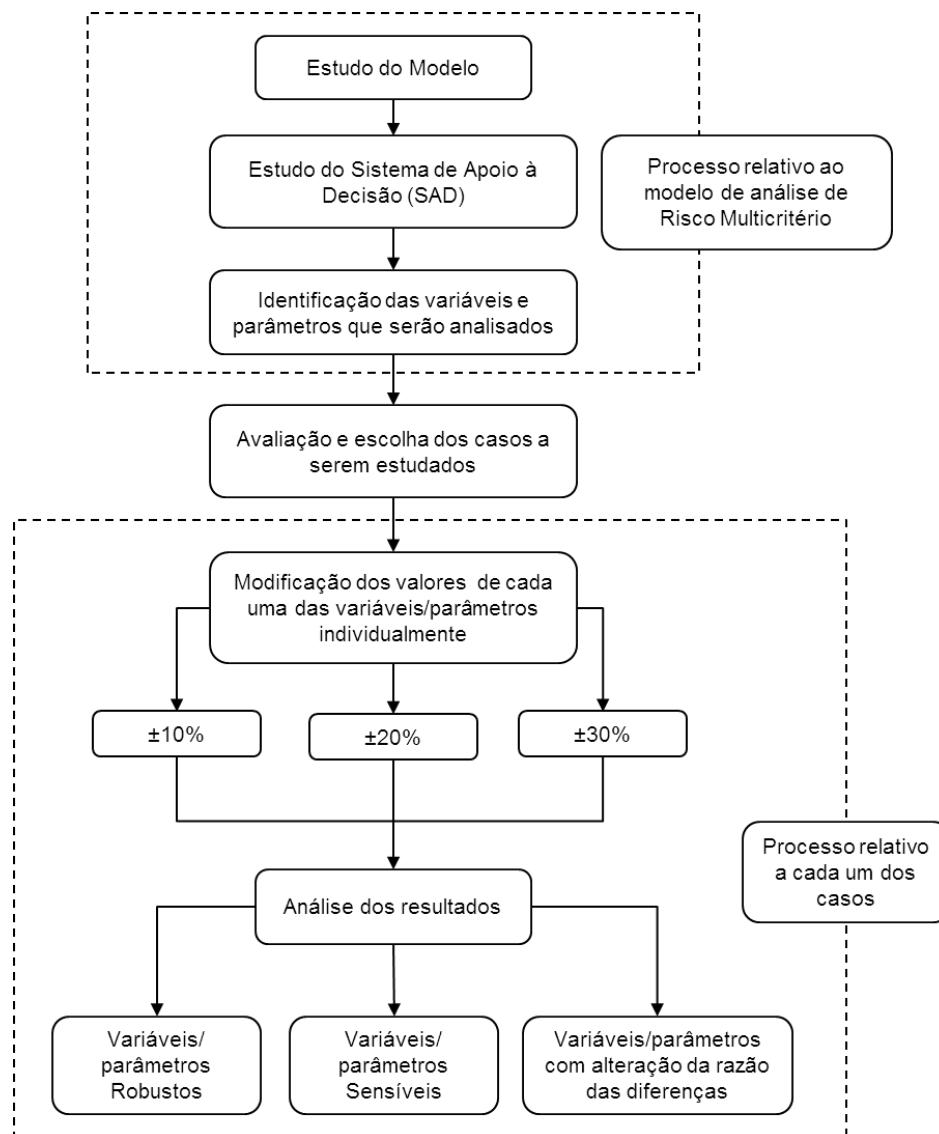


Figura 2.4: Fluxograma do processo de desenvolvimento da análise de sensibilidade

Os resultados e a classificação das variáveis e parâmetros nessas três categorias são apresentados no capítulo 4 desse trabalho juntamente com uma avaliação dos mesmos.

### **3 DESCRIÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE**

O modelo de decisão multicritério apresentado neste trabalho foi desenvolvido pelo CDSID – Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão, que tem como resultado uma ordenação de seções de gasoduto de Gás Natural, afim de ser um mecanismo de apoio de decisão para os decisores em relação a mitigação de riscos multidimensionais e alocação de recursos. Dessa maneira, o presente capítulo pretende apresentar esse modelo através da explicação de suas etapas, apresentando as variáveis e os parâmetros, que serão avaliados na análise de sensibilidade.

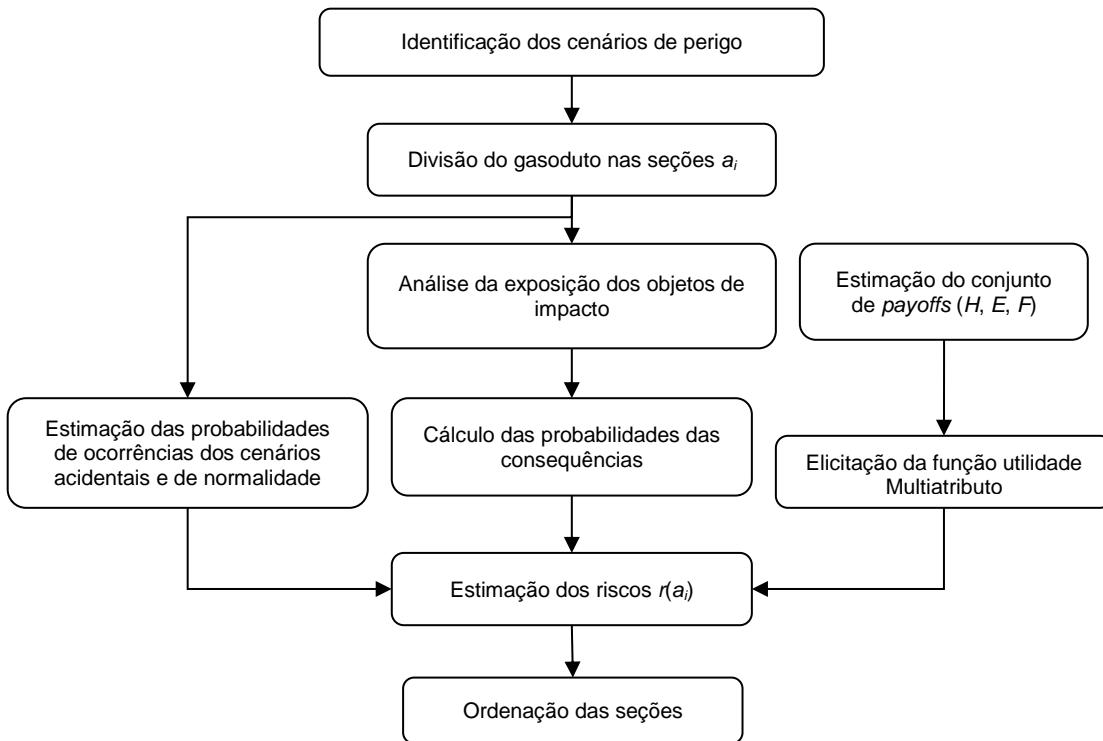
Posteriormente, serão apresentados os casos em que esse modelo já foi anteriormente aplicado (quatro diferentes casos) com descrição de suas informações necessárias para a avaliação da análise de sensibilidade, cujos resultados são apresentados em seguida da descrição.

#### **3.1 Descrição do Modelo**

Neste modelo, considera-se trabalhar com um contexto de problema bem definido em que os objetivos e propósitos com o desenvolvimento desse são conhecidos, em que as dimensões de riscos também são definidas, sendo elas humana, ambiental e financeira. É apresentado ao decisor como resultado do modelo um *insight* para a tomada de decisão quanto ao risco associado ao transporte de Gás Natural, uma vez que o modelo resulta em uma ordenação das seções que compõe a extensão total do gasoduto avaliado.

A proposta desse modelo é a utilização de um único decisor, sendo que, de acordo com Almeida (2013), ele o responsável pela tomada de decisão e possui poder sobre a tomada de decisão em questão. Esse ator do processo de decisão, chamado de *stakeholder*, pode ser apoiado ou até influenciado por outros atores no processo para a tomada de decisão, porém eles não possuem poder sobre a decisão tomada. De acordo com Brito & Almeida (2009), o decisor, que geralmente é o gestor de operação, manutenção ou segurança; pode influenciar na análise de risco no contexto desse modelo através de julgamentos de valores que representam suas preferências e sua percepção, que serão avaliadas e validadas no processo de elicitação da função utilidade.

As etapas para o processo de avaliação dos riscos no transporte de Gás Natural em gasodutos podem ser sumarizadas e observadas na Figura 3.1 que segue, e cada uma delas será explicada posteriormente.



**Figura 3.1: Etapas do modelo de decisão**  
Fonte: Adaptado de Brito & Almeida (2009)

### 3.1.1 Identificação dos cenários de perigo

Essa etapa tem como finalidade identificar quais são os possíveis cenários que serão formados, dado que um acidente no transporte de Gás Natural em gasoduto tenha ocorrido. Esses cenários estão diretamente associados ao modo de falha  $j$  e os cenários de perigo resultantes  $k$ , formando o conjunto de estado da natureza  $\Theta=\{\theta_{jk}\}$ . Os cenários de perigo são apresentados na Figura 3.2, em que os possíveis modos de falhas para um acidente são a ruptura ou então o furo na tubulação.

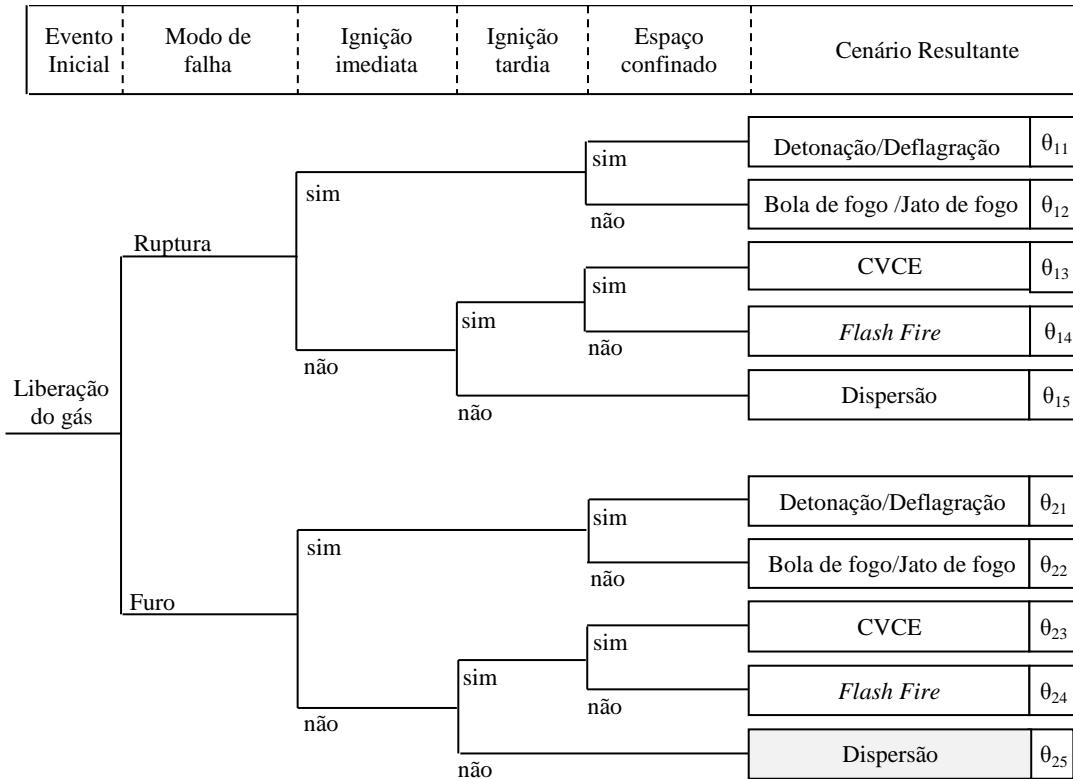


Figura 3.2: Árvore de cenários de perigo

Fonte: Brito &amp; Almeida (2009)

Para o Gás Natural, algumas simplificações dos possíveis cenários de perigo foram realizadas. Como o Gás Natural é menos denso que o ar, esse se espalhará rapidamente pelo ar, não gerando acúmulo próximo a superfície de gás, desprezando o cenário de UVCE (*Unconfined Vapor Cloud Explosion*, ou Explosão de Nuvem de Vapor não Confinado) proposto por Sklavounos & Rigas (2006). Também não é considerado o cenário de acúmulo ou dispersão de gás tóxico, visto que o Gás Natural possui concentração desprezível de gás sulfúrico e de outros gases tóxicos.

### 3.1.2 Divisão do gasoduto em seções

A divisão da extensão do gasoduto em seções tem como finalidade proporcionar uma avaliação mais detalhada do gasoduto, conforme as características do entorno dele. Não existe no modelo um procedimento padrão para o decisor realizar essa divisão, porém ela é realizada através da observação da existência de características semelhantes (como técnicas, fatores econômicos,

sociais, ambientais) no entorno do gasoduto, tornando as seções uniformes tanto quanto possível.

A uniformidade das seções permite ao decisor tomar ações mitigadoras mais condizentes com a realidade de cada uma delas, no entanto, o modelo pode ser aplicado em seções de grandes extensões e que não sejam uniformes. Ao final, um conjunto discreto  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_i\}$  é formado por todas as seções do gasoduto em análise.

### 3.1.3 Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e do cenário de normalidade operacional

É necessário fazer a avaliação da distribuição de probabilidade da ocorrência de cenário acidental para cada um das seções do gasoduto. Cabe ressaltar que devido às características de cada uma delas, essa probabilidade pode ser modificada. Contudo, há bastante dificuldade na obtenção de alguns dados na avaliação de riscos em gasodutos e, dessa forma, a experiência do decisor, ou mesmo de um especialista, pode ser utilizada para avaliar a variável  $\theta$ , e construir uma distribuição de probabilidade chamada de distribuição *a priori*  $\pi(\theta)$  representando o conhecimento a priori do especialista sobre a variável analisada.

O cenário de normalidade operacional ( $\theta_N$ ) é aquele que se espera que sempre ocorra, que é o não acontecimento de um acidente, ou seja, quando o gasoduto está funcionando dentro da normalidade, sem nenhum tipo de vazamento. Como acidentes em gasodutos causados por vazamentos são eventos raros, embora suas consequências sejam de grandes proporções, a probabilidade de que nenhum evento aconteça é muito próxima de 1, assim a utilidade da consequência é também próxima de 1 e a perda -1. Dessa forma, o somatório das perdas resulta em um valor próximo de -1, pois as perdas atreladas a diversos cenários em cada seção do gasoduto são ponderadas por probabilidades muito pequenas de acontecimento, gerando uma pequena contribuição ao somatório do risco total.

### 3.1.4 Análise de exposição dos objetos de impacto

O modelo propõe a avaliação de uma área circular de perigo em torno de cada seção do gasoduto, relativa aos cenários de perigo e os possíveis impactos causados pelo acidente, a fim de facilitar a avaliação das consequências nas

dimensões humana, ambiental e financeira. Essa avaliação permite identificar a exposição dos objetos de impactos presentes nessa área.

Para uma avaliação conservadora dessa área, é utilizada no modelo a zona de perigo mais crítica para cada seção, associada a cada cenário de perigo. Sklavounos & Rigas (2006) definem o cenário de jato de fogo ocasionado por uma ruptura como o limiar para determinação da distância segura em torno do gasoduto. Dessa forma Jo & Ahn (2002) propuseram uma fórmula para o raio máximo de perigo (CDR – *Critical Danger Radius*), que é assumida pelo modelo, relacionando a pressão de operação, o diâmetro do duto e a distância do vazamento até a estação de compressão, apresentada na Equação 3.1.

$$CDR \cong 1,512 \cdot \frac{P_0^{1/2} \cdot d^{5/4}}{L_0^{1/4}} \quad (3.1)$$

onde CDR corresponde à distância máxima de perigo (m), adotando-se um fluxo máximo de calor de  $15\text{ kW/m}^2$ , para o qual a exposição de até 30 segundos tem aproximadamente uma probabilidade de 1% de provocar fatalidade;  $P_0$  corresponde a um valor de pressão de operação ( $\text{N/m}^2$ ) na estação de compressão a montante a seção;  $d$  é o diâmetro do duto (m); e  $L_0$  é a extensão do gasoduto a partir da estação de compressão a montante (m).

### 3.1.5 Estimação do conjunto de payoffs (H, E, F)

Essa etapa tem como finalidade definir as consequências para cada uma das dimensões consideradas no modelo, humana (H), ambiental (E) e financeira (F), adotando a combinação de valores mais pessimistas em cada uma delas (BRITO & ALMEIDA, 2009).

A consequência humana é muito subjetiva e dificilmente pode ser descrita em termos monetários. Nesse modelo são considerados como consequência dessa dimensão o número de pessoas atingidas fisicamente devido a ocorrência de um cenário acidental no gasoduto ocasionado ao menos queimaduras de segundo grau, não ficando atrelado somente a fatalidades, como na maioria dos modelos análise de risco em gasodutos, pois considera-se que devem ser evitados qualquer tipo de risco para a população.

A consequência ambiental (E) considera qualquer tipo de dano ocorrido ao meio ambiente devido ao acontecimento de um cenário acidental no transporte do gás natural. Dessa forma, o modelo assume como *payoff* dessa dimensão a área em metros quadrados de vegetação destruída com o acidente.

Relacionado ao impacto financeiro (F) está o desembolso financeiro que a empresa terá devido ao cenário acidental. Esse desembolso caracteriza-se pelo somatório dos gastos com faturamento cessante, multas contratuais por interrupções no fornecimento, multas e demais resarcimentos por ocasionar danos à pessoas, ao meio ambiente ou às organizações e empresas, além dos gastos decorrentes da realização de manutenção da seção acidentada e volta à normalidade operacional.

### 3.1.6 Elicitação da função utilidade Multiatributo

O conceito mais difundido da análise de risco da probabilidade de acontecimento de acidente multiplicada pela sua consequência não reflete as preferências do decisor. Dessa maneira, Brito & Almeida (2009) afirmam que, através da utilização de uma função utilidade sobre as consequências, as preferências do decisor em relação ao risco podem ser incluídas no modelo, relacionadas ao risco de perdas por acidentes no transporte de gás natural via gasoduto.

Considera-se  $U(h,e,f)$  uma função utilidade aditiva, tipicamente encontrada inclusive no contexto de problemas de manutenção. A propriedade de independência aditiva de  $U(h,e,f)$  implicam a existência de independência preferencial entre os conjuntos de *payoffs*  $H$ ,  $E$ , e  $F$ . Dessa forma, segue que:

$$U(h, e, f) = k_h U(h) + k_e U(e) + k_f U(f) \quad (3.2)$$

em que  $U(h)$ ,  $U(e)$  e  $U(f)$  são as utilidades unidimensionais para as dimensões de risco abordadas e as constantes “ $k$ ” são constantes de escala estimadas a partir de um procedimento de elicitação baseado na comparação entre loterias de *payoffs*, e  $k_h + k_e + k_f$ . Tanto as curvas de preferências quanto a elicitação das constantes de escala possuem um procedimento para serem calculadas no Sistema de Apoio à Decisão (SAD) desenvolvido para esse modelo.

### 3.1.7 Cálculo das probabilidades de consequências

Neste modelo considera-se que as consequências em cada uma das dimensões não possuem correlação estatística, e que ocorrerão de forma independente e aleatórias, de forma que as probabilidade das consequências humana  $P(p_h|\theta_{jk}, a_i)$ , ambiental  $P(p_e|\theta_{jk}, a_i)$  e financeira  $P(p_f|\theta_{jk}, a_i)$  podem ser calculadas separadamente. Essas probabilidades podem ser avaliadas através do cálculo das funções densidade de probabilidade para as dimensões ambientais e financeira; e para a dimensão humana, por se tratar de dados discretos, se utiliza uma função de probabilidade.

Em ambas as dimensões de risco, os mecanismos probabilísticos das consequências envolvem o fluxo de calor, magnitude das chamas e possíveis explosões, eficiência da segurança da empresa de gás e as características do ambiente envolto ao duto, todas elas dependentes das características da seção acidentada. Em seguida serão apresentados os procedimentos para o cálculo das probabilidades em cada uma das dimensões de risco.

#### 3.1.7.1 Estimação da função consequência do risco humano

As variáveis e parâmetros presentes no cálculo das consequências atreladas a dimensão humana possuem dependência uma das outras. Essa dependência pode ser observada na Figura 3.3, em que a partir das variáveis contidas na função consequência para o risco humano, todas as variáveis dependentes são demonstradas.

A função consequência para o risco humano é expressa pela Equação 3.3, em que  $p_h$  é o número de pessoas com ferimentos, queimaduras de primeiro ou segundo grau;  $n_{a_i}$  corresponde ao número máximo estimado de pessoas a serem atingidas na zona de perigo associado a uma dada seção e  $\delta$  é a probabilidade de uma pessoa na zona de perigo ser atingida e sofrer danos.

$$P(p_h|\theta_{jk}, a_i) = \binom{n_{a_i}}{p_h} \cdot \delta^{p_h} \cdot (1 - \delta)^{n_{a_i} - p_h} \quad (3.3)$$

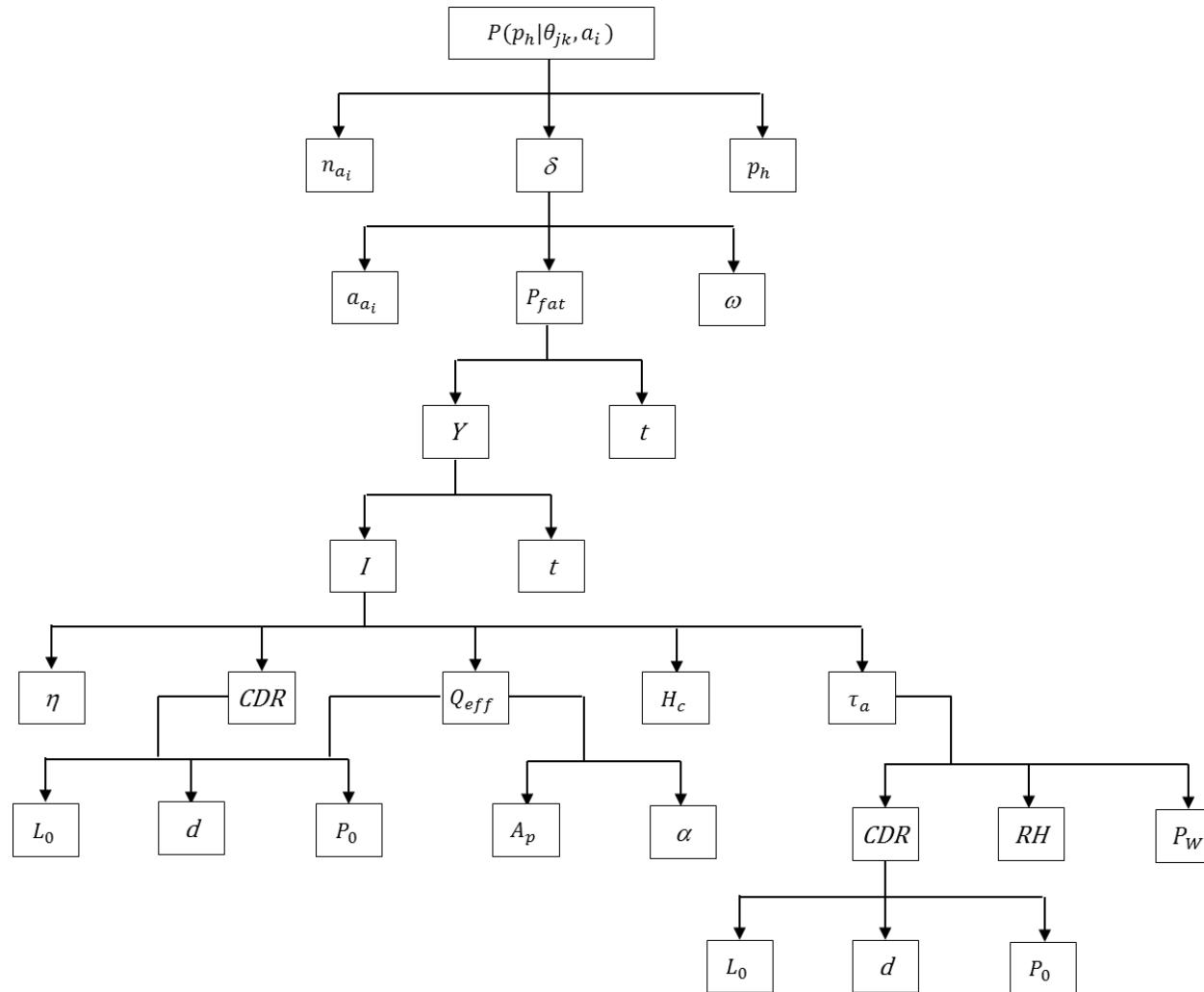


Figura 3.3: Dependência das variáveis e parâmetros para o cálculo da função consequência humana  
Fonte: Adaptado Alencar & Almeida, 2012

Em relação à probabilidade de uma pessoa ser atingida pela radiação térmica decorrente de algum dos cenários acidentais e apresentar os danos físicos, é considerado pelo modelo constante, porém depende de  $\alpha_{a_i}$ ,  $\omega$  e de  $P_{fat}$ , conforme apresentado na Equação 3.4:

$$\delta = \alpha_{a_i} \cdot (\omega \cdot P_{fat} + P_{fat}) \quad (3.4)$$

sendo que  $\alpha_{a_i}$  corresponde a uma estimativa da probabilidade de, havendo um cenário acidental uma pessoa, dentro da zona de perigo associada a uma seção do gasoduto em que houve o acidente, ser atingida pela radiação térmica emitida neste cenário.

$\omega$  é um parâmetro utilizado para associar as pessoas que sofrem ferimentos e as pessoas que sofrem fatalidade, e representa quantas vezes mais provável é o acontecimento de uma queimadura de no mínimo segundo grau do que uma fatalidade, com a probabilidade de ocorrer uma fatalidade ( $P_{fat}$ ) e, portanto, esse valor deve ser menor ou igual a um, havendo no SAD utilizado nesse modelo uma restrição que garante esse acontecimento, ou seja,

$$\omega \cdot P_{fat} + P_{fat} \leq 1 \quad (3.5)$$

Como pode ser visto na Figura 3.3,  $P_{fat}$  dependente da variável Probit Y e do parâmetro tempo  $t$ . A relação entre eles é apresentada na Equação 3.6 que foi proposta por Jo & Ahn (2005), que relaciona o nível de radiação térmica à probabilidade de ocorrência de um dano físico ao indivíduo. A hipótese assumida no modelo é que a resposta de cada indivíduo em relação a radiação é caracterizada por uma distribuição gaussiana, muito embora cada indivíduo possa reagir de uma forma diferenciada.

$$P_{fat} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.6)$$

em que  $t$  é o tempo de exposição de uma pessoa a um nível de radiação térmica (s) e Y é considerada como uma variável aleatória gaussiana de média 5 e variância 1.

Tsao & Perry (1979) definem uma expressão conservadora para o cálculo da variável  $Y$  e da probabilidade de uma pessoa sofrer uma fatalidade devido à exposição a uma carga de radiação térmica utilizada, conforme é apresentada na Equação (3.7) que segue. Dessa forma, como apresentado na Figura 3.3, é possível observar que a Probit está relacionada com o fluxo de radiação de calor ( $I$  dado em  $J/m^2.s$ ) e o tempo de exposição  $t$  de uma pessoa a um determinado nível de radiação térmica (dado em segundos).

$$Y = -14,9 + 2,56 \ln \left( t \cdot \frac{I^{1/3}}{10^4} \right) \quad (3.7)$$

O fluxo de radiação de calor é uma variável que é utilizada para o cálculo da probabilidade das consequências nas três dimensões, e é calculado pela Equação 3.8 proposta por Jo & Crowl (2008).

$$I = \frac{\eta \cdot \tau_a \cdot Q_{eff} \cdot H_c}{4 \cdot \pi \cdot (CDR)^2} \quad (3.8)$$

É possível identificar, tanto na equação quanto na Figura 3.3 que representa a dependência entre as variáveis, em que o fluxo de radiação de calor é dependente de várias outras variáveis e parâmetros, sendo que  $\eta$  é a razão do calor irradiado pelo total de calor liberado pelo fogo (para o gás natural utiliza-se como um valor constante igual a 0,2, valor estimado em laboratório para o metano);  $\tau_a$  é a transmissividade atmosférica,  $Q_{eff}$  é taxa efetiva de vazamento de gás ( $kg/s$ ),  $H_c$  é o calor de combustão do gás natural (admitido como  $5,002 \times 10^7 \text{ J/kg}$ );  $CDR$  raio máximo de perigo (dado em metros e obtido através da Equação 3.1)

A transmissividade atmosférica pode ter valor constante igual a 1, no caso do modelo é calculada pela equação proposta por Jo & Crowl (2008) apresentada na Equação (3.9):

$$\tau_a = 2,02 \cdot [P_w \cdot (RH) \cdot (CDR)]^{-0,09} \quad (3.9)$$

A taxa efetiva de vazamento de gás ( $Q_{eff}$ ) é obtida através da Equação 3.10 (Jo & Crowl, 2008):

$$Q_{eff} = \begin{cases} \frac{1,783 \times 10^{-3} \cdot A_p \cdot \alpha \cdot P_0}{\sqrt{1 + 4,196 \times 10^{-3} \cdot \alpha^2 \cdot \frac{L_0}{d}}} , & \alpha^2 \cdot \frac{L_0}{d} \leq 2410 \\ 5,349 \times 10^{-4} \cdot A_p \cdot \alpha \cdot P_0 , & \alpha^2 \cdot \frac{L_0}{d} > 2410 \end{cases} \quad (3.10)$$

onde  $A_p$  é a área transversal do duto ( $\text{m}^2$ ),  $\alpha$  é a proporção do tamanho do furo (adimensional) obtido pela razão da área efetiva do furo pela área transversal do duto,  $P_0$  é a pressão de operação ( $\text{N/m}^2$ ),  $L_0$  é o comprimento do duto desde a estação de fornecimento do gás até o ponto onde o vazamento ocorre (m) e,  $d$  é o diâmetro do gasoduto (m).

Como visto na Figura 3.3, o raio máximo de perigo (CDR) está presente em várias das equações e, portanto, é uma variável de grande importância dentro do modelo. E, por conseguinte, os parâmetros que são utilizadas para o seu cálculo também são sujeitos a variações nos seus valores e podem alterar os resultados.

### 3.1.7.2 Estimação da função consequência do risco ambiental

Para o cálculo das consequências do risco ambiental, o modelo considera o tamanho da área queimada devido a ocorrência de um cenário acidental em uma área de perigo do gasoduto. Dessa forma, a função consequência apresentada na Equação 3.11 possui várias variáveis e parâmetros, sendo que a dependência entre eles é apresentada na Figura 3.4, em que é possível observar todas as variáveis/parâmetros para esse cálculo, além da dependência entre elas. Assim, a função consequência para o risco ambiental depende da área queimada ( $p_a$ ), parâmetro que está em função do cenário acidental, da seção, e da estrutura da empresa, que corresponde ao inverso do tempo médio para o apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk},a_i}$ ), área de vegetação presente na zona de perigo associado à seção ( $S_{a_i}$ ), fluxo de radiação de calor ( $I$ ), e uma constante associada ao cenário e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ ).

$$f(p_e | \theta_{jk}, a_i) = -\frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i}} \left[ \frac{\left(1 - \frac{p_a}{s_{a_i}}\right)^{\frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \times I}}}{p_a - s_{a_i}} \right] \quad (3.11)$$

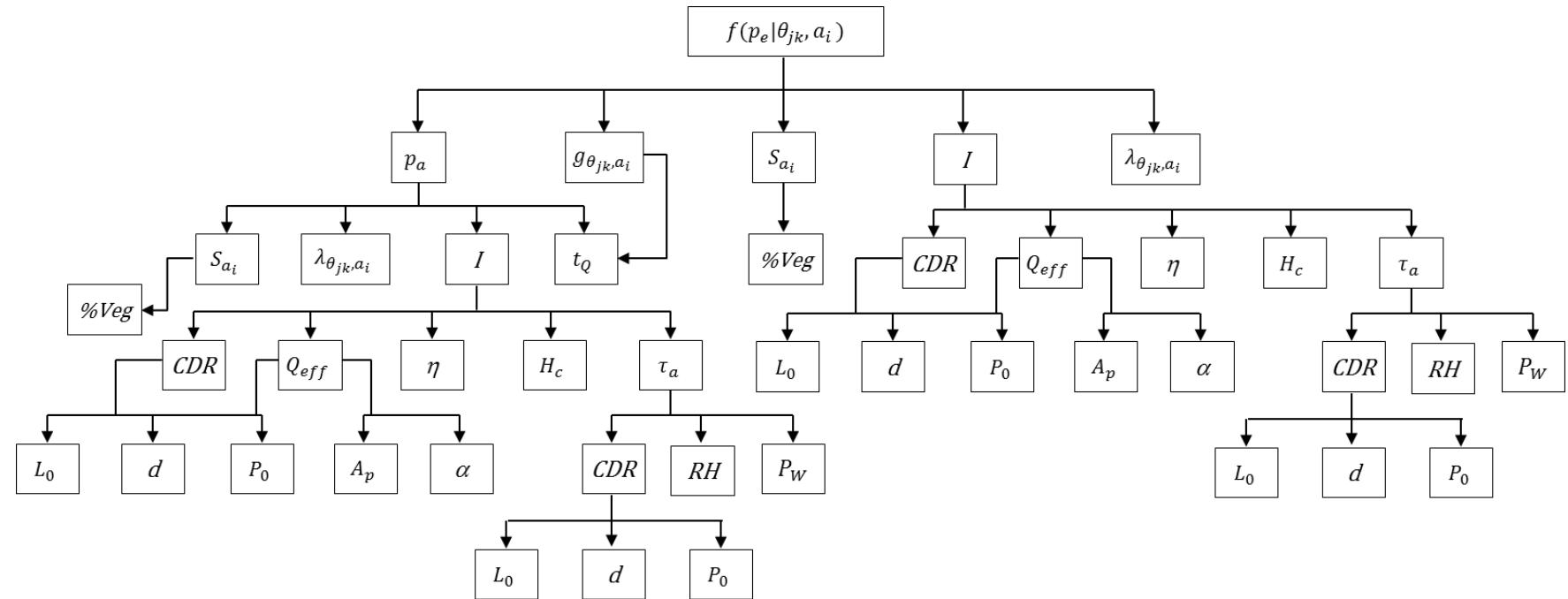


Figura 3.4: Dependência das variáveis e parâmetros para o cálculo da função consequência ambiental

Fonte: Adaptado de Alencar & Almeida, 2012

A área queimada ( $p_a$ ) é calculada a partir da quantidade de vegetação presente na zona de perigo associado à seção ( $S_{a_i}$  dada em  $m^2$ );  $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$  (constante associada ao cenário e a seção em  $m^2/J$ );  $I$  fluxo de radiação de calor  $J/m^2.s$ ); e  $t_Q$  (tempo até que as chamas decorrentes da ignição do gás e da queima de material combustível sejam apagadas em segundos (s)), relacionados através da Equação 3.12.

$$p_a = S_{a_i} \cdot [1 - \exp(-\lambda_{\theta_{jk},a_i} \times I \times t_Q)] \quad (3.12)$$

$S_{a_i}$ , no Sistema de Apoio a Decisão utilizado para processar o modelo, depende de uma parâmetro denominado como porcentagem de vegetação presente na área de perigo (%Veg), que relaciona essa porcentagem com a área de perigo em cada uma das seções do gasoduto.

Para se estimar a função consequência dessa dimensão de risco, o modelo assume que o gasoduto apresenta uma vazão operacional  $Q$  estacionária de gás natural. Além disso, considera-se que cada seção é delimitada por válvulas, que dada a ocorrência de um acidente, essas fecham-se automaticamente e todo o gás contido em uma seção isolada da tubulação é liberado para a atmosfera.

O tempo até as chamas serem apagadas é uma variável aleatória em que a distribuição de probabilidade possui parâmetros que são em função do cenário e seção em estudo e da estrutura organizacional da companhia operadora do gasoduto. Esse tempo já leva em consideração o tempo de interrupção automático da válvula a montante que é de 10 segundos. A função densidade de probabilidade que representa esta variável ( $t_Q$ ) é expressa pela Equação 3.13, em que a distribuição de probabilidade é semelhante a mantinabilidade de sistemas.

$$f(t_Q) = g_{\theta_{jk},a_i} e^{-g_{\theta_{jk},a_i} \cdot t_Q} \quad (3.13)$$

em que  $g_{\theta_{jk},a_i}$  tem relação com o cenário accidental, a seção, e a estrutura da empresa, sendo que corresponde ao inverso do tempo médio para o apagamento das chamas ( $1/t_Q$ ). Tal parâmetro é ajustado de forma que o especialista escolhe

por meio dos parâmetros da distribuição Weibull (os parâmetros de forma e escala), que melhor se adéquem a empresa.

É possível identificar na Figura 3.4 que o fluxo de radiação de calor é uma variável utilizada para calcular a função densidade de probabilidade para o risco ambiental. Dessa forma, o cálculo da consequência nessa dimensão de risco torna-se dependente das variáveis que estão relacionadas a esse fluxo, como já demonstrado no item anterior do trabalho. Para maior detalhamento pode-se observar a Figura 3.4, que detalha todas as dependências entre as variáveis/parâmetros para o cálculo.

### 3.1.7.3 Estimação da função consequência do risco financeiro

Uma grande quantidade de variáveis e parâmetros são necessários para o cálculo da função densidade de probabilidade financeira, conforme pode ser identificado na Figura 3.5. Isso ocorre porque as perdas financeiras estão associadas a três tipos de desembolsos: faturamento cessante ( $F(t_Q)$ ); devido a danos, multas e indenizações ( $M(t_Q)$ ); e por interrupção no fornecimento de gás ( $Wt_Q$ )); sendo que a soma dessas três perdas é representada por  $p_f$ . A função densidade de probabilidade que representa essa dimensão de risco é dada pela Equação 3.14, em que  $g_{\theta_{jk}, a_i}$  representa o inverso do tempo para o apagamento das chamas.

$$f(p_f | \theta_{jk}, a_i) = \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\xi_i} \exp\left(-g_{\theta_{jk}, a_i} \times \frac{p_f - \varphi_i}{\xi_i}\right) \quad (3.14)$$

sendo que

$$\xi_i = (w_{a_i} \times (1 + z_i)) + (\nu \times Q \times z_i) + (\beta \times I \times A_{a_i}) \quad (3.15)$$

$$\varphi_i = (\nu \times L_{a_i} \times \frac{\pi \cdot d^2}{4} \times z_i) + (\nu \times R \times t_i) \quad (3.16)$$

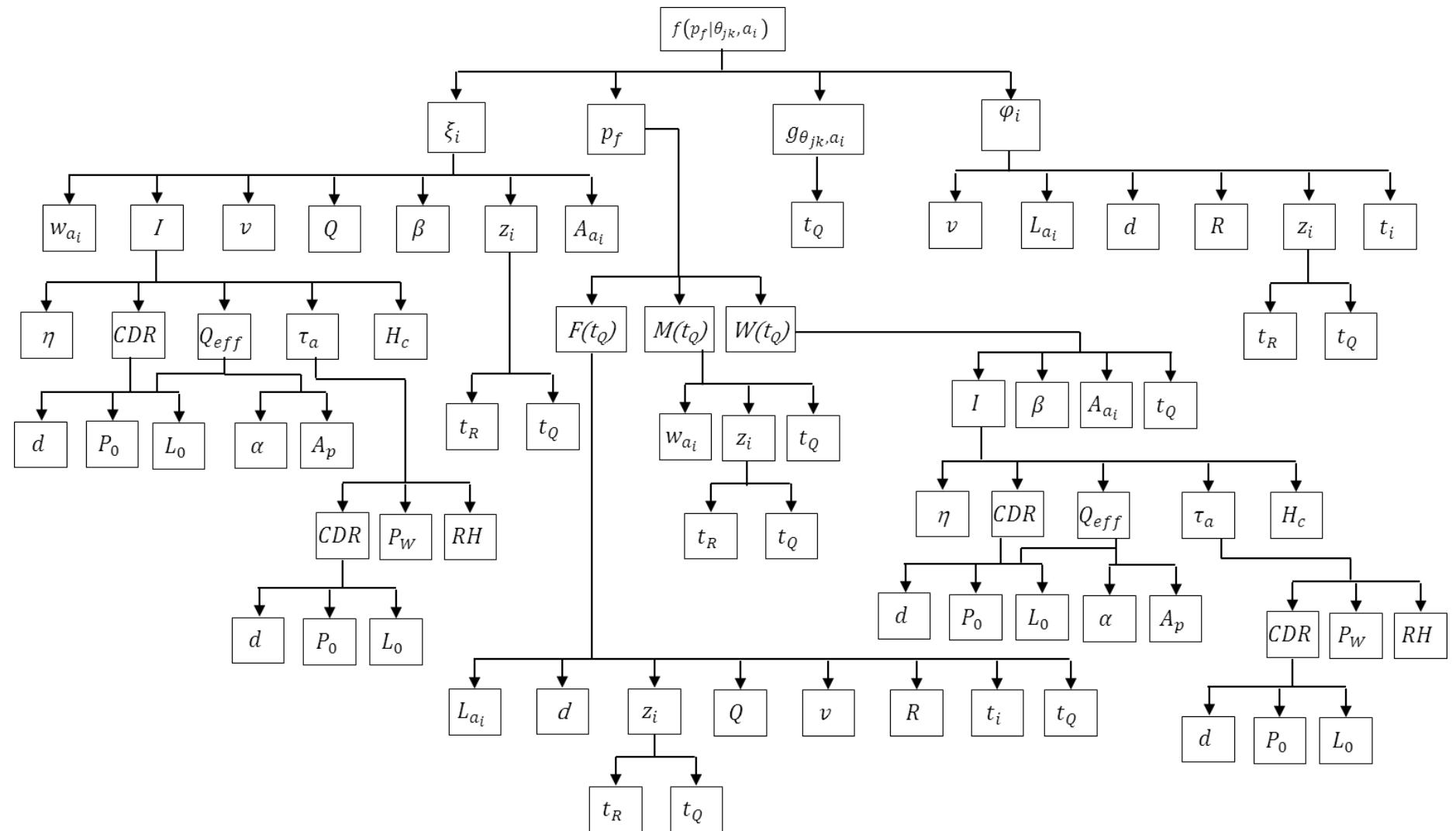


Figura 3.5: Dependência das variáveis e parâmetros para o cálculo da função consequência financeira  
Fonte: Adaptado de Alencar & Almeida, 2012

O faturamento cessante depende de oito parâmetros diferentes, como pode ser constatado na Figura 3.5. Dentre eles,  $v$  é um valor médio de venda do gás ( $R\$/m^3$ );  $R$  é a taxa de liberação de gás a partir do furo ou ruptura ( $m^3/s$ );  $t_i$  é o tempo de interrupção do fluxo pelas válvulas, assumido como 10 segundos;  $L_{a_i}$  é o comprimento da seção em estudo (m);  $d$  é o diâmetro da seção de gasoduto em análise (m);  $Q$  é a vazão regular do gás no gasoduto ( $m^3/s$ );  $t_Q$  é o tempo até que as chamas decorrentes da ignição do gás e da queima de material combustível sejam apagadas (s); e  $z_i$  é a constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  (e esta constante de proporcionalidade pode ser assumida para cada seção de gasoduto e cenário acidental em estudo), sendo que  $t_R$  é  $z_i$  vezes maior que  $t_Q$ . O relacionamento entre elas é calculado pela Equação 3.17:

$$F(t_Q) = (v \times R \times t_i) + \left( v \times L_{a_i} \times \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) + (v \times Q \times z_i \times t_Q) \quad (3.17)$$

Nessa equação, o termo  $(v \times R \times t_i)$  refere-se a perda devido a quantidade de gás que foi liberado, o termo  $\left( v \times L_{a_i} \times \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)$  refere-se a perdas devido ao fato de que o gás que está no duto deverá ser liberado antes do restabelecimento do fluxo normal, e o termo  $(v \times Q \times z_i \times t_Q)$  refere-se a perda devido a demora para restabelecer o funcionamento normal.

Em contrapartida, desembolso devido ao resarcimento pela interrupção do fornecimento de gás é dependente de três parâmetros diferentes:  $w_{a_i}$  é uma estimativa do valor de produção em  $R\$/s$  das empresas a jusante da seção  $a_i$  que terão sua produção afetada pela falta do gás,  $z_i$  e  $t_Q$ . A relação entre esses parâmetros é expressa pela Equação 3.18.

$$M(t_Q) = w_{a_i} \times (1 + z_i) \times t_Q \quad (3.18)$$

Por fim, a perda associada à danos a propriedades, multas e indenização por danos físicos ( $W(t_Q)$ ) são proporcionais a quantidade de energia liberada sobre a zona de perigo. Dessa forma, as variáveis/parâmetros utilizados para esse cálculo são:  $\beta$  que é uma constante de proporcionalidade decorrente de danos às propriedades,

multas e indenizações por danos físicos, devido à energia liberada pelo cenário acidental (R\$/J);  $I$  é o fluxo de radiação de calor ( $J/m^2 \cdot s$ );  $A_{a_i}$  é a área da zona de perigo relacionado a seção  $a_i$  ( $m^2$ ); e  $t_Q$  é o tempo até que as chamas decorrentes da ignição do gás e da queima de material combustível sejam apagadas (s). Esses parâmetro estão relacionados através da multiplicação entre eles, conforme apresentado na Equação 3.19.

$$W(t_Q) = \beta \times I \times A_{a_i} \times t_Q \quad (3.19)$$

### 3.1.8 Estimação dos riscos

A estimação dos risco é realizada através da soma das perdas associadas a cada cenário e seções, nas três dimensões abordadas, multiplicada pelas probabilidades dos cenários acidentais e adicionado a perda associada a um cenário  $\theta_N$  de normalidade, conforme Equação 3.20.

$$r(a_i) = \sum_j \sum_k L(\theta_{jk}, a_i) \pi_i(\theta_{jk}) + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \quad (3.20)$$

Nas três dimensões de risco, a perda associada ao cenário de normalidade  $\theta_N$  é igual a -1. Dessa forma, o somatório  $\sum_j \sum_k \pi_i(\theta_{jk})$  não é igual a 1, mas sim  $1 - \pi_i(\theta_N)$ , sendo que  $\pi_i$  é a probabilidade de ocorrência do cenário. Dessa forma, a perda ( $p$ ) pode ser expressa em termos de utilidade e suas consequências, conforme Equação 3.21:

$$L(\theta_{jk}, a_i) = u(P(p|\theta_{jk}, a_i)) = - \int_{p \in P} P(p|\theta_{jk}, a_i) u(p) dp \quad (3.21)$$

Em caso de utilização de dados discretos, a integral pode ser substituída por um somatório, como no caso da dimensão humana.

Dessa maneira, devido às propriedades de independência aditiva da função utilidade multiatributo e da independência em probabilidade das distribuições de probabilidades sobre as consequências, o risco  $r(a)$  é calculado conforme a Equação 3.22:

$$r(a) = \left\{ \sum_j \sum_k \left\{ - \begin{bmatrix} + \int_h f(h|\theta_{jk}, a_i) k_h u(h) dh \\ + \int_e f(e|\theta_{jk}, a_i) k_e u(e) de \\ + \int_f f(f|\theta_{jk}, a_i) k_f u(f) df \end{bmatrix} \right\} \cdot \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \quad (3.22)$$

### 3.1.9 Ordenação das seções do gasoduto sob uma hierarquia de riscos

Ao final, as seções de gasoduto podem ser ordenados de forma descendente de tal forma a se obter um *ranking* das seções analisadas. A forma utilizada para avaliar esse ranking é através da obtenção da razão das diferenças (Equação 3.23), que demonstram quantas vezes mais uma seção incrementa o risco em relação a outra seção (ALENCAR & ALMEIDA, 2010).

$$RD(z) = \frac{r_b(a_i) - r_{b+1}(a_j)}{r_{b+1}(a_j) - r_{b+2}(a_k)} \quad (3.23)$$

onde  $b$  representa a posição no *ranking* da seção e  $r_b(a_i)$  representa o valor do risco associado à seção.

Dessa forma, espera-se que decisões mais acertadas quanto a mitigação do risco e utilização de recursos para tanto sejam mais eficientes, levando em consideração o ranking produzido pelo modelo, uma vez que esse prioriza seções mais críticas, de acordo com as preferências incorporadas no modelo do decisor.

## 3.2 Descrição dos casos estudados e da análise de sensibilidade

Primeiramente, nesse item serão apresentados os dados utilizados como base para o estudo da análise de sensibilidade. Foram analisados quatro diferentes casos, cujos dados que caracterizam cada um deles serão apresentados em seguida. Em cada um dos itens também serão apresentados os resultados para a análise de sensibilidade para cada um deles, sendo que uma discussão sobre esses resultados será apresentada no capítulo posterior.

Considera-se que em todos os casos a identificação dos cenários de perigo ( $\theta_{jk}$ ) foi realizada da forma apresentada no item 3.1.1, sendo que os cenários de perigo identificados são os constantes na Figura 3.2, que representa a árvore de eventos para o transporte de gás natural por gasodutos assumida por esse modelo,

sendo desconsiderado o cenário *fireball* causado por ruptura e por furo. Dessa forma, para cada um dos casos, obteve-se um total de dez cenários de perigo.

### 3.2.1 Aplicação 1: predominância de área residencial

Essa aplicação considera um gasoduto para o transporte de gás natural, baseado no artigo de Krym et al. (2012), que possui uma extensão de 26.680m passando por áreas com diferentes características. Foram consideradas informações quanto a densidade populacional, característica do solo, tipo de ocupação da área para subdividi-la em oito seções, de forma a homogeneizar cada uma delas para facilitar e validar a avaliação dos resultados, como indica a segunda fase desse modelo.

Essa divisão pode ser observada na Figura 3.6, em que a primeira seção (S1) é caracterizada por haver uma área comercial, ou seja, presença de várias pessoas circulando e muitas construções civis; a seção 2 (S2) é uma área residencial composta por várias famílias; seção 3 (S3) é um distrito industrial, podendo haver elementos que agucem uma explosão no caso de acidentes no gasoduto. Na seção 4 (S4) pode-se observar a existência de um distrito industrial e também de área comercial; a seção 5 (S5) é uma área composta pelo comércio e por residências; seção 6 (S6) é uma área de preservação ambiental, não havendo pouca presença de seres humanos; a área 7 (S7) possui características residencial e ambiental e por fim a seção 8 (S8) que é uma área destinada a moradia de seres humanos.

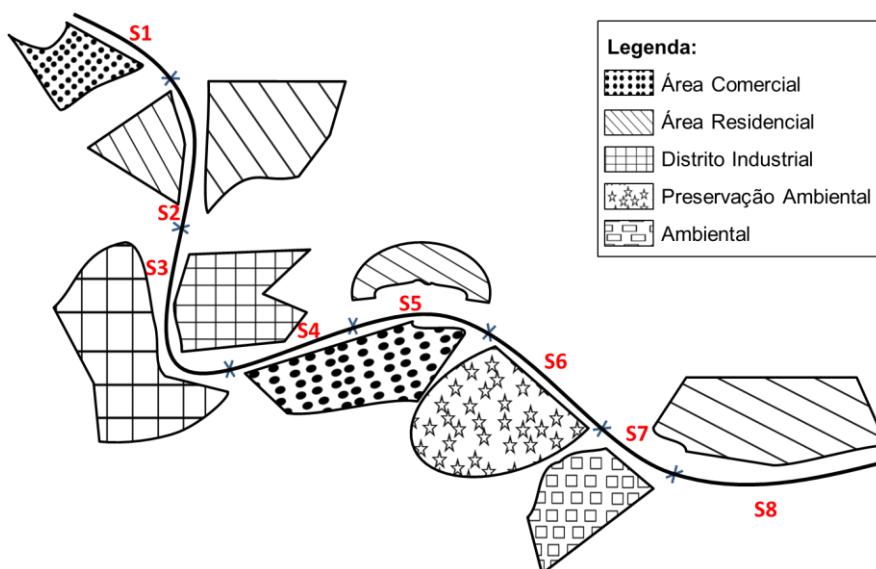


Figura 3.6: Representação visual do gasoduto da Aplicação 1.

Quando da avaliação da probabilidade de ocorrência de cenários acidentais, não se tem quantidade suficiente de dados estatísticos para fazer um levantamento e avaliação dessa probabilidade. Então leva-se em consideração a experiência de especialistas para a elicitação dessas probabilidades e também dados presente na literatura para basear a elaboração dessas probabilidades, uma vez que fatores de correção foram empregados para tornar os dados compatíveis com a realidade do cenário em que se encontra o gasoduto em estudo.

Dessa forma, na atribuição de probabilidades para a ocorrência de cada um dos cenários de perigos para todas as seções desse caso, os especialistas obtiveram as probabilidades  $\pi_i(\theta_{jk})$ , sendo que os valores podem ser encontrados nas Tabelas A1.1 e A1.2 do Anexo 1, que também apresentam a probabilidade para o cenário de normalidade ( $\pi_i(\theta_N)$ ).

Devido a divisão do gasoduto em seções, cada uma delas possui um tamanho diferenciado ( $L_i$ ), assim como a distância para a estação de compressão ( $L_0$ ). No entanto, o diâmetro ( $d$ ) permanece o mesmo em todas as seções mantendo um valor de 0,2032 m, assim como a pressão de operação ( $P_0$ ) mantém-se constante igual a 35 Kgf/cm<sup>2</sup>. Desta forma, foi possível calcular o raio máximo de perigo ( $CDR$ ) em cada uma das seções do gasoduto. Esse cálculo é realizado pela Equação 3.1 proposta por Jo & Ahn (2002) para uma avaliação conservadora da área afetada com o possível acidente. Ressalta-se que todos os cálculos aqui demonstrados foram realizados com a ajuda do Sistema de Apoio à Decisão (SAD) desenvolvido pelo grupo CDSID, e todos os dados mencionados encontram-se apresentados na Tabela A1.3 do Anexo 1.

A próxima etapa do modelo é a avaliação do conjunto de *payoff*, para avaliar as consequências de cada uma das dimensões de risco, assumindo os fatores mais pessimistas em cada uma delas. Desta forma para a dimensão humana ficou estabelecido em 25 pessoas, provenientes do maior número de pessoas dentro da zona de perigo que é da seção 2 (caracterizada pela existência de residências). Para a consequência associada à dimensão ambiental máxima área a ser afetada ficou estabelecida em 412,096 m<sup>2</sup>, devido a porcentagem de vegetação presente na área crítica, neste caso referente a seção 6 (uma área de preservação ambiental) que possui 0,07% de vegetação. E, por fim, o *payoff* da dimensão financeira ficou estabelecido em R\$ 8.200.000,00.

Para o procedimento da elicitação da função utilidade multiatributo, foi de suma importância a utilização do SAD, uma vez que este é um processo interativo entre o analista e o decisor e que demanda uma série de etapas para se obter ao fim a função utilidade. Desta maneira observou-se que o decisor possui características de aversão ao risco quando se trata das dimensões humana e ambiental e propenso ao risco quando trata-se da dimensão financeira. Além disso, as constantes de escala para cada uma das dimensões humana, financeira e ambiental ficaram estabelecidas em  $k_h=0,464232$ ,  $k_e=0,202768$  e  $k_f=0,333$ , respectivamente.

Para a estimativa das funções consequência, uma série de dados são necessários para cada uma das dimensões de risco, sendo que alguns são utilizados em somente uma dimensão, enquanto outros são usados em pelo menos duas delas.

O fluxo de radiação de calor ( $I$ ) é um importante dado para a avaliação da função consequência das três dimensões de risco, sendo que seus valores para a ruptura e para furo são apresentadas na Tabela A1.4 do Anexo 1. A proporção do tamanho do furo ( $\alpha$ ), assumida foi assumida como 0,181453 para os casos de ruptura e 0,000363 para os casos de furo, valores esses baseados em estudos anteriores da área. O valor assumido para a umidade relativa ( $RH$ ) é o mesmo para todas as seções, igual a 65%; a pressão de vapor de água saturada ( $P_w$ ), é assumida como 3086 N/m<sup>2</sup> para todas as seções do gasoduto.

Como já citado anteriormente, o modelo leva em consideração além das fatalidades ocorridas devido ao acidente no gasoduto, ferimentos causados por queimaduras para avaliar as perdas na dimensão humana, através do parâmetro  $\omega$ , sendo que esse varia para cada uma das seções e para cada um dos cenários de perigo. Outro dado de entrada utilizado no modelo é  $\alpha_{a_i}$  que representa uma estimativa da probabilidade de uma pessoa estando dentro da área de perigo seja atingida devido ao fluxo de calor irradiado. O parâmetro  $n_{a_i}$ , que corresponde ao número máximo estimado de pessoas a serem atingidas na zona de perigo associado a uma seção  $a_i$ , também é necessária para esse cálculo. Ambos os valores desses parâmetros podem ser verificados na Tabela A1.5 do Anexo 1.

Para a avaliação das funções consequência da dimensão ambiental outros parâmetros são levados em consideração. Como dado de entrada é utilizada a porcentagem de vegetação existente em cada uma das seções avaliadas

(apresentadas na Tabela A1.6 do anexo 1). Também tem-se como dado de entrada para essa avaliação uma constante que associa o cenário a seção ( $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ , Tabelas A1.7 e A1.8) e de outro parâmetro que representa o inverso do tempo de apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk},a_i}$ ). Ambas tem seus valores variados para cada uma das seções e para cada um dos cenários acidentais, conforme pode ser avaliado nas Tabelas A1.9 e A1.10 do Anexo 1.

E, por fim, para a avaliação da função consequência na dimensão financeira, existem outros parâmetros de entrada que são necessárias para realizar os cálculos, cujos valores estão apresentados nas tabelas A1.11, A1.12 e A1.13 no Anexo 1.

Dessa forma, o ranqueamento das seções em ordem de prioridade de risco para essa aplicação pode ser observado na Tabela 3.1, em que a seção 4 apresenta maior valor de risco em relação as outras seções e deve receber priorização na utilização de recursos para a mitigação e gestão de risco. Assim, o incremento para o risco proveniente dessa seção em relação à seção 7 (segunda colocada na ordenação) é 0,056 vezes maior do que o incremento da seção 7 para a seção 6 (terceira colocada na ordenação).

Tabela 3.1: Ordenação das seções em ordem de priorização para a Aplicação 1.

Ordenamento das seções	Diferença absoluta (E-05)	Razão das diferenças
S4	0,083	0,056
S7	1,471	2,517
S6	0,584	0,21
S8	2,781	0,66
S1	4,21	0,552
S3	7,616	92,621
S2	0,082	
S5		

Serão apresentados aqui os resultados para a análise de sensibilidade para cada uma das variáveis e parâmetros de entrada do modelo, além das constantes de escala associadas a cada uma das três dimensões de risco: humana, ambiental e financeira. Primeiramente, serão apresentadas os parâmetros que, para essa aplicação, possuem o mesmo valor para todas as seções do gasoduto e não mudam com o cenário de perigo, sendo elas diâmetro do duto ( $d$ ), pressão de operação ( $P_0$ ), pressão de vapor de água saturada ( $P_w$ ) e umidade relativa ( $RH$ ).

Para o *diâmetro* do duto foram feitas variações de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  na primeira seção do gasoduto. Observou-se que, para valores menores do que o original ocorreu inversão na ordem das duas primeiras seções, conforme pode ser observado na Tabela 3.2. Enquanto que variações do parâmetro inicial para mais não acarretaram mudanças na ordenação do risco, somente no valor da razão das diferenças entre as seções.

Tabela 3.2: Resultado para análise de sensibilidade para o diâmetro para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
-1 posição	-1 posição	-1 posição	Seção 4	Razão	Razão	Razão
+1 posição	+1 posição	+1 posição	Seção 7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 3	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 5	Robusto	Robusto	Robusto

A *pressão de operação* é um parâmetro que influencia em vários cálculos dentro do modelo, e para a análise de sensibilidade sobre essa ele foram feitas variações de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  na primeira seção do gasoduto. A Tabela 3.3 apresenta o resultado da análise de sensibilidade para ela.

Tabela 3.3: Resultado para análise de sensibilidade para a pressão de operação para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
-1 posição	Razão	Razão	Seção 4	Razão	Razão	Razão
+1 posição	Razão	Razão	Seção 7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 3	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 5	Robusto	Robusto	Robusto

Os parâmetros *pressão de vapor da água saturada* e *umidade relativa*, quando submetidos à variações de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  na primeira seção do

gasoduto, não apresentaram nenhuma mudança no resultado final, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Resultado da análise de sensibilidade para a pressão de vapor de água saturada para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro			
-30%	-20%	-10%	Original	+10%	+20%	+30%	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 4	Robusto	Robusto	Robusto	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 7	Robusto	Robusto	Robusto	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 6	Robusto	Robusto	Robusto	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 8	Robusto	Robusto	Robusto	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 1	Robusto	Robusto	Robusto	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 3	Robusto	Robusto	Robusto	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 2	Robusto	Robusto	Robusto	
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 5	Robusto	Robusto	Robusto	

Em seguida serão apresentados os resultados das análises de sensibilidade para os parâmetros que mudam seus valores de acordo com a seção do gasoduto, porém não possuem dependência do cenário de perigo ocasionado por um vazamento no transporte de gás natural por gasoduto.

Esses parâmetros são: extensão total da seção ( $L_{ai}$ ), vazão regular do gás ( $Q$ ), preço médio de venda do gás ( $v$ ), estimativa do valor da produção ( $w_{ai}$ ), distância até a estação de compressão ( $L_0$ ), porcentagem de vegetação na zona crítica (%Veg), constante de proporcionalidade devido a danos, multas e indenizações ( $\beta$ ), máximo número de pessoas afetadas na seção ( $\eta_{ai}$ ), probabilidade de que uma pessoa presente na zona de perigo seja atingida devido à ocorrência de acidente ( $\alpha_{ai}$ ).

Muitos desses parâmetros demonstraram ser robustos quando submetidas a variações de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  conforme apresentado na Tabela 3.5. Dentre eles estão extensão total da seção, vazão regular do gás, preço médio de venda do gás, estimativa do valor da produção, constante de proporcionalidade devido a danos, multas e indenizações, probabilidade de que uma pessoa presente na zona de perigo seja atingida devido a ocorrência de acidente.

Tabela 3.5: Resultado da análise de sensibilidade para:  $L_{ai}$ ,  $Q$ ,  $v$ ,  $w_{ai}$ ,  $\beta$ ,  $\alpha_{ai}$  para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 4	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 6	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 8	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 1	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 5	Robusto	Robusto	Robusto

Em relação ao parâmetro *distância até a estação de compressão* ( $L_0$ ) é possível observar na Tabela 3.6 os resultados para a análise de sensibilidade realizada com variação  $\pm 10\%$  até  $\pm 50\%$ . O intervalo de variações foi estendido, uma vez que identificou-se que havia mudança na razão das diferenças no intervalo previamente definido e utilizado nas outras avaliações.

Tabela 3.6: Resultado da análise de sensibilidade para a distância até a estação de compressão para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro					Ordenação Original	Variação do parâmetro				
-50%	-40%	-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%	+40%	+50%
Razão	Razão	Razão	Razão	Razão	Seção 4	Razão	Razão	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Razão	Razão	Seção 7	Razão	Razão	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Razão	Razão	Seção 6	Razão	Razão	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Razão	Razão	Seção 8	Razão	Razão	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Razão	Razão	Seção 1	Razão	Razão	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Razão	Razão	Seção 3	Razão	Razão	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Seção 2	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Seção 5	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto

A *porcentagem de vegetação crítica* (%Veg) foi avaliada através da variação de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , e verificou-se a sensibilidade desse parâmetro, uma vez que variações de -30% resultaram na inversão da ordem das seções 4 e 7, conforme pode ser avaliado pela Tabela 3.7. Além disso, foi verificada a existência de modificação na razão das diferenças para todas as seções da ordenação, verificando a existência de impactos para o resultado final, dada uma mudança nos valores dos parâmetros dessa variável.

Tabela 3.7: Resultado da análise de sensibilidade para porcentagem de vegetação na área crítica para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
-1 posição	Razão	Razão	Seção 4	Razão	Razão	Razão
+1 posição	Razão	Razão	Seção 7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	Seção 3	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Seção 5	Robusto	Robusto	Robusto

A análise de sensibilidade para o parâmetro *número máximo de pessoas afetadas* apresentou um resultado expressivo. A variação foi feita no patamar de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , e observou-se significativa mudança no resultado da ordenação das seções do gasoduto, conforme apresentado na Tabela 3.8, e essa mudança permaneceu quando feita variação para -40%.

Tabela 3.8: Resultado da análise de sensibilidade para o número máximo de pessoas afetadas para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro				Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-40%	-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
-1 posição	-1 posição	Robusto	Robusto	Seção 4	Robusto	Robusto	Robusto
-1 posição	-1 posição	Razão	Robusto	Seção 7	Robusto	Robusto	Robusto
-1 posição	-1 posição	Razão	Razão	Seção 6	Razão	Razão	Razão
-1 posição	-1 posição	-1 posição	Razão	Seção 8	Razão	Razão	Razão
+4 posições	+4 posição	+1 posição	Razão	Seção 1	Razão	Razão	-1 posição
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Seção 3	Robusto	Razão	+1 posição
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Seção 2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Seção 5	Robusto	Robusto	Robusto

Foi realizada a análise de sensibilidade para as variáveis e parâmetros que dependem dos cenários acidentais, detonação/deflagração, *jet fire*, CVCE, *flash fire* e dispersão do gás para os dois possíveis modos de falha: ruptura e furo. Dessa forma, foram feitas variações para os dez cenários acidentais possíveis de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , em cada um para avaliar possíveis mudanças no resultado da ordenação das seções do gasoduto.

No caso dessa aplicação, apenas um dos parâmetros mantém os valores iniciais iguais em todas as seções, que é a *proporção do tamanho do furo obtido*

pela razão da área efetiva do furo pela área transversal do duto ( $\alpha$ ). Esse parâmetro não apresenta nenhuma sensibilidade, uma vez que variações de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  feitas para todos os cenários separadamente não resultou em variação da ordenação das seções em hierarquia de risco.

Outro parâmetro que não proporcionou mudança na ordenação das seções quando feita a análise de sensibilidade foi a *taxa de liberação de gás a partir do furo ou ruptura (R)*. Apesar de que os valores para cada uma das seções é diferente para todos os modos de falha, a ordenação das seções permaneceu a mesma quando mudados os valores originais do que o resultado apresentado com a aplicação original.

O parâmetro que representa uma *constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ )*, tem diferentes valores para cada um dos cenários acidentais e para cada uma das seções do gasoduto. Quando submetida à análise de sensibilidade, não resultou em variação do resultado final do modelo para o intervalo utilizado de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ .

O parâmetro que representa uma *constante associada ao cenário e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ )* também foi variada para cada um dos cenários de perigo individualmente, com variações nos parâmetros de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  e apresentou apenas mudança na razão das diferenças para os cenários detonação/deflagração causado por ruptura e por furo, *jet fire* causado por ruptura e furo, e CVCE causado por ruptura e furo.

Em relação ao parâmetro que corresponde ao *inverso do tempo médio para o apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk},a_i}$ )* também possui diferentes valores para cada uma das seções do gasoduto, assim como para cada um dos cenários acidentais. A análise de sensibilidade foi realizada de forma que os valores da seção 1 fossem variados, cada um de uma vez, para cada um dos cenários de perigo individualmente. O resultado que se obteve foi que as variações no intervalo de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  não resultaram em mudança do resultado final e, dessa forma, a ordenação proporcionada pela execução do modelo manteve-se, muito embora a razão das diferenças para os cenários detonação/deflagração causado por ruptura e por furo, *jet fire* causado por ruptura e furo, e CVCE causado por ruptura e furo tenha sido modificada.

E, por fim, a variável que representa o fluxo de radiação de calor ( $I$ ) apresentou características de não sensibilidade, pois as mudanças feitas nos valores da variável não acarretaram em mudanças no resultado final de ordenação dos riscos. Apesar de que ocorreu mudança no valor da razão das diferenças para todas as variações de  $\pm 10$  até  $\pm 30\%$  para os cenários de perigo resultantes dos modos de falha furo e ruptura.

Em relação às constantes de escala, pode-se observar que o modelo é sensível para as três dimensões, uma vez que pequenas variações no valor das constantes alteram significativamente o resultado final da aplicação original. É possível verificar na Tabela 3.9 que todas as variações na constante de escala humana geraram variação do resultado final, em que pelo menos a razão das diferenças foi alterada, sendo que para variações de  $+30\%$ ,  $-10\%$  até  $-30\%$  ocasionaram mudança na ordenação do resultado final.

Tabela 3.9: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	-1 posição
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	-1 posição
-1 posição	-1 posição	-1 posição	S6	Razão	Razão	+2 posições
+1 posição	+1 posição	+1 posição	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto

No que se refere a constante de escala ambiental não se pode afirmar ser robusta por apresentar mudança no valor da razão das diferenças em todas as variações do valor original, conforme pode ser visto na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto

E, por fim, em relação a constante de escala financeira, observa-se mudança na ordenação do resultado final para a variação de -30% em relação ao valor original, conforme apresentado na Tabela 3.11, sendo que para todas as outras variações a razão das diferenças sofreu alteração.

Tabela 3.11: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a Aplicação 1.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		-30%	-20%	-10%
-1 posição	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
-1 posição	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
+2 posições	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto

### 3.2.2 Aplicação 2: caracterizada por ter uma grande área industrial

Essa aplicação é um gasoduto elaborado com dados realísticos, baseados em estudos anteriores para gasodutos de gás natural. Dessa forma é caracterizada por possuir extensão total do gasoduto de transporte de gás natural de 32.200m, sendo segmentado em onze seções. A seção 1 (S1) é caracterizada por ser uma plantação agrícola como ocupação do solo, com muito pouca concentração de seres humanos; a seção 2 (S2) é composta por residências, com muita movimentação de pessoas e bastante construção civil; em relação a seção 3 (S3) encontram-se, além

de residências, também construções destinadas à indústria, sendo que essa última também compõe a seção 4 (S4). A seção 5 (S5) é caracterizada por ser uma área com grande movimentação de pessoas, devido sua característica de comércio.

Ainda em relação às seções, a seção 6 (S6) é uma região mista composta por comércio e área residencial; a seção 7 (S7) é composta somente de uma área destinada a moradia de pessoas; enquanto a seção 8 (S8) é caracterizada por ter obras civis de infraestrutura pública. A seção 9 (S9) trata-se de uma área que contém um *shopping center*; na seção 10 (S10) encontra-se um complexo turístico; e, por fim na seção 11 (S11) existe plantação de cana de açúcar. Essa segmentação é esquematizada e apresentada na Figura 3.7.

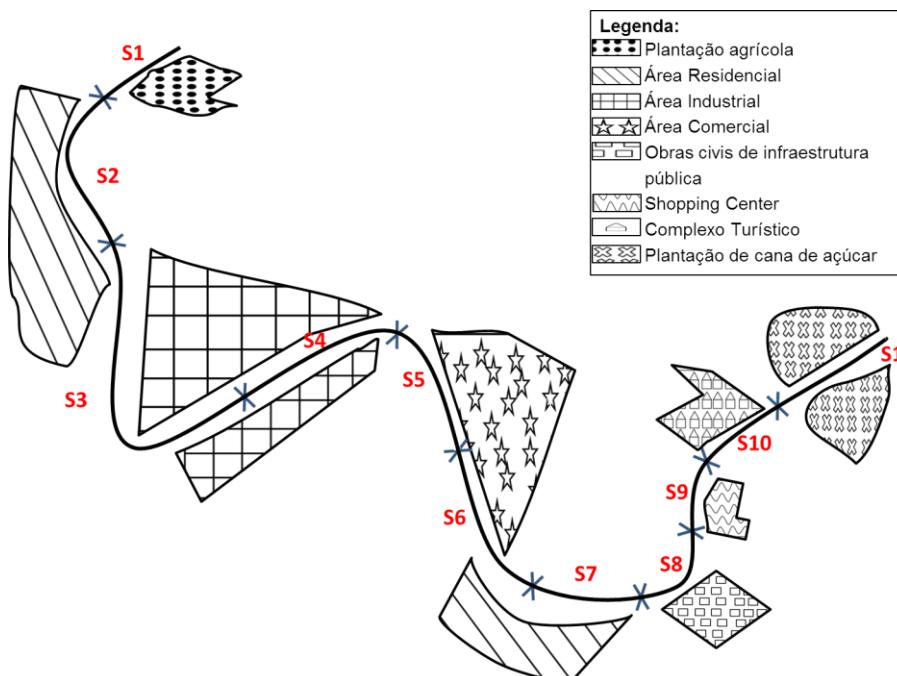


Figura 3.7: Representação visual do gasoduto da aplicação 2.

Assim como na Aplicação 1, não existem dados suficientes para realizar a avaliação das probabilidades de ocorrência de cenários de perigo e do cenário de normalidade operacional (aquele em que nenhuma acidente ocorre). Dessa maneira foram feitas estimativas quanto a essas probabilidades utilizando a experiência de especialistas nesse ramo, resultando nos dados apresentados nas Tabelas A2.1 (para o modo de falha furo) e A2.2 (para o modo de falha ruptura) do Anexo 2.

A pressão de operação ( $P_0$ ) é considerada constante ao longo de cada seção e nesse caso, constante em toda a extensão do duto cujo valor é 35 Kgf/m<sup>2</sup>

(3,432.E06 N/m<sup>2</sup>). O diâmetro do duto ( $d$ ) tem valor igual a 0,2032 m; a distância até a estação de compressão a montante ( $L_0$ ) e também o valor para o raio máximo de perigo ( $CDR$ ) estão apresentados na Tabela A2.3 do Anexo 2.

Quando da estimação do conjunto de *payoffs* para cada uma das dimensões humana, ambiental e financeira, avalia-se as consequências devido a ocorrência de um acidente no transporte do gás natural por gasoduto. Dessa forma, para a dimensão humana o número máximo de pessoas atingidas nessa aplicação foi de 48 pessoas, relativo a seção 4 de uma área industrial. Assumiu-se que a consequência relacionada à dimensão ambiental é de 1172,786 m<sup>2</sup> a máxima área de vegetação atingida pelas chamas. E para o *payoff* da dimensão financeira considerou-se o valor de R\$ 100.000,00.

A elição da função utilidade multiatributo, que é a próxima etapa do modelo foi feita através do procedimento bem estruturado presente no SAD. Averiguou-se que o decisor possui característica de aversão ao risco quando se trata da dimensão humana, neutro ao risco na dimensão ambiental e propenso ao risco na dimensão financeira. As constantes de escala para as três dimensões foram avaliadas em  $k_h=0,324$ ,  $k_e=0,126$  e  $k_f=0,55$ .

A umidade relativa ( $RH$ ), cujo valor é o mesmo para todas as seções, é de 65% e a pressão de vapor de água saturada ( $P_w$ ) recebe o valor de 3086 N/m<sup>2</sup> em todas as seções do gasoduto. O parâmetro proporção do tamanho efetivo do furo ( $\alpha$ ) recebe o valor de 0,181453 para o caso do modo de falha ruptura e 0,00363 para o caso do modo de falha furo. O fluxo de radiação de calor ( $I$ ) tem diferentes valores para o caso de ruptura e para o caso de furo para cada uma das seções, esses valores são apresentados na Tabela A2.3 do Anexo 2.

Outros parâmetros necessários para o cálculo da função consequência humana são o fator que representa quantas vezes é mais provável que ocorra um ferimento a uma fatalidade ( $\omega$ ) e a estimativa de probabilidade de que uma pessoa estando na área de perigo seja atingida ( $\alpha_{a_i}$ ), apresentadas na Tabela A2.5 do Anexo 2, assim como o número máximo de pessoas presentes na zona de perigo ( $n_{a_i}$ ).

A área de vegetação presente na zona de perigo, quando calculada pelo SAD, utiliza como base a porcentagem de vegetação presente em cada uma das seções (%Veg), conforme apresentada na Tabela A2.6 no Anexo 2. O parâmetro

constante relacionada ao cenário de perigo e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ ) é um parâmetro de entrada para o modelo, e seus valores para essa aplicação encontram-se nas Tabelas A2.7 e A2.8 no Anexo 2. Assim como é necessário o valor para o parâmetro que representa o inverso do tempo necessário para apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk},a_i}$ ), apresentada nas Tabelas A2.9 e A2.10 no Anexo 2, em que ambas dependem do cenário acidental e da seção do gasoduto.

Para o cálculo da função consequência são necessárias algumas variáveis/parâmetros conforme apresentado na descrição do modelo, sendo que algumas não dependem do cenário de perigo, enquanto outras dependem. Dentre as que não dependem do cenário de perigo e também são independentes da seção para essa aplicação estão o preço médio do gás ( $v$ ), estipulado em 1,5 R\$/m<sup>3</sup> e a Vazão/Fluxo ( $Q$ ), estipulado em 1,9 m<sup>3</sup>/s. Porém, outros parâmetros têm seus valores variados de acordo com a seção do gasoduto, entre elas a estimativa do valor de produção que será afetado pela ocorrência de um vazamento ( $w_{ai}$  em R\$/s), uma constante decorrente de danos às propriedades, multas e indenizações por danos físicos, devido à energia liberada pelo cenário acidental ( $\beta$  em R\$/J), e a extensão total da seção ( $L_{ai}$ ). Os valores podem ser verificadas na Tabela 11 que encontra-se no Anexo 2.

Os parâmetros que têm seus valores variados de acordo com o cenário de perigo para o cálculo da função consequência na dimensão financeira são a taxa de liberação de gás a partir do furo ou ruptura ( $R$  em m<sup>3</sup>/s), a constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ ). Para maiores detalhes as tabelas que contém esses valores estão apresentadas no Anexo 2 (Tabelas A2.12, A2.13 e A2.14).

Dessa forma, ao final, obteve-se a ordenação das seções do gasoduto de forma hierárquica, a fim de priorizar aquelas com maior necessidade de aplicação de recursos de acordo com as preferências do decisor avaliadas no modelo durante a execução das etapas. A ordenação das seções pode ser observada na Tabela 3.12, que também apresenta a razão entre as seções e o percentual acumulado. Pode-se observar que a seção 1, que representa uma área de plantação agrícola, possui o maior risco dentre todas as seções, e o incremento 1,744 vezes maior do que a seção 11 (segunda colocada na ordenação hierárquica de risco) quando comparado ao incremento da seção 11 para a seção 3 (terceira colocada).

Tabela 3.12: Ordenação das seções em ordem de priorização da Aplicação 2

Ordenamento das seções	Diferença absoluta (E-05)	Razão das diferenças
S1	14,533	1,744
S11	8,331	5,873
S3	1,418	2,195
S5	0,646	0,299
S8	2,158	0,975
S4	2,212	0,756
S2	2,923	0,455
S7	6,412	2,484
S6	2,581	0,51
S9	5,052	
S10		

Para essa aplicação, em que o gasoduto foi subdividido em onze seções, a análise de sensibilidade foi realizada através da variação dos parâmetros de entrada do modelo, para avaliar seu comportamento quanto a robustez ou não das variáveis/parâmetros. Fica claro com os resultados da análise de sensibilidade que as mudanças ocorridas nesta avaliação diferem das mudanças resultantes da análise de sensibilidade na Aplicação 1 apresentada anteriormente, tanto na variação da razão das diferenças, quanto na ordenação das seções, embora o intervalo de variações utilizado foi o mesmo. Dessa forma, serão apresentados os resultados das avaliações para cada uma das entradas do modelo, de forma que possa ser verificado seu comportamento em relação ao resultado final obtido pelo modelo.

Para a apresentação dos resultados dessa aplicação, primeiramente serão expostas as que não alteram seus parâmetros ao longo da extensão do gasoduto, ou seja, que para todas as seções subdivididas o valor se mantém. Em seguida, serão apresentados os resultados para as que tem seus valores diferentes para cada seção do gasoduto, sendo assim, em cada uma das seções os parâmetros podem receber valores diferenciados. E, por fim, serão apresentados os resultados para as que os valores são diferentes para as seções do gasoduto e com o cenário de perigo ocasionado por um vazamento no gasoduto.

As variáveis/parâmetros que não variam de acordo com a seção do gasoduto são o diâmetro do gasoduto ( $d$ ) a vazão regular do gás ( $Q$ ), o preço médio de venda do gás ( $v$ ), a pressão de operação ( $P_0$ ), a pressão de vapor de água saturada ( $P_w$ ) e a umidade relativa ( $RH$ ).

O resultado para a análise de sensibilidade do parâmetro *diâmetro* pode ser verificado na Tabela 3.13. Foram feitas variações no intervalo de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  da primeira seção do gasoduto, em que ocorreu variação no valor da razão das diferenças para as seções presentes na ordenação do risco. Porém, não resultou em mudança na ordenação final do modelo, permanecendo a mesma ordem do caso original.

Tabela 3.13: Resultado da análise de sensibilidade para o diâmetro da aplicação 2.

Variação do parâmetro			Ordenamento Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S11	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

Os parâmetros *vazão regular do gás*; *pressão de vapor de água saturada*; *umidade relativa*; e *preço médio de venda do gás* apresentam resultados da análise de sensibilidade iguais. Fazendo as devidas variações de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  para cada uma delas, na primeira seção do gasoduto não proporcionou mudança na ordenação das seções no resultado final do modelo, nem na razão das diferenças, como pode ser identificado na Tabela 3.14. Dessa forma, é possível afirmar que tais parâmetros não possuem sensibilidade, ou seja, mesmo em variações de ordem grande (como 30% para mais ou para menos) não proporcionam nenhuma mudança no resultado final do modelo original.

Tabela 3.14: Resultado da análise de sensibilidade para  $v$ ,  $Q$ ,  $P_W$ ,  $RH$  da aplicação 2.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Robusto	Robusto	Robusto	S1	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S11	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S8	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S4	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S6	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

O último parâmetro que não tem seus valores variados com a seção do gasoduto é a *pressão de operação*, cujo resultado da avaliação de sensibilidade é apresentado na Tabela 3.15. Variações feitas nos valores originais indicam que não há mudança na ordenação das seções da aplicação original. Porém, foram identificadas variações nas razões das diferenças das seções, que podem ser úteis, dada a escassez de recurso e necessidade de alocação deles.

Tabela 3.15: Apresentação dos resultados para análise de sensibilidade para a pressão de operação para a Aplicação 2.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S11	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

Os resultados que serão apresentados a seguir são referentes aos parâmetros que para a Aplicação 2 possuem diferentes valores para cada uma das seções do gasoduto, porém não dependem do cenário de perigo. Sendo eles

extensão total da seção ( $L_{ai}$ ); estimativa do valor da produção ( $w_{ai}$ ); distância até a estação de compressão ( $L_o$ ); porcentagem de vegetação presente na zona de perigo (% Veg); constante de proporcionalidade devido a danos, multas e indenizações ( $\beta$ ); número máximo de pessoas presentes na zona de perigo ( $\eta_{ai}$ ); e probabilidade de que uma pessoa presente na zona de perigo seja atingida devido a ocorrência de acidente ( $\alpha_{ai}$ ).

Os parâmetros *extensão total da seção; estimativa do valor de produção; constante de proporcionalidade devido a danos, multas e indenizações; e probabilidade de que uma pessoa presente na zona de perigo seja atingida devido a ocorrência de acidente*, apresentaram os mesmos resultados para as análises realizadas. Com variações de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , não foi gerada mudança no resultado original do modelo, ou seja, não ocorreu nenhuma inversão na ordenação hierárquica de riscos associados às seções do gasoduto, conforme pode ser observado na Tabela 3.16, nem mudança dos valores da razão das diferenças.

Tabela 3.16: Resultado da análise de sensibilidade para:  $L_{ai}$ ,  $w_{ai}$ ,  $\beta$ ,  $\alpha_{ai}$  da aplicação 2.

	Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
	-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S1	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S11	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S8	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S4	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S6	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

Quanto ao parâmetro que identifica o *número máximo de pessoas presentes na área de perigo*, é possível observar na Tabela 3.17 que, apesar das variações dos valores originais, não ocorreu mudança na ordem de hierarquização de risco. Porém, é possível verificar que houve mudança no valor da razão das diferenças para a seção 1 em todas as variações, no intervalo de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , que é a primeira colocada na ordenação.

Tabela 3.17: Resultado da análise de sensibilidade para  $\eta_{a_i}$  da Aplicação 2.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S11	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S8	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S4	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S6	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

Os parâmetros *porcentagem de vegetação na zona crítica* e a *distância até a estação de compressão* apresentaram o mesmo comportamento devido às variações feitas nos parâmetros. Nenhum dos dois apresentou sensibilidade nas variações, uma vez que não houve inversão de posição na ordenação das seções no resultado final da aplicação do modelo. Somente ocorreu pequena variação na razão das diferenças para todas as seções, podendo ser um dado importante para a alocação de recursos na gestão de risco quando esse for escasso. O resultado dessa análise está exposto na Tabela 3.18.

Tabela 3.18: Resultado da análise de sensibilidade para %Veg e  $L_0$  da aplicação 2.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S11	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

No que se refere às variáveis e parâmetros cujos valores de entrada do modelo se alteram de acordo com a seção e com o cenário de perigo proveniente de

um acidente no gasoduto terão seus resultados apresentados em seguida, tendo em conta que em nenhum dos casos, ocorreu mudança na ordenação do resultado final da aplicação do modelo. As variáveis/parâmetros que possuem essa característica são o fluxo de radiação de calor ( $I$ ); constante que associa o cenário e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ ); a constante que representa o inverso do tempo necessário para apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk},a_i}$ ); a constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q(z_i)$ ; a taxa de liberação de gás ( $R$ ); e a proporção do tamanho do furo ( $\alpha$ ).

Os cenários de perigo provenientes do vazamento de gás no gasoduto são detonação/deflagração, *jet fire*, CVCE, *flash fire* e dispersão de gás, sendo que cada um deles pode ocorrer devido a dois possíveis modos de falha: ruptura e furo. Dessa forma, totalizando dez possíveis cenários de perigo.

Nesta aplicação obteve-se o mesmo resultado da análise de sensibilidade para todas as variáveis e parâmetros descritos acima, e pode ser visto na Tabela 3.19. Observa-se que fazendo variação de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , para cada um dos parâmetros individualmente nos valores originais dessa aplicação, não há mudança de posição na ordenação das seções, assim como não ocorre mudança nos valores da razão das diferenças entre as seções do gasoduto, atribuindo a essas variáveis e parâmetros a característica de robustez para essa aplicação.

Tabela 3.19: Resultado da análise de sensibilidade para:  $I$ ;  $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ ;  $g_{\theta_{jk},a_i}$ ;  $z_i$ ;  $R$ ; e  $\alpha$  da aplicação 2.

Variação dos parâmetros			Ordenação Original	Variação dos parâmetros		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Robusto	Robusto	Robusto	S1	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S11	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S8	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S4	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S6	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

Além desses parâmetros e variáveis apresentadas que possuem ou não relação com a seção e com o cenário de perigo gerado por um vazamento, tem-se

as constantes de escala que são independentes dessas duas características, mas que mudanças em seus valores podem alterar o resultado final do modelo. Dessa forma, serão apresentados os resultados para a análise de sensibilidade das constantes de escala dessa aplicação, em que foram feitas variações de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  em cada uma delas: humana, ambiental e financeira.

Em relação a constante de escala humana, pode ser visto na Tabela 3.20 que ocorre mudança na ordenação das seções do gasoduto, exceto para  $\pm 10\%$ , ocorrendo mudança na razão das diferenças para todas as seções em que esse é calculado. Dessa forma pode-se afirmar que é sensível a mudanças nos seus valores.

Tabela 3.20: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 2

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S11	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	-2 posições	-2 posições
-1 posição	Razão	Razão	S5	Razão	+1 posição	+1 posição
-1 posição	-1 posição	Razão	S8	Razão	+1 posição	+1 posição
+2 posições	+1 posição	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

Para a constante de escala ambiental é possível identificar na Tabela 3.21 que não há mudança na ordenação das seções, porém a razão das diferenças é modificada para todas as seções em que é calculada. Isso pode ser atribuído ao fato de que essa constante possui um baixo valor nessa aplicação, e a compensação feita nos outros critérios pode não ter sido significante para alterar o resultado final.

Tabela 3.21: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental para a Aplicação 2.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S11	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S3	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

E, por fim, é verificado que na constante de escala financeira ocorreram mudanças na ordenação das seções do gasoduto para todas as variações, exceto para +10%, como apresentado na tabela 3.22, o que comprova sua sensibilidade dentro do modelo. Acredita-se que isso ocorre por se tratar de uma constante de escala com alto valor, e pequenas variações nesse valor podem demonstrar grandes variações no *trade off* entre os critérios.

Tabela 3.22: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a aplicação 2.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S11	Razão	Razão	Razão
-2 posições	-2 posições	-1 posição	S3	Razão	Razão	Razão
Razão	+1 posição	+1 posição	S5	Razão	Razão	-1 posição
+2 posições	+1 posição	Razão	S8	Razão	-1 posição	-1 posição
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	+1 posição	+2 posições
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S9	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S10	Robusto	Robusto	Robusto

### 3.2.3 Aplicação 3: prevalência de área comercial

Essa aplicação considera um gasoduto de transporte de gás natural de 31.950 m de extensão (gasoduto esse publicado no artigo de Alencar et al., 2013) sendo que foi dividido em oito seções, conforme pode ser observado na Figura 3.8, de acordo com o que foi explicado na segunda etapa do modelo.

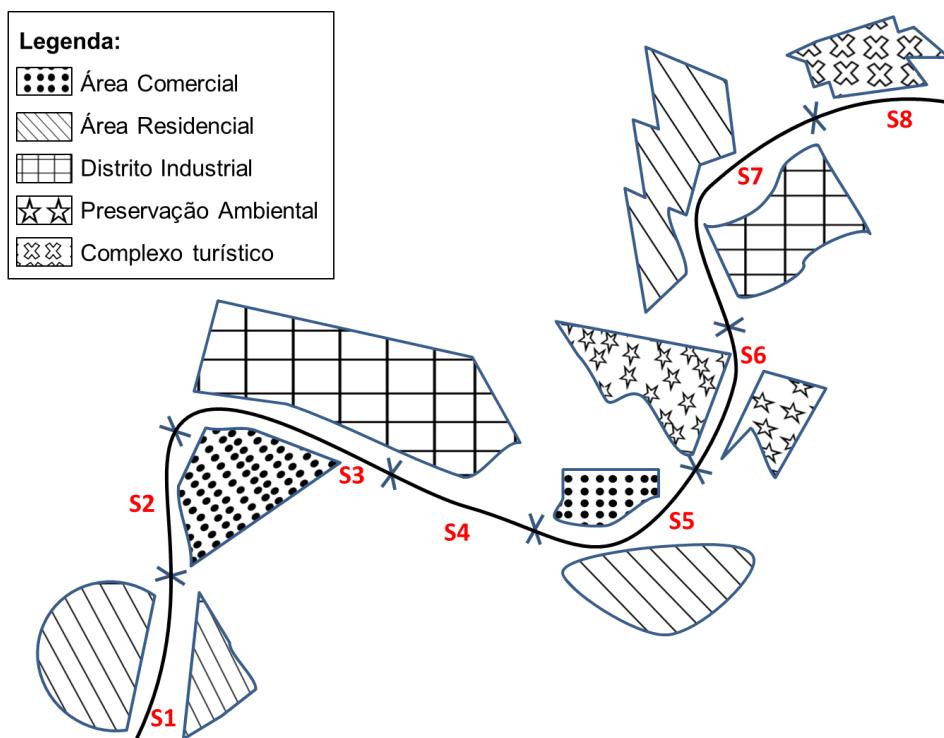


Figura 3.8: Representação visual do gasoduto da Aplicação 3.

As características das seções podem ser observadas na Figura 3.8. A seção 1 (S1) uma área composta por residências; já a seção 2 (S2) é uma área comercial; enquanto que a seção 3 (S3) além de ter a presença do comércio também é um distrito industrial que também existe na seção 4 (S4). Na seção 5 (S5) é possível encontrar características residenciais e comerciais, a seção 6 (S6) é uma área estritamente de preservação ambiental, não tendo presença significativa de seres humanos. Na seção 7 (S7) é possível identificar presença de indústrias e de residências e, por fim, a seção 8 (S8) é uma área destinada a receber turistas, considerada como um complexo turístico.

O próximo passo do modelo é a avaliação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e do cenário de normalidade. A ocorrência ou não de um cenário acidental depende do modo de falha (furo ou ruptura) e da seção do

gasoduto. Dessa forma, as probabilidades de ocorrência de cenários acidentais em cada uma das seções e para cada um dos modos de falha e a probabilidade de ocorrência do cenário de normalidade operacional são apresentadas nas Tabelas A3.1 e A3.2 do Anexo 3.

Em relação ao cálculo do raio máximo de perigo (*CDR*) para avaliação dos objetos de impacto constantes na área identificada como sendo de perigo é necessário conhecer os valores de algumas variáveis. Dentre essas algumas possuem valores constantes para todas as seções, enquanto outras possuem valores variáveis. Dentre as de valor constante estão a pressão de operação ( $P_0$ ), cujo valor é de 35 kgf/m<sup>2</sup> e o diâmetro ( $d$ ), igual a 0,2032 m, os valores da distância ( $L_0$ ) até a estação de compressão e os respectivos CDR são apresentados na Tabela A3.3 do Anexo 3.

Para prosseguir o modelo, deve-se avaliar os valores dos *payoffs* para as diferentes dimensões de risco humana, financeira e ambiental. O *payoff* para a dimensão humana é o máximo número de pessoas afetadas em cada uma das seções, e nessa aplicação foi definida como 25 pessoas, relativo à seção 2 caracterizada como uma área comercial. O *payoff* referente à dimensão ambiental é de 382,358 m<sup>2</sup>. E o *payoff* relacionado a dimensão financeira foi avaliado em R\$ 8.200.000,00.

Devido a avaliação da função utilidade multiatributo, as constantes de escala para as três dimensões de risco foram estabelecidas em  $k_h=0,407178$   $k_e=0,378852$  e  $k_f=0,214$ . Essas constantes de escala foram elicitadas através de um procedimento bem estabelecido e com várias etapas presentes no SAD, assim como as funções utilidades para cada uma das dimensões, levando em consideração que o decisor para as dimensões humana e ambiental é avesso ao risco, e para a dimensão ambiental possui característica de neutralidade em relação do risco.

A próxima etapa do modelo é o cálculo das funções consequência para as três dimensões de risco separadamente, sendo que é necessário apresentar os valores utilizados para cada uma das variáveis/parâmetros que compõe esse cálculo. Dessa forma, é interessante apresentar primeiramente a variável  $I$ , que é o fluxo de radiação de calor irradiado, pois essa é utilizada em ambas as três dimensões, apresentada na Tabela A3.4 do Anexo 3.

O valor da umidade relativa ( $RH$ ) para essa aplicação é considerado como 65% e a pressão de vapor da água saturada ( $P_w$ ) é considerada como 3086 N/m<sup>2</sup>. A proporção do tamanho do furo ( $\alpha$ ) tem o valor igual a 0,181453 para o modo de falha ruptura e 0,00363 para o modo de falha furo.

Para o cálculo da função consequência para a dimensão humana, é necessário o parâmetro que avalia quantas vezes mais provável é o acontecimento de um ferimento do que uma fatalidade ( $\omega$ ), cujo valor varia para cada uma das seções do gasoduto; o parâmetro  $\alpha_{a_i}$  que representa uma estimativa de probabilidade de que uma pessoa estando dentro da área de perigo seja afetada dado um acidente, que também varia para cada seção do gasoduto e  $\eta_{a_i}$  que representa o número máximo de pessoas presentes na área de perigo. Os valores para ambas os parâmetros estão demonstrados na Tabela A3.5 do Anexo 3.

Para a dimensão ambiental, outros parâmetros são avaliados, além dos já apresentados. A porcentagem de vegetação (apresentada na Tabela A3.6 do anexo 3) em cada uma das seções do gasoduto e  $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$  que associa o cenário e a seção, variando de acordo com o cenário e com a seção, conforme podem ser averiguados na Tabela A3.7 e A3.8 do Anexo 3.

Além desses parâmetros, ainda utiliza-se o parâmetro  $g_{\theta_{jk},a_i}$  que representa o inverso do tempo para o apagamento das chamas, e seus valores variam para cada uma das seções e cada um dos cenários, sendo apresentado na Tabela A3.9 e A3.10 do Anexo 3.

O cálculo da função consequência para a dimensão financeira necessita de alguns parâmetros diferentes dos já citadas e seus parâmetros precisam ser demonstrados. Os parâmetros que dependem da seção, mas não dependem do cenário de perigo são: o preço médio de venda do gás ( $v$  em R\$/m<sup>3</sup>), a vazão regular do gás ( $Q$  em m<sup>3</sup>/s), estimativa do valor da produção ( $w_{ai}$  em R\$/s), a constante de proporcionalidade referente a multas e indenizações pagas ( $\beta$  em R\$/J) e a extensão total da seção ( $L_{ai}$  em metros), conforme apresentado na Tabela A3.11 do Anexo 3.

Entretanto alguns parâmetros estão relacionados tanto com a seção quanto com o cenário de perigo. Entre elas a constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q(z)$  (apresentados nas Tabelas A3.12 e A3.13 do Anexo 3) e a taxa de liberação de gás a partir do furo ou ruptura ( $R$  m<sup>3</sup>/s), cujos valores podem ser observados na Tabela A3.14 do Anexo 3.

Assim, com a utilização de todos esses dados descritos acima, foi possível calcular o risco para cada uma das seções e consequentemente obter a ordenação em ordem de prioridade através do cálculo das razões das diferenças conforme estabelecido na Equação 3.26 e o resultado é apresentado na Tabela 3.23. Dessa forma a seção que deve receber prioridade na aplicação de recursos para mitigação e gerenciamento de risco é a seção 7, composta por uma área residencial e industrial. O incremento para o risco proveniente da seção 7 em relação a seção 4 é 2,42 vezes maior do que o incremento da seção 4 para a seção 6.

Tabela 3.23: Ordenação das seções em ordem de priorização da Aplicação 3

Ordenamento das seções	Diferença absoluta (E-05)	Razão das diferenças
S7	1,155	2,42
S4	0,477	0,091
S6	5,21	1,78
S1	2,926	0,893
S8	3,276	22,816
S5	0,143	0,684
S3	0,209	
S2		

Fonte: Alencal et. al. (2013)

Em seguida, serão apresentados os dados da análise de sensibilidade para essa aplicação com base nos dados apresentados anteriormente para as variáveis e parâmetros do modelo. Primeiro serão apresentados os resultados dos parâmetros cujos valores do modelo permanecem os mesmos para todas as seções do gasoduto e não dependem do cenário de perigo formado devido ao vazamento do gasoduto.

Posteriormente, serão apresentados os resultados para os parâmetros que possuem diferentes valores para cada uma das seções subdivididas do gasoduto. Em seguida serão expostos os resultados das análises para os parâmetros e variáveis que possuem valores diferentes para os cenários de perigo, mas não diferencia para as seções, e, por fim, os parâmetros e as variáveis que possuem valores diferentes para seus parâmetros nas seções e nos cenários de perigo.

Dentre os parâmetros que não possuem seu valor variado para cada seção estão o diâmetro do gasoduto ( $d$ ), a pressão de operação ( $P_0$ ), a pressão de vapor de água saturada ( $P_w$ ) e a umidade relativa ( $RH$ ). Variações feitas nos valores do

diâmetro de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , não ocasionou mudança no resultado final de ordenação das seções de forma hierárquica de risco, porém apresentou mudança no valor da razão das diferenças para cada uma das seções presentes na avaliação, conforme pode ser constatado na Tabela 3.24. Fato esse também evidenciado na análise da *pressão de operação*.

Tabela 3.24: Resultado da análise de sensibilidade para o diâmetro e pressão de operação da Aplicação 3.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto

Para os parâmetros *pressão de vapor de água saturada* e *umidade relativa* um comportamento diferente daquele observado nos parâmetros anteriores pode ser constatado na Tabela 3.25 Variações feitas não apresentam nenhum tipo de modificação do resultado final gerado pelo modelo original, tanto na ordenação das seções quanto na razão das diferenças das seções, o que leva-se a acreditar que variações nos valores originais não acarretam mudança no valor do risco para cada uma das seções.

Tabela 3.25: Resultado da análise de sensibilidade para  $P_w$  e  $RH$  da Aplicação 3.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	+10%	+20%	+30%
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S4	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S6	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S1	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S8	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto

Em relação aos parâmetros que possuem diferentes valores para cada uma das seções do gasoduto, alguns apresentam resultados iguais para a análise de sensibilidade. Dessa forma, primeiro serão apresentadas os parâmetros que não ocasionaram nenhuma variação para o resultado final gerado pelo modelo original, levando em consideração que cada um deles foi avaliado separadamente, dado o procedimento de análise de sensibilidade simples. Sendo eles a extensão total da seção ( $L_i$ ); vazão regular do gás ( $Q$ ); preço médio de vendas do gás ( $v$ ); a constante de proporcionalidade devido a danos, multas e indenizações ( $\beta$ ); a estimativa do valor da produção ( $w_{ai}$ ); e o parâmetro que representa a estimativa de probabilidade de que pelo menos uma pessoa seja atingida ( $\alpha_{ai}$ ). Conforme pode ser verificado na Tabela 3.26, não ocasionaram variação na ordenação das seção nem na razão das diferenças.

Tabela 3.26: Resultado da análise de sensibilidade para:  $L_i$ ,  $Q$ ,  $v$ ,  $\beta$ ,  $w_{ai}$ ,  $\alpha_{ai}$  da Aplicação 3.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	+10%	+20%	+30%
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S4	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S6	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S1	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S8	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto

Ainda em relação aos parâmetros que possuem valores diferentes para cada uma das seções, que são a distância até a estação de compressão ( $L_0$ ) e a porcentagem de vegetação na zona crítica (%Veg) não proporcionaram mudança da ordenação das seções no resultado final do modelo original devido a variações de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  em seus valores. Em contrapartida, ocasionam uma mudança no valor da razão das diferenças de todas as seções do gasoduto, podendo ser inferido que ocorre mudança no valor do risco para as seções, mas não o suficiente para ocasionar mudança na ordenação do risco, conforme apresentado na Tabela 3.27.

Tabela 3.27: Resultado da análise de sensibilidade para  $L_0$  e %Veg da Aplicação 3.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto

O número máximo de pessoas presentes na zona crítica ( $\eta_{ai}$ ), conforme pode ser observado na Tabela 3.28, apresenta mudança na ordenação das seções quando submetida a variação de +20% e +30%, sendo que as seções 1 e 8 inverteram suas posições na ordenação de risco. Além disso, ocorreu mudança no valor da razão das diferenças das seções 4, 6 e 1 em todas das variações de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ .

Tabela 3.28: Resultado da análise de sensibilidade para  $\eta_{ai}$  da Aplicação 3.

Variação do parâmetro			Ordenação Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	-1 posição	-1 posição
Robusto	Robusto	Robusto	S8	Robusto	+1 posição	+1 posição
Robusto	Robusto	Robusto	S5	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto

Em relação ao resultado da análise de sensibilidade de variáveis e parâmetros que tem valores diferentes para cada um dos cenários de perigo, pode-se observar que não ocorreu nenhuma variação na ordenação das seções no resultado final da execução do modelo para essa aplicação. Em sua maioria, não ocorreu nenhum tipo de variação, seja na ordenação da seção, seja na razão das diferenças das seções.

Com essas características tem o fluxo de radiação de calor ( $I$ ); constante que associa o cenário e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$ ); a constante que representa o inverso do tempo

necessário para apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk},a_i}$ ); a constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $Z_i$ ); a taxa de liberação de gás ( $R$ ); e a proporção do tamanho do furo ( $\alpha$ ). Sendo que os possíveis cenários de perigo em que os parâmetros tiveram seus valores variados, um por vez, em um cenário foram detonação/deflagração, *jet fire*, CVCE, *flash fire* e dispersão de gás, em que cada um deles pode ocorrer devido a dois possíveis modos de falha: ruptura e furo.

Variações feitas no parâmetro *constante que associa o cenário e a seção* não acarretarem mudança na ordenação das seções na hierarquização do risco, mas proporcionaram variação da razão das diferenças. No cenário *jet fire* causado por ruptura ocorreu variação na razão das diferenças para as seções 4, 6 e 1 para todas as variações no intervalo de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ . No cenário *jet fire* causado por furo as seções que tiveram a razão das diferenças modificada foram as seções 4, 6 e 1 para o mesmo intervalo de variações, salvo para a variação de  $-10\%$ . Já no cenário CVCE causado por furo, as seções que tiveram a razão das diferenças modificada foram as seções 6 e 1, salvo para a variação de  $-10\%$  e  $-20\%$ , que não proporcionaram modificação nesses valores. Nos outros cenários para esse parâmetro não ocorreu nenhum tipo de variação.

Para o *inverso do tempo necessário para apagamento das chamas* foi identificado nos cenários detonação/deflagração causado por ruptura, *jet fire* causado por ruptura e furo, e CVC causado por ruptura e furo variação no valor da razão das diferenças para as seções 6 e 1, porém não foi identificada nenhuma variação na ordenação hierárquica das seções ao final do modelo.

Ainda foi realizada análise de sensibilidade para cada uma das constantes de escala dessa aplicação, que são relacionadas com os três critérios (dimensões de risco) utilizados: humano, financeiro e ambiental. Para a constante de escala humana, o resultado pode ser observado na Tabela 3.29, em que não ocorreu mudança na ordenação das seções apenas na variação de  $-10\%$ , portanto, para essa aplicação pode-se dizer que é sensível a variações nos valores de entrada do modelo.

Tabela 3.29: Resultado para análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 3.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	-1 posição	-1 posição	-1 posição
Razão	Razão	Razão	S6	+1 posição	+1 posição	+1 posição
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
-1 posição	-1 posição	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
-1 posição	-1 posição	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
+2 posições	+2 posições	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto

Relacionado à constante de escala ambiental, é possível identificar na Tabela 3.30 que não ocorreu mudança na ordenação das seções. Porém para todas as seções em que a razão das diferenças é calculada, ocorreu mudança no resultado final do modelo original dadas as variações nos valores.

Tabela 3.30: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	Robusto	Robusto

A constante de escala financeira mostrou-se sensível a variações nos valores originais do modelo, como se observa na Tabela 3.31, em que ocorreram mudanças na ordenação das posições das seções em relação ao resultado proporcionado pela aplicação original, com exceção das variações de  $\pm 10\%$ .

Tabela 3.31: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a Aplicação 3.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S7	Razão	Razão	Razão
-1 posição	-1 posição	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
+1 posição	+1 posição	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S8	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	-1 posição
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	-1 posição	-1 posição
Robusto	Robusto	Robusto	S2	Robusto	+1 posição	+2 posições

### 3.2.4 Aplicação 4: predominantemente características de áreas residenciais e comerciais

Essa aplicação caracteriza-se por ser um gasoduto de transporte de gás natural com extensão total de 18.000 m (os dados dessa aplicação foram baseados no estudo publicado por Alencar et al., 2013) passando por diferentes locais com diferentes formas de ocupação do solo. Dessa forma o gasoduto foi dividido em sete seções, de maneira que essas seções tivessem características homogêneas além da ocupação do solo, mas também de quantidade de seres humanos existentes, que podem ser observadas na Figura 9.

Analisando as características de cada uma das seções, é possível observar que a seção 1 (S1) é composta por uma área de residências e de comércio, tendo presença de muitos seres humanos; a seção 2 (S2) é composta por uma área comercial; a seção 3 (S3) é composta por um distrito industrial; enquanto a seção 4 (S4) é um complexo turístico. Em relação à seção 5 (S5) é possível observar a existência de características comerciais; a seção 6 (S6) é composta estritamente por uma área de preservação ambiental; e, por fim, a seção 7 (S7) é uma área destinada a moradia, considerada como uma área residencial.

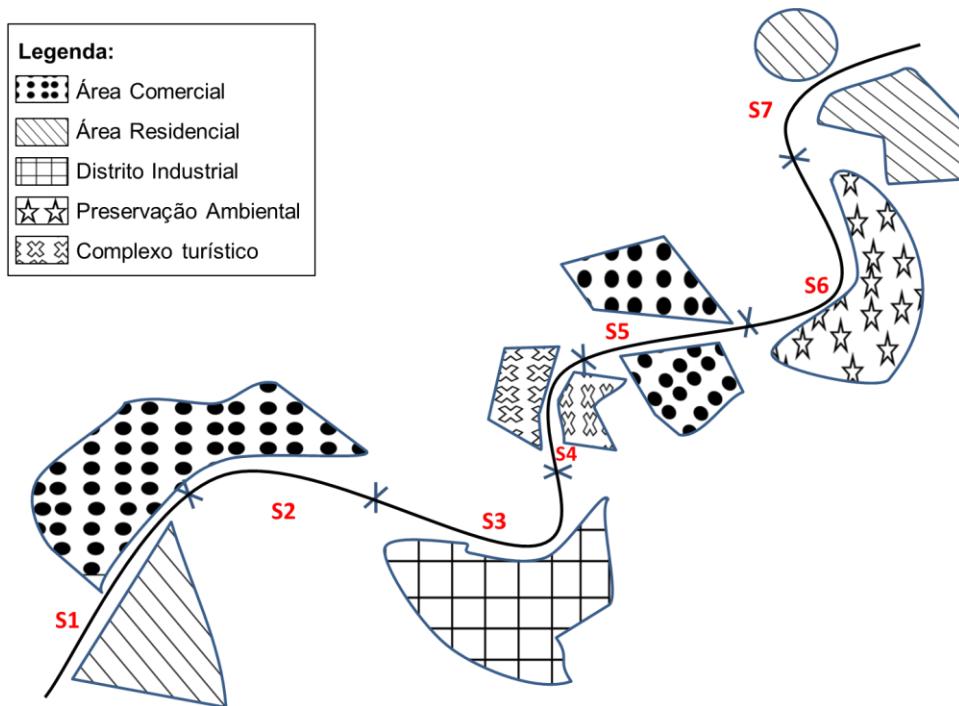


Figura 3.9: Representação visual do gasoduto da Aplicação 4.

Para dar sequência ao modelo, é necessário avaliar as probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e do cenário de normalidade operacional. Dessa forma, essas probabilidades são diferenciadas para cada uma das seções e para os dois modos de falha considerados, os valores estão expostos nas Tabelas A4.1 e A4.2 do Anexo 4.

A pressão de operação ( $P_0$ ) foi considerada com valor igual a 35 kgf/m<sup>2</sup>, diâmetro ( $d$ ) também é constante igual a 0,2032 m. O valor da distância para a estação de compressão a montante ( $L_0$ ) varia para cada uma das seções e pode ser vista na Tabela A4.3 do Anexo 4, que também apresenta o valor para o raio máximo de perigo ( $CDR$ ) para cada uma das seções.

Para essa aplicação, a quantidade máxima de pessoas que podem ser atingidas foi estabelecida como 37, que é o número máximo de pessoas encontradas em cada uma das seções, correspondente a seção 3 caracterizada por uma área que contém um distrito industrial, sendo esse o *payoff* para a dimensão humana. Em relação a dimensão ambiental, o *payoff* ficou estabelecido como sendo 1964,51 m<sup>2</sup>, que considera a porcentagem de vegetação existente em cada uma das seções. E, por fim, a dimensão financeira, que avalia as perdas devido ao desembolso financeiro que a concessionária fornecedora de gás vai ter devido a um

vazamento. Nesta aplicação o valor máximo esperado para essa dimensão é de R\$ 8.000.000,00.

As constantes de escala necessárias para a avaliação da utilidade multiatributo foram calculadas com um procedimento existente no SAD para cada uma das dimensões de risco, sendo que para a dimensão humana  $k_h=0,391686$ , a para dimensão ambiental  $k_e=0,281314$  e para a dimensão financeira  $k_f=0,327$ .

Os valores estabelecidos para a pressão de vapor de água saturada (Pw), e para a umidade relativa (RH) foram de 3086 N/m<sup>2</sup> e 65%, respectivamente para todas as seções do gasoduto. A proporção do tamanho do furo ( $\alpha$ ) tem valor igual a 0,181453 para o modo de falha ruptura e 0,00363 para o modo de falha furo. Os valores para o fluxo de radiação de calor são apresentado na Tabela A4.4 do Anexo 4, pois possuem valores diferentes para cada uma das seções e para os dois modos de falha.

Para o cálculo da função consequência da dimensão humana são necessários os valores de  $\omega$ , que representa quantas vezes mais é provável o acontecimento de uma lesão do que uma fatalidade, e os valores de  $\alpha_{a_i}$  que representa uma probabilidade de que uma pessoa dentro da zona de perigo seja atingida devido a ocorrência de um acidente. Além desses, é necessário também o valor de  $\eta_{a_i}$ , que representa o numero máximo de pessoas presentes na zona de perigo, utilizado para avaliar o *payoff* dessa dimensão, atrelado ao maior número de pessoas existentes em todas as seções. Os valores de todos esses parâmetros estão demonstrados na Tabela A4.5 do Anexo 4.

Para o cálculo da função consequência da dimensão ambiental, outros parâmetros devem ser avaliados, entre eles estão a porcentagem de vegetação na zona crítica (%Veg), pois a partir dele será calculada a área de vegetação presente na zona de perigo. Esses valores são apresentados na Tabela A4.6 do Anexo 4.

Ainda para o cálculo da função consequência ambiental é necessário avaliar os valores para a constante associada ao cenário e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$  dada em m<sup>2</sup>/J), cujos valores são apresentados nas Tabelas A4.7 e A4.8 do Anexo 4, cada uma delas apresentando os valores para o caso de um cenário accidental causado por ruptura e a outra tabela no caso de acontecimento de um furo. As Tabelas A4.9 e A4.10 do Anexo 4 apresentam os valores para  $g_{\theta_{jk},a_i}$ , que representa o inverso do tempo de apagamento das chamas.

E para o cálculo da função consequência financeira, o parâmetro que não depende da seção é a vazão regular do gás ( $Q$ ), cujo valor é de  $2,54 \text{ m}^3/\text{s}$ , e os que têm seus valores dependentes de cada uma das seções são: o valor médio de venda do gás ( $v$  em R\$/m); a estimativa do valor da produção ( $w_{ai}$  em R\$/s); a constante de proporcionalidade referente à multas e indenizações pagas ( $\beta$  em R\$/J); e a extensão total da seção ( $L_{ai}$  em metros), apresentados na Tabela A4.11 do Anexo 4.

Também são necessários os valores para os parâmetros dependentes da seção e do cenário de perigo formado. Entre eles estão a constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ , apresentados nas Tabelas A4.11 e A4.13 do Anexo 4); e a taxa de liberação de gás a partir do furo ou ruptura ( $R \text{ m}^3/\text{s}$ ), cujos valores podem ser observados na Tabela A4.14 do Anexo 4.

Tendo em vista todos os dados apresentados para essa aplicação, pode-se chegar ao resultado do modelo, conforme apresentado na Tabela 3.32, em que a seção 6 deve ser priorizada na utilização de recursos para a mitigação de riscos e gestão do gasoduto. Essa seção possui 1,747 vezes maior incremento ao risco em relação a seção 2 (segunda colocada na ordenação dos riscos), do que dessa seção em relação a seção 1 (terceira colocada na ordenação dos riscos).

Tabela 3.32: Ordenação das seções em ordem de priorização para a Aplicação 4.

Ordenamento das seções	Diferença absoluta (E-05)	Razão das diferenças
S6	4,814	1,747
S2	2,755	0,937
S1	2,939	0,658
S5	4,461	4,269
S4	1,044	0,524
S7	1,991	
S3		

Para a análise de sensibilidade foram avaliados primeiramente os parâmetros cujos valores não dependem do cenário de perigo, sendo eles: extensão total da seção ( $L_{ai}$ ); diâmetro do gasoduto ( $d$ ); vazão regular do gás ( $Q$ ); preço médio de venda do gás ( $v$ ); estimativa do valor da produção ( $w_{ai}$ ); pressão de operação ( $P_0$ ); distância até a estação de compressão ( $L_o$ ); porcentagem de vegetação na zona crítica (%Veg); constante de proporcionalidade entre o cenário e a seção ( $\beta$ ); número

máximo de pessoas presentes na zona de perigo ( $\eta_{ai}$ ); probabilidade de que uma pessoa presente na zona de perigo seja atingida devido a ocorrência de acidente ( $\alpha_{ai}$ ); pressão de vapor de água saturada ( $P_w$ ); e umidade relativa (RH).

Um resultado interessante para esse caso foi verificado, de forma que apenas um desses parâmetros demonstrou-se sensível dadas as variações de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , conforme pode ser observado na Tabela 3.33. O parâmetro *número máximo de pessoas presentes na zona de perigo* ocasionou mudança no resultado original do modelo quando seus parâmetros foram submetidos a variação de  $+30\%$  e a partir de  $-20\%$ . Para a variação de  $+30\%$ , as seções 5 e 1 inverteram sua ordem e para as variações de  $+20\%$  e  $+30\%$  ocorreu inversão das seções 2 e 1. Além do mais, ocorreu mudança no valor da razão das diferenças para as seções 6, 2 e 1 em todas as variações. Sendo que todas as outras variáveis citadas anteriormente podem ser consideradas robustas para essa aplicação.

Tabela 3.33: Resultado da análise de sensibilidade para  $\eta_{ai}$  da Aplicação 4.

Variação do parâmetro			Ordenamento Original	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
Razão -1 posição	Razão -1 posição	Razão Razão	Seção 6 Seção 2	Razão Razão Razão	Razão Razão Razão	Razão Razão Razão
+1 posição	+1 posição	Razão Razão	Seção 1 Seção 5	Razão Razão Razão	Razão Razão Razão	-1 posição +1 posição
Robusto Robusto	Robusto Robusto	Robusto Robusto	Seção 4 Seção 7	Robusto Robusto Robusto	Robusto Robusto Robusto	Robusto Robusto Robusto
Robusto Robusto	Robusto Robusto	Robusto Robusto	Seção 3	Robusto Robusto Robusto	Robusto Robusto Robusto	Robusto Robusto Robusto

Para essa aplicação foram considerados dez cenários de perigo, sendo eles detonação/deflagração, *jet fire*, CVCE, *flash fire* e dispersão de gás, cada um deles podendo ser causado por dois modos de falha: ruptura e furo. Em relação às variáveis e parâmetros que tem seus valores dependentes da seção do gasoduto e do cenário de perigo, que são fluxo de radiação de calor ( $I$ ), a constante que relaciona a seção e o cenário de perigo ( $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$ ), a constante que representa o inverso do tempo necessário para apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk}, a_i}$ ), a constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ ), a taxa de liberação de gás ( $R$ ) e a proporção do tamanho do furo ( $\alpha$ ); apenas uma delas ocasionou variação do resultado final.

O parâmetro que proporcionou variação do resultado final do modelo original foi  $z_i$ , que representa o *inverso do tempo de apagamento das chamas*. Essa variação foi apenas no cenário CVCE causado por furo quando a variação foi de -10% até -30%. Porém, essa variação ocorreu somente na razão das diferenças não sendo suficiente para ocasionar variação na ordenação das seções do gasoduto.

Para as constantes de escala, os resultados foram os seguintes. Para a constante de escala humana, conforme apresentado na Tabela 3.34, apenas nas variações de -20% e -30% ocorreram mudanças na ordenação das seções do gasoduto, e nas outras variações ocorreu mudança na razão das diferenças para as seções em que foi calculado.

Tabela 3.34: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala humana para a Aplicação 4.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
-1 posição	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
-1 posição	-1 posição	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
+2 posições	+1 posição	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto

Em relação a constante de escala ambiental, se observou que não ocorreram mudanças na ordenação das seções em todas as variações realizadas, conforme demonstrado na Tabela 3.35, porém em todas as seções ocorreu variações nas razões das diferenças.

Tabela 3.35: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala ambiental para a Aplicação 4.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto

E, finalmente, a constante de escala financeira, que apresenta mudança no valor das razões das diferenças, mas não apresenta mudança na ordenação das seções, como apresentado na Tabela 3.36.

Tabela 3.36: Resultado da análise de sensibilidade para a constante de escala financeira para a Aplicação 4.

Variação do parâmetro			Ordenação	Variação do parâmetro		
-30%	-20%	-10%	Original	10%	20%	30%
Razão	Razão	Razão	S6	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S2	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S1	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S5	Razão	Razão	Razão
Razão	Razão	Razão	S4	Razão	Razão	Razão
Robusto	Robusto	Robusto	S7	Robusto	Robusto	Robusto
Robusto	Robusto	Robusto	S3	Robusto	Robusto	Robusto

## **4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE**

A discussão apresentada a seguir está embasada em quatro estudos de caso e, mesmo que houvesse um número maior de casos (ficando inviabilizado para esse trabalho), não seria possível afirmar que uma variável ou parâmetro pode ser eliminado do modelo. Também não é possível afirmar que possa passar a receber valores constantes ao invés de eliciar junto ao decisor os valores ou a utilização de dados históricos para preenchimento de determinados valores. Para realizar essa eliminação ou fixação de valores é necessário que sejam feitas análises profundas para cada uma dessas variáveis e parâmetros, além disso garantir que o software desenvolvido para aplicação do modelo não contenha nenhum tipo de erro.

Dessa maneira, o que será apresentado em seguida é um *insight* para estudos futuros de simplificação do modelo, dado que foram identificadas informações interessantes sobre as variáveis e parâmetros com a análise de sensibilidade realizada nesse estudo. Dizer que uma variável ou parâmetro é robusto, está se referindo a não ocorrência de mudança no resultado final do modelo dado variações nos valores de entrada originais, e dizer que há sensibilidade é a afirmação de que a ordenação das seções do gasoduto em termos de risco foi modificada. Também pode existir a mudança no valor da razão das diferenças para as seções, o que significa que o resultado final foi modificado, porém não mudou a ordenação das seções.

Assim, o Quadro 4.1 apresenta as variáveis e parâmetros do modelo em três classes: sensível, robusta e variação da razão, de acordo com os respectivos resultados da análise de sensibilidade apresentados anteriormente neste trabalho.

Quadro 4.1: Caracterização das variáveis/parâmetros quanto ao resultado da análise de sensibilidade

Sensível	Robusta	Variação da razão
Diâmetro ( $d$ )	Pressão de Vapor de água saturada ( $P_w$ )	Distância até a estação de compressão a montante ( $L_0$ )
Porcentagem de Vegetação (%Veg)	Umidade relativa ( $RH$ )	Fluxo de radiação de calor ( $I$ )
Número máximo de pessoas presentes na zona de perigo ( $\eta_{a_i}$ )	Estimativa de probabilidade de que uma pessoa presente na zona de perigo seja atingida devido a ocorrência de acidente ( $\alpha_{a_i}$ )	Constante associada ao cenário e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ )
Pressão de operação ( $P_0$ )	Extensão total da seção ( $L_{a_i}$ )	Inverso do tempo de apagamento das chamas ( $g_{\theta_{jk},a_i}$ )
Constante de escala humana ( $k_h$ )	Vazão regular do gás ( $Q$ )	Constante de escala ambiental ( $k_e$ )
Constante de escala financeira ( $k_f$ )	Valor médio de venda do gás ( $v$ )	
	Estimativa do valor de produção ( $w_{a_i}$ )	
	Constante de proporcionalidade ( $\beta$ )	
	Constante de proporcionalidade que associa $t_R$ e $t_Q$ ( $z_j$ )	
	Taxa de liberação do gás a partir do furo/ruptura ( $R$ )	
	Proporção do tamanho do furo ( $\alpha$ )	

Primeiramente serão discutidas as variáveis e parâmetros que não demonstraram sensibilidade, cujos dados foram apresentados na seção 3.3 desse trabalho para todas as aplicações estudadas. Não demonstrar sensibilidade significa que, apesar de os valores para essas variáveis e parâmetros terem sido alterados, na maioria dos casos em um intervalo de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$ , não proporcionou mudança no resultado final quando comparado ao modelo original. Neste momento não serão alvo da análise os parâmetros e variáveis que apresentam características de sensibilidade ou de mudança na razão das diferenças em pelo menos um dos casos estudados.

Os parâmetros Umidade Relativa ( $RH$ ) e Pressão de vapor de água saturada ( $P_w$ ) são componentes de uma mesma equação, destinada ao cálculo da transmissividade atmosférica ( $\tau_a$ , Equação 3.9), necessária para o Fluxo de calor irradiado ( $I$ ). Devido as características dessa equação, esses dois parâmetros não podem receber valor nulo, pois são base de um expoente negativo e, nesse caso, não existe essa operação matemática.

Jo & Ahn (2002) propuseram que, para um cálculo conservador, o valor da transmissividade atmosférica fosse igualado a um. Nesse caso o valor da multiplicação entre *CDR*, *P<sub>w</sub>* e *RH* deve ser pequeno o bastante para que quando elevado a -0,09 da Equação 3.9 e multiplicado 2,02 retorne um valor igual, ou pelo menos próximo de um. Considerando que o *CDR* não toma valores menores que 20m para as quatro aplicações e que não supera 60m, o valor da multiplicação entre *P<sub>w</sub>* e *RH* fica entre aproximadamente 121 e 41, valores muito diferentes dos adotados pelo modelo, para que o valor da transmissividade atmosférica ficasse próximo de um.

Considerando que a transmissividade atmosférica fique com valor igual a um, a Equação 3.8 do cálculo do fluxo de calor irradiado assumiria a seguinte forma:

$$I = \frac{1,0004 \cdot 10^7 \times Q_{eff}}{4 \times \pi \times (CDR)^2} \quad (4.1)$$

Os novos resultados para o modelo utilizando essa equação para as quatro aplicações avaliadas, resultam em variação do resultado final do modelo no sentido de que ocorreram mudanças nos valores da razão das diferenças das seções de cada uma das aplicações.

É possível avaliar que as variações feitas nos parâmetros no intervalo de  $\pm 10\%$  e  $\pm 30\%$  não foram suficientes para ocasionar mudanças no resultado final, uma vez que essas variações resultam em mudanças nas casas decimais do valor da transmissividade atmosférica, não proporcionando alterações no resultado final. O que se pode concluir é que a variável  $\tau_a$  (transmissividade atmosférica) não é sensível. Mas pode-se indicar como trabalho futuro a averiguação da utilização desse valor como fixo, para não ser necessário avaliar junto ao decisior, ou de referências na literatura dos valores de *RH* e *P<sub>w</sub>* para preencher esses dados de entrada do modelo.

O parâmetro  $\alpha$  (que é a proporção do tamanho do furo obtido pela razão da área efetiva do furo pela área transversal do duto) também se demonstrou robusto quando feita a avaliação da sensibilidade nos quatro casos estudados. Isso ocorre devido o fato do valor atribuído a esse parâmetro ser muito pequeno, e alternações

no âmbito de  $\pm 10\%$  até  $\pm 30\%$  não foram suficientes para mudar o resultado final do modelo.

Porém, esse é um parâmetro que é utilizado no cálculo do  $Q_{eff}$  (taxa efetiva e vazamento do gás) e, consequentemente, influencia no cálculo do fluxo de radiação de calor ( $I$ ). Dessa maneira, não é possível atribuir valor igual a zero, pois o valor de  $I$  seria zero, além disso, não haveria existência de furo ou ruptura se  $\alpha$  fosse igual a zero. Extrapolando esses valores para mais, observou-se que ocorreu mudança nas razões das diferenças das seções no resultado final do modelo, indicando que quanto maior for a proporção do tamanho do furo em relação ao diâmetro do duto, maior vai ser o fluxo de radiação de calor.

Dessa forma, dada a futura avaliação de possíveis remoções de variáveis e de parâmetros do modelo, não seria aconselhável começar o estudo por esse parâmetro. E quando se está analisando os dados para alimentar o SAD, os valores utilizados devem ser obtidos com cuidado, seja por elicitação com o decisor ou por dados históricos, apesar da sua não sensibilidade para valores muito próximos ao que já foram utilizados nas aplicações que foram estudadas nesse trabalho.

O parâmetro que representa a estimativa de probabilidade de que uma pessoa estando na zona de perigo seja atingida pela radiação ( $\alpha_{a_i}$ ) mostrou-se ser robusto nos quatro casos estudados. Isso pode ser provocado pela quantidade de variáveis e parâmetros que o modelo apresenta, ficando mais restrita as variações e alguns deles, principalmente quando este é utilizado no cálculo das consequências de apenas uma das dimensões de risco, que é o caso desse parâmetro.

Além dessas variáveis e parâmetros apresentados, existem outros que estão diretamente ligados com a dimensão de risco financeiro. A maioria dos parâmetros robustos está atrelada a essa dimensão e, de uma forma geral, poder-se-ia iniciar as avaliações futuras para o modelo por essa dimensão. Essa sugestão parte do fato de que de todos os parâmetros que resultaram ser robustos, sete entram apenas no cálculo dessa dimensão, além do que existe uma grande quantidade de parâmetros quando comparados com as outras dimensões, tornando a dimensão menos sensível a mudanças nos valores.

Dentre eles encontra-se o parâmetro  $L_{a_i}$  (que representa a extensão total da seção), utilizado no cálculo do faturamento cessante ( $F(t_Q)$ ) e na função consequência financeira. Na equação do faturamento cessante (Equação 3.17),

esse parâmetro é utilizado para calcular a perda que a empresa terá devido a quantidade de gás presente na seção, pois todo o gás deve ser liberado para que o funcionamento operacional do gasoduto retorne a normalidade. Então esse parâmetro nunca terá valor igual a zero, se isso ocorresse seria o mesmo que dizer que a seção não existe. Ele torna-se robusto principalmente pelo fato de ser uma pequena contribuição para o resultado final do modelo, pertencente somente em duas equações.

O parâmetro  $R$  (taxa de liberação de gás a partir do furo ou ruptura) tem a mesma característica que o parâmetro anteriormente comentado, de forma que é parte integrante da equação do cálculo do faturamento cessante e da função consequência financeira. A parcela que ele representa na equação é em relação a perda que a empresa tem em dinheiro até que seja identificado o vazamento e que as válvulas façam a interrupção da passagem do gás. Quanto maior for o valor de  $R$ , maior será a perda, pois maior quantidade de gás será liberada pra o meio ambiente. A provável causa de não ocasionar mudança no resultado final seja devido ao fato de que o parâmetro representa uma pequena parcela de uma equação, não impactando no resultado final do modelo.

Outro parâmetro que demonstrou ser robusto na análise de sensibilidade para todos os casos estudados foi a vazão regular do gás ( $Q$ ). O estudo preliminar indicou que variações em até  $\pm 30\%$  não proporcionam mudança no resultado final, fez-se variações extremas para ver o comportamento do resultado. Atribuindo valor igual a zero para esse parâmetro, isso ocasionaria a eliminação de um dos termos que compõe a equação do faturamento cessante e também mudaria o valor para a função consequência da dimensão financeira mas, mesmo assim, não o suficiente para modificar o resultado final do modelo. Assim como uma variação muito grande comparada aos valores originais  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , também não ocasionou mudança no resultado do modelo para os quatro casos estudados.

O preço médio de vendas do gás ( $v$ ) é outro parâmetro que apresentou características de robustez na análise de sensibilidade desse trabalho. Transformando o valor atribuído ao parâmetro em zero (para avaliar o comportamento desse em casos extremos), verifica-se que a Equação 3.17 (para o cálculo do faturamento cessante) torna-se nula, pois está presente em todos os termos da equação. Porém, foi verificado que não há mudança no resultado final do

modelo original fazendo essa variação para os quatro casos estudados, assim como quando atribui-se valores muito grandes para essa variável. Esse fato pode ser futuramente investigado mais profundamente mas, por hora, pode-se considerar que isso ocorre pelo fato do modelo possuir um número muito grande de variáveis e parâmetros, principalmente relativos a dimensão financeira e, talvez, essas mudanças não sejam suficientes para alterar o resultado final.

Outro parâmetro presente na função consequência financeira é a estimativa do valor de produção ( $w_{a_i}$ ), que representa a perda em termos monetários da produção que a empresa terá devido ao não fornecimento de gás. Está presente no cálculo da Equação 3.18, e da função consequência, sendo que quando o valor atribuído a esse parâmetro for zero, significa que não ocorrem perdas financeiras; nesse sentido, não haveria perda de produção com o acontecimento do acidente. Fato esse muito improvável que ocorra, pois transformaria a equação citada em nula. No entanto, como medida de teste, atribuindo valor igual a zero e fazendo o cálculo do risco pelo modelo, observou-se que não ocorrem mudanças no resultado final, levando-se às mesmas considerações feitas para o parâmetro  $v$ , de que por haver muitos parâmetros no modelo, essas alterações podem não impactar no resultado final.

A constante de proporcionalidade  $\beta$  é utilizada na Equação 3.18 para que o resultado dessa equação seja fornecido em R\$, por isso recebe o nome de constante de proporcionalidade. Logo, se essa constante receber valor igual a zero, essa equação será zerada, não havendo perdas na produção e, caso ela tenha valor igual a um, não teria sentido sua existência na equação, pois não transforma o resultado para o que se deseja com sua presença. Porém, atribuindo esses dois valores extremos aos casos estudados para avaliar os resultados provenientes dessas modificações, observou-se que nenhuma mudança ocorre no resultado final do modelo. Poder-se-ia, ao invés de eliminar esse parâmetro do modelo, investigar a possibilidade de assumir valores constantes baseados na literatura para fazer essa conversão e não precisar eliciar esse valor junto ao decisor. Lembrando que isso é uma sugestão para simplificar o modelo, de forma que qualquer mudança a ser feita deve ser investigada profundamente antes de ser implementada.

E, por fim, o parâmetro que é uma constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ ). Esse parâmetro está presente em quatro equações diferentes,

que são 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18. Caso ele não existisse, ou seja, assumisse valor igual a zero, essas equações sofreriam mudanças e ficariam da seguinte forma, respectivamente:

$$\xi = \beta \times I \times A_{a_i} \quad (4.2)$$

$$\varphi = v \times R \times t_i \quad (4.3)$$

$$F(t_Q) = (v \times R \times t_i) + \left( v \times L_{a_i} \times \frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (4.4)$$

$$W(t_Q) = 0 \quad (4.5)$$

Como pode ser visto na última equação, zerar  $z_i$  transformaria o valor das perdas atreladas à produção em nulas, porém, mesmo aplicando essa situação nas aplicações utilizados no trabalho, não resultou em mudança na ordenação final de risco. Além de que essas mudanças nas equações anteriormente mostradas afetariam a equação do cálculo da função consequência financeira.

É importante frisar que não podem ser tiradas conclusões sobre remover uma variável ou parâmetro do modelo com essas avaliações, pois mesmo que fosse analisadas uma grande quantidade de casos, não se poderia ter essa atitude. Porém, esses resultados informam por onde começar uma análise profunda de cada uma das variáveis e dos parâmetros do modelo futuramente, que é o objetivo desse trabalho, promover um *insight* para trabalhos futuros.

De acordo com o Quadro 4.1, apresentado anteriormente, quatro parâmetros podem ser considerados como sensíveis, isso porque em pelo menos um dos casos apresentados, uma modificação no valor de entrada desse parâmetro modificou a ordenação do resultado final original do modelo. Esses parâmetros são o *diâmetro*, *pressão de operação*, *porcentagem de vegetação presente na zona de perigo* e *número máximo de pessoas presentes na zona de perigo*. Embora possam ter ocorrido resultados totalmente diferentes em cada um dos casos, de por exemplo mudança na ordenação para um e ser robusto para outro, pode-se dizer que não é interessante começar por esses parâmetros um futuro trabalho para análise mais aprofundada de todas as variáveis e parâmetros do modelo. O que não significa dizer que esses parâmetros não devem ser reavaliados.

Os parâmetros e variáveis que apresentaram apenas mudança na razão das diferenças para as seções do gasoduto foram a variável *fluxo de radiação de calor*, *distância até a estação de compressão*, *constante associada ao cenário e a seção*, *inverso do tempo de apagamento das chamas*, além da constante de escala

ambiental. Isso significa que a variação feita não foi suficiente para ocasionar mudança na ordenação das seções, porém o valor do risco associado às seções teve mudança em relação ao resultado do modelo original.

Em relação as constantes de escala, já era de se esperar que ocorressem mudanças nos resultados finais dado variações nos valores originais das aplicações, isso porque o valor da constante de escala interferem diretamente no valor final do risco, como é apresentado na equação do cálculo do risco (Equação 3.22). Essa verificação foi feita com o intuito de comprovar a sensibilidade dessas constantes, no entanto, a remoção ou adoção de valores constantes no modelo não tem sentido, perdendo a essência da utilização delas no modelo. Isso comprova que a elicitação das constantes de escala deve ser um processo bem estruturado e que aproximações em valores podem ocasionar modificações no resultado, sendo necessária atenção tanto do analista quanto do decisor no momento de atribuição desses valores. Por esse, motivo o SAD desse modelo possui um processo de elicitação da função utilidade e das constantes de escala bem estruturado, de acordo com o que diz a teoria de Keeney & Raiffa (1976).

Uma análise que pode ser feita é a substituição do parâmetro que representa a taxa de liberação do gás a partir do furo ( $R$ ) por uma combinação dos parâmetros  $\alpha$  (Proporção do tamanho do furo) e  $Q$  (Vazão regular do gás). Poder-se-ia pesquisar na literatura e existência da relação entre esses parâmetros para não eliminá-la do modelo, mas manter como se fosse um cálculo intrínseco ao modelo, sem necessitar eliciar com o decisor esses valores. Uma vez que parece existir uma relação entre o tamanho do furo e a taxa de liberação do gás que possa ocorrer por ele.

## 5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

### 5.1 Conclusões

Com esse trabalho foi possível concluir que um modelo de apoio à decisão é possível de ser utilizado no cenário de avaliação de riscos atrelados ao transporte de gás por gasodutos, em que, apesar de serem de ocorrência rara, possuem consequências de proporções grandiosas, envolvendo mortes, ferimentos, danos ao meio ambiente e perdas financeiras. A utilização de multicritérios, através de um método de apoio a decisão que engloba incertezas envolvidas no processo de tomada de decisão, nesse caso a Teoria da Utilidade Multiatributo, permitiu incluir no processo a característica do decisor em relação a propensão ao risco, além de incluir no modelo vários critérios, tornando-o mais completo.

No entanto, a inclusão de diferentes critérios e de várias etapas para se chegar a uma ordenação hierárquica de risco, torna o modelo muito complexo e com uma quantidade grande de parâmetros e variáveis. Isso acarreta na demanda de tempo e de conhecimento por parte do decisor e do especialista para a elição de informações preferenciais e de probabilidades de ocorrência de acidentes nos gasodutos. Sendo que, pequenas mudanças nos valores originais de alguns desses parâmetros não proporciona variação do resultado final, ocasionado por essa grande quantidade de parâmetros do modelo.

Foi possível constatar esse fato através da análise de sensibilidade simples realizada em quatro casos em que o modelo de decisão apresentado foi utilizado. Algumas variáveis e parâmetros foram caracterizados como robustos, tais como Pressão de Vapor ( $P_w$ ), Umidade relativa ( $RH$ ), Extensão total da seção ( $L_{a_i}$ ), Taxa de liberação do gás a partir do furo/ruptura ( $R$ ), entre outras; constatando-se que dentre todas que estão classificadas como robustas a maior parte estão diretamente relacionadas com a dimensão financeira. Essa classe de variáveis e parâmetros é o foco para o estudo futuro para a simplificação do modelo, pois realizando mudança nos valores originais não ocorreu variação da ordenação final das seções, nem da razão das diferenças para cada uma das seções.

Outras variáveis foram identificadas como sensíveis, tais como Diâmetro ( $d$ ), Porcentagem de Vegetação (%Veg), Pressão de operação ( $P_o$ ), entre outras; e dessa forma precisam receber atenção especial por parte do decisor e do

especialista no momento de avaliação dos valores, uma vez que pequenas diferenças nos valores adotados podem gerar mudanças no resultado final do modelo. Essa mudança é referente a tornar uma seção do gasoduto mais prioritária que outra, mudando a necessidade de atenção quando da análise para mitigação dos riscos e gerenciamento de recursos.

Também tiveram variáveis e parâmetros que não puderam ser caracterizadas como essas duas classes acima, tais como distância até a estação de compressão a montante ( $L_0$ ), Constante associada ao cenário e a seção ( $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$ ), entre outras, pois mudanças nos seus valores ocasionaram variação no valor na razão das diferenças para as seções, consequentemente, o valor do risco para as seções também mudou. Essa classe pode ser alvo da avaliação da sensibilidade através de outro método, como por exemplo, a análise de sensibilidade global através de Simulação Monte Carlo, para que possa ser analisado o seu comportamento quando os valores assumem diferentes valores ao mesmo tempo em que outros parâmetros.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Com a presente pesquisa observou-se que algumas ideias para trabalhos futuros surgiram, dentre elas:

- Realizar uma análise de sensibilidade global, de forma que métodos estatísticos possam ser utilizados para gerar dados aleatórios para mais de uma variável ou parâmetro ao mesmo tempo, a fim de identificar o comportamento do resultado do modelo frente a variação de determinadas variáveis e parâmetros simultaneamente;
- Produzir uma análise profunda de cada uma das variáveis e parâmetros principalmente, daqueles que demonstraram ser robustas neste estudo;
- Averiguar profundamente normas internacionais na busca por *insights* para a simplificação do modelo apresentado neste trabalho;
- Desenvolver um Sistema de Apoio à Decisão que possua uma aba para análise de sensibilidade global;
- A partir dos dados produzidos neste trabalho, em conjunto com a análise de sensibilidade global, propor um método para eliminação de parâmetros do modelo de análise de risco multidimensional em gasoduto de gás natural;

- Produzir um modelo simplificado para análise de risco multidimensional em gasodutos de gás natural;
- Replicar o estudo em modelos para outros tipos de gases transportados por gasoduto, como por exemplo, o Hidrogênio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEGAS (2012). *Relatório ABEGÁS: Mercado e distribuição, Ano VI, Nº 51*. Acesso em 10 de Fevereiro de 2013, disponível em Associação Brasileira das Empresas distribuidoras de Gás Canalizado.
- Alencar, M. H., & Almeida, A. T. (2010). Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, pp. 3610-3619.
- Alencar, M. H., & Almeida, A. T. (2012). *Manual de Utilização do Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento de Risco Multidimensional em Gasodutos de Gás Natural*. Relatório Interno CDSID, Recife.
- Alencar, M. H., Krym, E. M., Marsaro, M. F., & Almeida, A. T. (2013). Multidimensional risk evaluation in natural gas pipelines: environmental aspects observed through a multicriteria decision model. *Anuais The Annual European Safety and Reliability Conference*.
- Almeida, A. T. (2013). *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*. (1 ed.). São Paulo: Atlas.
- American Society Mechanical Engineering. (2010). Managing System Integrity of Gás Pipeline. *Code for Pressure Piping, B31.8s Supplement to ASME B31.8*. United States.
- American Society of Mechanical Engineering. (2010). Gas Transmission and Distribution Piping Systems. *Code for pressure Piping, B31.8*. United States.
- Aminbakhsh, S., Gunduz, M., & Sonmez, R. (2013). Safety risk assessment using analytic hierarchy process (AHP) during planning and budgeting of construction projects. *Journal of Safety Research*, pp. 99-105.
- ANEEL. (2013). *Matriz de Energia Elétrica*, 6 fev. 2013. Disponível em . Acesso em 10 fev. 2013. Acesso em 10 de Fevereiro de 2013, disponível em Agência Nacional de Energia Elétrica: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>

- Antonioni, G., Bonvicini, S., Spadoni, G., & Cozzani, V. (2009). Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events. *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 1442-1450.
- Arnaldos, J., Casal, J., Montiel, H., Sánchez-Carricando, M., & Vílchez, J. A. (1998). Design of a computer tool for the evaluation of the consequences of accidental natural gas releases in distribution pipes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 135-48.
- Aven, T. (2009). Perspectives on risk in a decision-making context – Review and discussion. *Safety Science*, pp. 798-806.
- Aven, T. (2010). On how to define, understand and describe risk. *Reliability Engineering Safety System*, pp. 623-631.
- Aven, T. (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering Safety System*, 99, pp. 33-44.
- Aven, T., & Krohn, B. S. (2014). A new perspective on how to understand, assess and manage risk and the unforeseen. *Releability Engineering Safety System*, 121, pp. 1-10.
- Badri, A., Nadeau, S., & Gbdossou, A. (2012). Proposal of a risk-factor-based analytical approach for integrating occupational health and safety into project risk evaluation. *Accident Analysis & Prevention*, pp. 223-234.
- Badri, N., Rad, A., Kareshki, H., Abdolhamidzadeh, B., Parvizsedghy, R., & Rashtchian, D. (2013). A risk-based decision making approach to determine fireproofing requirements against jet fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 771-781.
- Barrette, P. (2011). Offshore pipeline protection against seabed gouging by ice: An overview. *Cold Regions Science and Technology*, 69(1), pp. 3-20.
- Batzias, F., Siontorou, C., & Spanidis, P. M. (2011). Designing a reliable leak bio-detection system for natural gas pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 35-58.
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers.
- Box, G. E., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. New York: Wiley.

- British Standard Institution. (2003). Petroleum and natural gas industries - Pipeline Transportation system. *BS EN 14161*.
- British Standards Institution. (2009). Code of practice for pipelines Part 3: Steel pipelines on land – Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables. *PD 8010-3*.
- Brito, A. J. (2007). Avaliação multicritério de riscos em gasodutos de gás natural: uma abordagem de classificação com Electre Tri. *Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção*. Recife.
- Brito, A. J. (2009). Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipeline. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 187-198.
- Brito, A. J., Almeida, A. T., & Mota, C. M. (2009). A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. *European Journal of Operational Research*, 200, pp. 812-821.
- Brown, S., Beck, J., Mahgerefteh, H., & Fraga, E. S. (2013). Global sensitivity analysis of the impact of impurities on CO<sub>2</sub> pipeline failure. *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 43-54.
- Cailloux, O., Mayagb, B., Meyerc, O., & Mousseau, V. (2013). Operational tools to build a multicriteria territorial risk scale with multiple stakeholders. *Reliability Engineering & System Safety*, 120, pp. 88-97.
- Campolongo, F., Saltelli, A., & Cariboni, J. (2011). From screening to quantitative sensitivity analysis. A unified approach. *Computer Physics Communications*, 182, pp. 978-988.
- Crestaux, T., Maitre, O. L., & Martinez, J. M. (2009). Polynomial chaos expansion for sensitivity analysis. *Reliability Engineering Safety System*, 94, pp. 1161-1172.
- Doumpos, N., & Zopounidis, C. (2001). Assessing financial risks using a multicriteria sorting procedure: the case of country risk assessment. *Omega*, 29(1), pp. 97-109.
- Eldevik, F., Graver, B., Torbergsen, L. E., & Saugerud, O. T. (2009). Development of a Guideline for Safe, Reliable and Cost Efficient Transmission of CO<sub>2</sub> in Pipelines. *Energy Procedia*, pp. 1579-1585.

- Ersdal, G., & Aven, T. (2008). Risk informed decision-making and its ethical basis. *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 197-205.
- Garcez, T. V. (2009). Desenvolvimento de estudo para gerenciamento de risco em gasoduto de um sistema de distribuição de gás natural. *Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção*. Recife.
- Gas Research Institute. (2000). A model for sizing hight consequence areas associated with natural gas pipeline. *GRI-00/0189*.
- Gheorghe, A. V., Birchmeier, J., Vamanu, D., Papazoglou, I., & Krögera, W. (2005). Comprehensive risk assessment for rail transportation of dangerous goods: a validated platform for decision support. *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 247-272.
- Gomes, W. J., Beck, A. T., & Haukaas, T. (2013). Optimal inspection planning for onshore pipelines subject to external corrosion. *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 18-27.
- Hampel, J. (2006). Different concepts of risk – A challenge for risk communication. *International Journal of Medical Microbiology*, pp. 5-10.
- Han, Z. Y., & Weng, W. G. (2010). An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 428-436.
- Han, Z. Y., & Weng, W. G. (2012). Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 509-518.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2006). *Introdução à pesquisa operacional* (8<sup>a</sup> ed.). (A. Griesi, Trad.) São Paulo: McGraw-Hill.
- Homma, T., & Saiteli, A. (1996). Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering and Safety System*, 52, pp. 1-17.
- Jo, Y. D., & Ahn, B. J. (2002). Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15, pp. 179-186.
- Jo, Y. D., & Ahn, B. J. (2005). A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 1-12.

- Jo, Y. D., & Ahn, B. J. (2006). Analysis of hazard area associated with hydrogen gas transmission pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 2122-2130.
- Jo, Y. D., & Crowl, D. A. (2008). Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 28, 589-595.
- Jones-Lee, M., & Aven, T. (2009). The role of social cost–benefit analysis in societal decision-making under large uncertainties with application to robbery at a cash depot. *Reliability Engineering and Safety System*, pp. 1954-1961.
- Jonkman, S. N., Gelderb, P. H., & Vrijlingb, J. K. (2003). An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, 99(1), pp. 1-30.
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decision with Multiple Objectives: Preferences and value trade-offs*. John Wiley & Sons.
- Koornneef, J., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2012). The environmental impact and risk assessment of CO<sub>2</sub> capture, transport and storage e An evaluation of the knowledge base. *Progress in Energy and Combustion Science*, pp. 62-86.
- Koornneef, J., Spruijt, M., Molag, M., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2010). Quantitative risk assessment of CO<sub>2</sub> transport by pipelines—A review of uncertainties and their impacts. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 12-27.
- Krym, E. M., Alencar, M. H., & Almeida, A. T. (2012). Aplicação de modelagem multicritério para análise de riscos multidimensionais em gasodutos de Gás Natural. *Anais do Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa e Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.
- Liang, W., Hu, J., Laibin, Z., Guo, Z., & Lin, W. (2012). Assessing and classifying risk of pipeline third-party interference based on fault tree and SOM. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 594-608.
- Lins, P. H., & Almeida, A. T. (2012). Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines based on multiattribute utility function. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, pp. I3545 - I3554.
- Lopes, Y. G. (2008). Sistema de Apoio a Decisão para Análise de Riscos em Gasodutos. *Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Universidade Federal de*

- Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Recife.
- Ma, L., Li, Y., Liang, L., Li, M., & Cheng, L. (2013). A novel method of quantitative risk assessment based on grid difference of pipeline sections. *Safety Science*.
- Ma, L., Ling, L., & Li, M. (2013). Quantitative risk analysis of urban natural gas pipeline networks using geographical information systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
- Macedo, D. (11 de Janeiro de 2013). *Agência Brasil: empresa Brasil de comunicação*. Acesso em 01 de Fevereiro de 2013, disponível em Agência Brasil: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2013-01-11/ministro-de-minas-e-energia-durante-racionamento-de-2001-diz-que-nao-da-para-comparar-os-dois-periodo>
- Marhavilas, P. K., & Koulouriotis, D. (2008). A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: Application in an aluminum extrusion industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21, pp. 596-603.
- Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, pp. 477-523.
- Mattei, N., M. Schiavetti, M., & Carcassi, M. N. (2011). Experimental studies on wind influence on hydrogen release from low pressure pipelines. *International journal of hydrogen energy*, pp. 2414-2425.
- Medina, H., Arnaldos, J., Casal, J., Bonvicini, S., & Cozzani, V. (2012). Risk-based optimization of the design of on-shore pipeline shutdown systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(3), pp. 489-493.
- Melchers, R. E. (2001). On the ALARP approach to risk management. *Reliability Engineering Safety System*, 71, pp. 201-208.
- Milazzo, M. F., & Aven, T. (2012). An extended risk assessment approach for chemical plants applied to a study related to pipe ruptures. *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 183-192.

- Noronha Jr., D. B., Martins, R. R., Jacob, B. P., & Souza, E. d. (2010). Procedures for the strain based assessment of pipeline dents. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 254-265.
- Qiang, W., & Wang, M. (2007). A framework for risk assessment on soil erosion by water using an integrated and systematic approach. *Journal of Hydrology*, pp. 11-21.
- Reniers, G. L., Dullaert, W., Ale, B., & Sudão, K. (2005). Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, pp. 127-138.
- Rogerson, E. C., & Lambert, J. H. (2001). Prioritizing risks via several expert perspectives with application to runway safety. *Reliability Engineering Safety System*, 103, pp. 22-34.
- Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for decision Aiding*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2004). *Sensitivity analysis in practice: A guide to Assessing Scientific Models*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Scenna, N. J., & Cruz, A. S. (2005). Road risk analysis due to the transportation of chlorine in Rosario city. *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 83-90.
- Shebeko, Y. N., Bolodian, I. A., Molchanov, V. P., Deshevih, Y. I., Gordienko, D. M., Smolin, I. M., et al. (2007). Fire and explosion risk assessment for large-scale oil export terminal. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 651-658.
- Sklavounos, S., & Rigas, F. (2006). Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 24-31.
- Souza, F. M. (2007). *Decisões Racionais em Situações de Incerteza* (2<sup>a</sup> ed.). Recife: Editora Universitária.
- Sudret, B. (2008). Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability Engineering and Systems Safety*, 93(7), 964-979.
- Taveau, J. (2010). Risk assessment and land-use planning regulations in France following the AZF disaster. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 813-823.

- Tsao, C. K., & Perry, W. W. (1979). Modifications to the vulnerability model: A simulation system for assessing damages resulting from marine spills. ADA 075231. *US Coast Guard NTIS Report Number CG-D-38-79*.
- Tugnoli, A., Cozzan, V., Padova, A. D., Barbaresi, T., & Tallone, F. (2012). Mitigation of fire damage and escalation by fire proofing: A risk-based strategy. *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 25-35.
- Verma, M., & Verter, V. (2007). Railroad transportation of dangerous goods: Population exposure to airborne toxins. *Computers & Operations Research*, pp. 1287-1303.
- Vincke, P. (1992). *Mutlicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons.
- Yang, S., Fang, Q., Wu, H., Zhang, Y., & Xiang, H. (2013). An integrated quantitative hazard analysis method for natural gas jet release from underground gas storage caverns in salt rock. II: A sample computation and parametric study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 68-73.
- Zayed, T., Amer, M., & Pan, J. (2008). Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. *International Journal of Project Management*, pp. 408-419.
- Zhang, H., Gao, D., & Liu, W. (2012). Risk assessment for Liwan relief well in South China Sea. *Engineering Failure Analysis*, pp. 63-68.
- Zopounidis, D. e. (2001). Assessing financial risks using a multicriteria sorting procedure: the case of country risk assessment. *The international Journal of Management Science*, 29, pp. 97-109.

## ANEXO 1: Dados referentes a aplicação 1

Neste anexo serão apresentadas as tabelas que descrevem o primeiro modelo de aplicação apresentado no trabalho, com o objetivo de demonstrar os valores para cada uma das seções, caso seja necessário.

Tabela A1.1: Valores para a Probabilidades de cenário accidental e de normalidade operacional ocasionado por furo.

<b>Seção</b>	<b>Normalidade</b>	<b>Detonação/Deflagração</b>	<b>Jato de fogo</b>	<b>CVCE</b>	<b>Flash Fire</b>	<b>Dispersão</b>
<b>S1</b>	0,998741098	2,45E-06	7,58E-05	1,11E-04	1,18E-06	7,30E-04
<b>S2</b>	0,998679207	2,70E-06	7,89E-05	1,16E-04	1,22E-06	7,59E-04
<b>S3</b>	0,998719434	2,66E-06	7,70E-05	1,22E-04	1,19E-06	7,32E-04
<b>S4</b>	0,99868527	2,73E-06	7,80E-05	1,26E-04	1,32E-06	7,47E-04
<b>S5</b>	0,99871996	2,52E-06	7,77E-05	1,14E-04	1,20E-06	7,41E-04
<b>S6</b>	0,998827291	2,11E-06	7,15E-05	1,01E-04	1,00E-06	6,98E-04
<b>S7</b>	0,998687672	2,60E-06	7,50E-05	1,28E-04	1,23E-06	7,46E-04
<b>S8</b>	0,998658981	2,77E-06	7,98E-05	1,19E-04	1,24E-06	7,70E-04

Tabela A1.2: Valores para a Probabilidades de cenário accidental e de normalidade operacional ocasionado por ruptura.

<b>Seção</b>	<b>Normalidade</b>	<b>Detonação/Deflagração</b>	<b>Jato de fogo</b>	<b>CVCE</b>	<b>Flash Fire</b>	<b>Dispersão</b>
<b>S1</b>	0,998741098	2,36E-06	4,88E-05	2,11E-05	2,12E-07	1,66E-04
<b>S2</b>	0,998679207	2,44E-06	5,10E-05	2,33E-05	2,33E-07	1,86E-04
<b>S3</b>	0,998719434	2,40E-06	4,89E-05	2,22E-05	2,16E-07	1,72E-04
<b>S4</b>	0,99868527	2,46E-06	4,99E-05	2,30E-05	2,20E-07	1,84E-04
<b>S5</b>	0,99871996	2,40E-06	4,95E-05	2,15E-05	2,20E-07	1,70E-04
<b>S6</b>	0,998827291	2,10E-06	4,36E-05	2,02E-05	1,99E-07	1,33E-04
<b>S7</b>	0,998687672	2,38E-06	4,79E-05	2,20E-05	2,18E-07	1,87E-04
<b>S8</b>	0,998658981	2,47E-06	5,15E-05	2,40E-05	2,39E-07	1,90E-04

Tabela A1.3: Valores para  $L_{ai}$ ,  $L_0$  e CDR (em metros)

<b>Seção</b>	<b>(<math>L_i</math>)</b>	<b>(<math>L_0</math>)</b>	<b>(CDR)</b>
S1	2900	2.400	54,60067
S2	3500	4.700	46,15580
S3	4000	9.200	39,02149
S4	3300	12.500	36,14292
S5	2900	16.750	33,59287
S6	3500	20.800	31,82255
S7	1900	21.300	31,63413
S8	4680	24.200	30,64058

Tabela A1.4: Valores para o Fluxo de radiação de calor ( em  $J/m^2.s$ )

Seção	$I$ (para ruptura)	$I$ (para furo)
S1	6.324,013	3.312,278
S2	8.984,699	4.024,703
S3	12.761,79	4.628,606
S4	14.978,48	4.854,036
S5	17.453,4	5.039,43
S6	19.544,32	5.159,086
S7	19.788,4	5.171,364
S8	21.153,19	5.234,632

Tabela A1.5: Valores para  $\omega$  ocasionado por furo e por ruptura e  $\alpha_{ai}$  e  $\eta_{ai}$ 

Seção	$\omega$ para ruptura	$\omega$ para furo	$\alpha_{ai}$	$\eta_{ai}$
S1	100,5687	582.264.273,9	0,03	15
S2	9.234,722	16.744.014.021	0,04	25
S3	160,5095	806.782.248,9	0,06	10
S4	38,47956	302.518.125,7	0,04	10
S5	12,1551	142.179.434,7	0,045	20
S6	6,99978	100.561.438,1	0,04	5
S7	5,33972	85.266.180,19	0,04	10
S8	3,56979	67.209.185,82	0,05	15

Tabela A1.6: Valores para a Porcentagem de vegetação na zona crítica

Seção	% Vegetação
S1	0,044
S2	0,04
S3	0,04
S4	0,04
S5	0,04
S6	0,07
S7	0,06
S8	0,04

Tabela A1.7: Valores para a Constante que associa o cenário a seção para modo de falha ruptura

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	3,90E-08	7,70E-08	1,30E-08	1,10E-09	1,00E-11
S2	2,20E-07	7,00E-08	1,40E-08	1,00E-08	1,00E-11
S3	5,50E-08	2,10E-08	2,10E-08	1,30E-08	1,00E-11
S4	4,20E-08	3,30E-08	1,73E-08	1,20E-08	1,00E-11
S5	2,30E-07	7,40E-08	1,40E-08	1,10E-09	1,00E-11
S6	2,37E-08	6,20E-09	2,70E-08	7,10E-09	1,00E-11
S7	2,37E-08	6,30E-09	2,12E-08	9,40E-09	1,00E-11
S8	1,99E-07	8,00E-08	1,40E-08	1,00E-08	1,00E-11

Tabela A1.8: Valores para a Constante que associa o cenário a seção para modo de falha furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	1,30E-07	7,00E-08	2,50E-08	8,00E-09	1,00E-11
S2	6,60E-08	3,90E-08	1,60E-08	1,00E-08	1,00E-11
S3	9,00E-08	2,20E-08	2,00E-08	1,80E-08	1,00E-11
S4	1,10E-07	3,40E-08	2,20E-08	1,82E-08	1,00E-11
S5	6,60E-08	5,00E-08	1,90E-08	8,00E-09	1,00E-11
S6	1,83E-07	7,10E-08	2,70E-08	6,90E-09	1,00E-11
S7	5,10E-08	7,10E-08	2,33E-08	7,20E-09	1,00E-11
S8	6,60E-08	4,20E-08	1,80E-08	1,00E-08	1,00E-11

Tabela A1.9: Valores para o Inverso do tempo de apagamento das chamas para modo de falha ruptura

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

Tabela A1.10: Valores para o Inverso do tempo de apagamento das chamas para modo de falha furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	0,00022	0,00023	0,0001	0,00031	0,00393
S2	0,00016	0,00023	0,00012	0,00028	0,00397
S3	0,00023	0,00026	0,00012	0,00026	0,00461
S4	0,0002	0,00025	0,00012	0,00025	0,00464
S5	0,00019	0,00024	0,00012	0,00033	0,00441
S6	0,0003	0,00035	0,00014	0,00042	0,00452
S7	0,00014	0,00017	0,00014	0,00025	0,00337
S8	0,00018	0,00026	0,00012	0,00031	0,00399

Tabela A1.11: Valores para a alguns parâmetro do cálculo da função consequência financeira

<b>Seção</b>	<b>(v)</b>	<b>(Q)</b>	<b>(w<sub>ai</sub>)</b>	<b>(β)</b>
S1	1,2	2,44	7	0,0014
S2	1,3	2,26	13	0,0018
S3	0,78	2,16	22	0,0014
S4	1	1,9	14	0,0016
S5	1,25	1,37	7,5	0,0016
S6	0,9	0,98	2	0,0003
S7	1,15	0,85	4	0,0016
S8	1,3	0,8	8	0,0018

Tabela A1.12: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  para o acontecimento de ruptura

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

Tabela A1.13: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  para o acontecimento de furo

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

## ANEXO 2: Dados referentes a aplicação 2

Este anexo contém tabelas com dados das variáveis e parâmetros utilizados na análise de sensibilidade da Aplicação 2 desse trabalho, com o intuito de elucidar algumas dúvidas que possam surgir durante a leitura do trabalho.

Tabela A2.1: Valores para a Probabilidades de cenário acidental e de normalidade operacional ocasionado por furo

<b>Seção</b>	<b>Normalidade</b>	<b>Detonação/Deflagração</b>	<b>Jato de fogo</b>	<b>CVCE</b>	<b>Flash Fire</b>	<b>Dispersão</b>
S1	0,99860510	2,85E-06	7,21E-05	1,35E-04	1,45E-06	7,70E-04
S2	0,99865520	2,70E-06	7,77E-05	1,29E-04	1,49E-06	7,00E-04
S3	0,99854540	2,50E-06	7,65E-05	1,25E-04	1,36E-06	8,10E-04
S4	0,99859440	2,61E-06	7,55E-05	1,28E-04	1,37E-06	7,50E-04
S5	0,99871250	2,47E-06	7,45E-05	1,24E-04	1,51E-06	7,20E-04
S6	0,99878610	2,60E-06	7,82E-05	1,27E-04	1,42E-06	6,90E-04
S7	0,99863310	2,46E-06	7,62E-05	1,19E-04	1,41E-06	8,40E-04
S8	0,99874490	2,55E-06	7,54E-05	1,21E-04	1,39E-06	7,20E-04
S9	0,99888230	2,39E-06	7,56E-05	1,25E-04	1,33E-06	6,50E-04
S10	0,99889290	2,45E-06	7,51E-05	1,27E-04	1,38E-06	6,20E-04
S11	0,99873860	2,67E-06	7,52E-05	1,22E-04	1,55E-06	7,70E-04

Tabela A2.2: Valores para a Probabilidades de cenário acidental e de normalidade operacional ocasionado por ruptura

<b>Seção</b>	<b>Normalidade</b>	<b>Detonação/Deflagração</b>	<b>Jato de fogo</b>	<b>CVCE</b>	<b>Flash Fire</b>	<b>Dispersão</b>
S1	0,99860510	2,53E-06	4,80E-05	2,27E-05	2,12E-07	1,89E-04
S2	0,99865520	2,15E-06	4,52E-05	2,58E-05	2,00E-07	1,75E-04
S3	0,99854540	2,68E-06	4,71E-05	2,14E-05	2,25E-07	1,68E-04
S4	0,99859440	2,36E-06	4,55E-05	2,45E-05	2,35E-07	1,87E-04
S5	0,99871250	2,47E-06	4,69E-05	2,41E-05	2,45E-07	1,91E-04
S6	0,99878610	2,87E-06	4,25E-05	2,36E-05	2,33E-07	1,68E-04
S7	0,99863310	2,68E-06	4,12E-05	2,58E-05	2,01E-07	1,58E-04
S8	0,99874490	2,55E-06	4,32E-05	2,47E-05	2,15E-07	1,64E-04
S9	0,99888230	2,31E-06	4,25E-05	2,14E-05	2,35E-07	1,57E-04
S10	0,99889290	2,14E-06	4,78E-05	2,58E-05	2,68E-07	1,44E-04
S11	0,99873860	2,10E-06	4,89E-05	2,47E-05	2,46E-07	1,54E-04

Tabela A2.3: Valores para a Distância da seção para a estação de compressão a montante e raio máximo de perigo (em metros)

<b>Seção</b>	<b><math>L_o</math></b>	<b>CDR</b>
S1	3.000	51,63813
S2	5.500	44,37722
S3	8.850	39,4017
S4	13.000	2,37531
S5	16.600	33,6685
S6	19.500	32,34016
S7	23.200	30,96555
S8	26.000	30,09591
S9	27.800	29,59645
S10	29.950	29,05036
S11	32.850	28,38683

Tabela A2.4: Valores para o Fluxo de Calor Irradiado em  $J/m^2.s$

<b>Seção</b>	<b><math>I</math> para ruptura</b>	<b><math>I</math> para furo</b>
S1	7.106,05	3.555,514
S2	9.753,756	4.178,417
S3	12.505,76	4.597,751
S4	4.430.789	886.387,4
S5	17.371,56	5.034,148
S6	18.896,24	5.124,901
S7	20.691,88	5.214,212
S8	21.961,19	5.268,263
S9	22.742,9	5.298,449
S10	23.645,57	5.330,743
S11	24.815,45	5.368,995

Tabela A2.5: Valores de  $\omega$  para ruptura e furo;  $\alpha_{a_i}$ ; e  $n_{a_i}$

<b>Seção</b>	<b><math>\omega</math> para ruptura</b>	<b><math>\omega</math> para furo</b>	<b><math>\alpha_{a_i}</math></b>	<b><math>\eta_{ai}</math></b>
S1	2,94E+05	2,97E+11	0,017	14
S2	2,99E+03	6,94E+09	0,055	40
S3	1,96E+02	9,28E+08	0,05	44
S4	1,00E-12	1,00E-12	0,05	48
S5	12,55970	1,45E+08	0,038	22
S6	7,14563	1,02E+08	0,046	35
S7	4,06923	7,25E+07	0,052	43
S8	2,86957	5,93E+07	0,035	21
S9	2,35047	5,31E+07	0,04	27
S10	1,88962	4,72E+07	0,05	33
S11	1,44734	4,11E+07	0,018	16

Tabela A2.6: Valores para a Porcentagem de Vegetação presente na zona crítica.

Seção	% de Vegetação
S1	0,14
S2	0,05
S3	0,035
S4	0,03
S5	0,04
S6	0,05
S7	0,05
S8	0,035
S9	0,04
S10	0,06
S11	0,12

Tabela A2.7: Valores para  $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$  para o caso de ruptura

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	2,5E-08	6,5E-09	2,9E-08	7,4E-09	1E-11
S2	2E-07	8E-08	1,4E-08	1E-08	1E-11
S3	4,6E-08	3E-08	1,7E-08	1,3E-08	1E-11
S4	5,7E-08	2E-08	2E-08	1,7E-08	1E-11
S5	7E-08	8E-08	3,1E-08	9E-09	1E-11
S6	1,35E-07	8E-08	2,7E-08	1E-08	1E-11
S7	2E-07	7,5E-08	1,2E-08	1E-08	1E-11
S8	8,5E-08	1,8E-08	1,9E-08	1,4E-08	1E-11
S9	5E-08	7,5E-08	1,3E-08	8E-09	1E-11
S10	2E-07	2,2E-08	9E-09	6E-09	1E-11
S11	2,5E-08	7,3E-08	2,5E-08	7,5E-09	1E-11

Tabela A2.8: Valores para a  $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$  para o caso de furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	1,8E-07	7,7E-08	2,7E-08	7,2E-09	1E-11
S2	7E-08	3,9E-08	1,6E-08	1E-08	1E-11
S3	7,5E-08	2,5E-08	1,9E-08	1,6E-08	1E-11
S4	9E-08	2E-08	2E-08	1,8E-08	1E-11
S5	1,5E-07	8E-08	3E-08	9E-09	1E-11
S6	1,7E-07	8E-08	2,9E-08	9E-09	1E-11
S7	7,5E-08	3,9E-08	2,9E-08	1,2E-08	1E-11
S8	8,4E-08	2E-08	2,2E-08	1,8E-08	1E-11
S9	1,5E-07	7E-08	2,5E-08	8E-09	1E-11
S10	1,4E-07	2,7E-08	9,8E-09	6,5E-09	1E-11
S11	2,1E-07	8E-08	3E-08	7,5E-09	1E-11

Tabela A2.9: Valores para  $\alpha_{\theta_{jk},a_i}$  para o caso de ruptura

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	0,00038	0,00019	0,00015	0,00028	0,00936
S2	0,00026	0,00044	0,0001	0,00037	0,00588
S3	0,00033	0,00035	0,00012	0,00037	0,00578
S4	0,00037	0,00032	0,00014	0,00037	0,00555
S5	0,00025	0,00039	0,00011	0,0005	0,00477
S6	0,00025	0,00042	0,00011	0,0004	0,00522
S7	0,00025	0,00044	0,0001	0,00037	0,00588
S8	0,00038	0,00049	0,00014	0,00051	0,00658
S9	0,00024	0,00047	0,00011	0,00048	0,00574
S10	0,00027	0,0004	0,00012	0,00052	0,00462
S11	0,00035	0,00022	0,00015	0,00028	0,00915

Tabela A2.10: Valores para  $\alpha_{\theta_{jk},a_i}$  para o caso de furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	0,00012	0,00014	0,00014	0,00022	0,00347
S2	0,00019	0,00023	0,0001	0,00028	0,00397
S3	0,00021	0,00024	0,00011	0,00028	0,00413
S4	0,00024	0,00026	0,00012	0,00026	0,00461
S5	0,00022	0,00023	0,0001	0,00031	0,00309
S6	0,00021	0,00023	0,0001	0,00029	0,00338
S7	0,00019	0,00023	0,0001	0,00028	0,00397
S8	0,00021	0,00037	0,00011	0,00028	0,00521
S9	0,00022	0,00024	0,0001	0,00027	0,00287
S10	0,00028	0,00037	0,00011	0,00026	0,00395
S11	0,00012	0,00014	0,00014	0,00023	0,00347

Tabela A2.11: Valores para  $w_{ai}$ ,  $\beta$  e  $L_{ai}$ 

Seção	$w_{ai}$ (R\$/s)	$\beta$ (R\$/J)	$L_{ai}$ (m)
S1	18,2	0,001	2.550
S2	20,8	0,002	3.300
S3	23,4	0,0018	4.150
S4	32,5	0,0016	3.600
S5	13	0,0017	2.900
S6	20,8	0,0018	3.700
S7	20,8	0,002	2.800
S8	16,9	0,0014	2.350
S9	15,6	0,0019	1.800
S10	19,5	0,0019	2.150
S11	14,3	0,0011	2.900

Tabela A2.12: Valores para a Taxa de liberação de gás (em m<sup>3</sup>/s)

Seção	R para ruptura	R para furo
S1	2,7	1,35
S2	2,5	1,27
S3	2,35	1,19
S4	2,3	1,07
S5	2,1	0,98
S6	1,8	0,89
S7	1,55	0,81
S8	1,4	0,74
S9	1,25	0,67
S10	1,1	0,59
S11	0,94	0,51

Tabela A2.13: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  para ruptura

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	35	34	33	37	180
S2	50	45	41	49	180
S3	40	47	42	40	180
S4	42	40	43	42	240
S5	37	43	39	35	190
S6	42	43	35	39	190
S7	45	44	40	42	210
S8	36	36	32	31	230
S9	40	33	31	34	190
S10	37	37	33	32	190
S11	42	34	30	38	200

Tabela A2.14: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  para furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	34	30	32	25	30
S2	26	31	32	28	55
S3	29	29	28	27	53
S4	29	25	26	22	50
S5	23	20	25	25	56
S6	25	20	25	25	45
S7	36	32	31	27	55
S8	29	25	24	23	50
S9	24	20	25	22	53
S10	24	22	20	24	29
S11	33	29	30	27	35

### ANEXO 3: Dados referentes a aplicação 3

Este anexo apresenta os dados relevantes para a análise de sensibilidade do caso associado à Aplicação 3, para servir como fonte para possíveis análises.

**Tabela A3.1: Valores para a Probabilidades de cenário accidental e de normalidade operacional ocasionado por furo**

<b>Seção</b>	<b>Normalidade</b>	<b>Detonação/Deflagração</b>	<b>Jato de fogo</b>	<b>CVCE</b>	<b>Flash Fire</b>	<b>Dispersão</b>
S1	0,9987411	2,45E-06	7,58E-05	1,11E-04	1,18E-06	7,30E-04
S2	0,99867921	2,70E-06	7,89E-05	1,16E-04	1,22E-06	7,59E-04
S3	0,99871943	2,66E-06	7,70E-05	1,22E-04	1,19E-06	7,32E-04
S4	0,99868527	2,73E-06	7,80E-05	1,26E-04	1,32E-06	7,47E-04
S5	0,99871996	2,52E-06	7,77E-05	1,14E-04	1,20E-06	7,41E-04
S6	0,99882729	2,11E-06	7,15E-05	1,01E-04	1,00E-06	6,98E-04
S7	0,99868767	2,60E-06	7,50E-05	1,28E-04	1,23E-06	7,46E-04
S8	0,99865898	2,77E-06	7,98E-05	1,19E-04	1,24E-06	7,70E-04

**Tabela A3.2: Valores para a Probabilidades de cenário accidental e de normalidade operacional ocasionado por ruptura**

<b>Seção</b>	<b>Normalidade</b>	<b>Detonação/Deflagração</b>	<b>Jato de fogo</b>	<b>CVCE</b>	<b>Flash Fire</b>	<b>Dispersão</b>
S1	0,9987411	2,36E-06	4,88E-05	2,11E-05	2,12E-07	1,66E-04
S2	0,99867921	2,44E-06	5,10E-05	2,33E-05	2,33E-07	1,86E-04
S3	0,99871943	2,40E-06	4,89E-05	2,22E-05	2,16E-07	1,72E-04
S4	0,99868527	2,46E-06	4,99E-05	2,30E-05	2,20E-07	1,84E-04
S5	0,99871996	2,40E-06	4,95E-05	2,15E-05	2,20E-07	1,70E-04
S6	0,99882729	2,10E-06	4,36E-05	2,02E-05	1,99E-07	1,33E-04
S7	0,99868767	2,38E-06	4,79E-05	2,20E-05	2,18E-07	1,87E-04
S8	0,99865898	2,47E-06	5,15E-05	2,40E-05	2,39E-07	1,90E-04

**Tabela A3.3: Valores para a Distância da seção para a estação de compressão a montante e raio máximo de perigo (em metros)**

<b>Seção</b>	<b><math>L_o</math></b>	<b>CDR</b>
S1	3.600	49,33727
S2	7.400	41,20433
S3	11.050	37,27436
S4	15.550	34,22301
S5	20.950	31,76543
S6	23.400	30,89917
S7	26.800	29,86875
S8	28.376	29,4451

Tabela A3.4: Valores para o Fluxo de radiação de calor (em J/m<sup>2</sup>.s)

Seção	<i>I</i> para ruptura	<i>I</i> para furo
S1	7.816,286	3.750,419
S2	11.389,53	4.448,708
S3	14.043,95	4.767,282
S4	16.788,49	4.995,004
S5	19.617,83	5.162,817
S6	20.784,89	5.218,405
S7	22.311,71	5.282,069
S8	22.987,9	5.307,474

Tabela A3.5: Valores de  $\omega$  para ruptura e para furo;  $\alpha_{a_i}$ ; e  $\eta_{a_i}$ 

Seção	$\omega$ para ruptura	$\omega$ para furo	$\alpha_{a_i}$	$\eta_{a_i}$
S1	100,5687	5,82E+08	0,03	20
S2	9.234,722	1,67E+10	0,04	25
S3	160,5095	8,07E+08	0,06	15
S4	38,47956	3,03E+08	0,04	12
S5	12,1551	1,42E+08	0,045	20
S6	6,99978	1,01E+08	0,04	7
S7	5,33972	8,53E+07	0,04	11
S8	3,56979	6,72E+07	0,05	17

Tabela A3.6: Valores para a Porcentagem de vegetação presente na zona de perigo

Seção	% de Vegetação
S1	0,05
S2	0,04
S3	0,04
S4	0,04
S5	0,065
S6	0,09
S7	0,07
S8	0,04

Tabela A3.7: Valores para  $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$  (em m<sup>2</sup>/J) para o modo de falha ruptura

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	3,9E-08	7,7E-08	1,3E-08	1,1E-09	1E-11
S2	2,2E-07	7E-08	1,4E-08	1E-08	1E-11
S3	5,5E-08	2,1E-08	2,1E-08	1,3E-08	1E-11
S4	4,2E-08	3,3E-08	1,73E-08	1,2E-08	1E-11
S5	2,3E-07	7,4E-08	1,4E-08	1,1E-09	1E-11
S6	2,37E-08	6,2E-09	2,7E-08	7,1E-09	1E-11
S7	2,37E-08	6,3E-09	2,12E-08	9,4E-09	1E-11
S8	1,99E-07	8E-08	1,4E-08	1E-08	1E-11

Tabela A3.8: Valores para  $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$  (em m<sup>2</sup>/J) para o modo de falha furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	1,3E-07	7E-08	2,5E-08	8E-09	1E-11
S2	6,6E-08	3,9E-08	1,6E-08	1E-08	1E-11
S3	9E-08	2,2E-08	2E-08	1,8E-08	1E-11
S4	1,1E-07	3,4E-08	2,2E-08	1,82E-08	1E-11
S5	6,6E-08	5E-08	1,9E-08	8E-09	1E-11
S6	1,83E-07	7,1E-08	2,7E-08	6,9E-09	1E-11
S7	5,1E-08	7,1E-08	2,33E-08	7,2E-09	1E-11
S8	6,6E-08	4,2E-08	1,8E-08	1E-08	1E-11

Tabela A3.9: Valores para  $g_{\theta_{jk},a_i}$  para o modo de falha ruptura

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

Tabela A3.10: Valores para  $g_{\theta_{jk},a_i}$  para o modo de falha furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	0,00022	0,00023	0,0001	0,00031	0,00393
S2	0,00016	0,00023	0,00012	0,00028	0,00397
S3	0,00023	0,00026	0,00012	0,00026	0,00461
S4	0,0002	0,00025	0,00012	0,00025	0,00464
S5	0,00019	0,00024	0,00012	0,00033	0,00441
S6	0,0003	0,00035	0,00014	0,00042	0,00452
S7	0,00014	0,00017	0,00014	0,00025	0,00337
S8	0,00018	0,00026	0,00012	0,00031	0,00399

Tabela A3.11: Valores para os parâmetros que não dependem da seção para a função consequência financeira

Seção	$v$ (R\$/m³)	$Q$ (m³/s)	$w_{ai}$ (R\$/s)	$L_{ai}$ (m)	$\beta$ (R\$/J)
S1	1,38	2,54	10	4.000	0,0014
S2	1,3	2,31	14	3.000	0,0018
S3	0,95	2,05	26	5.000	0,0014
S4	0,087	1,99	14	3.600	0,0016
S5	1,02	1,48	8,77	4.100	0,0016
S6	0,98	1,2	2,25	3.950	0,0003
S7	1,02	1,14	5	5.100	0,0016
S8	1,3	0,98	7,77	3.200	0,0018

Tabela A3.12: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $Z_i$ ) para modo de falha ruptura

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

Tabela A3.13: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ ) para modo de falha furo

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

Tabela A3.14: Valores para a Taxa de liberação de gás a partir do furo ou ruptura (em  $\text{m}^3/\text{s}$ )

Seção	R para ruptura	R para furo
S1	2,82	1,35
S2	2,38	1,24
S3	2,25	1,17
S4	2,16	1,03
S5	2,09	0,94
S6	2,01	0,87
S7	1,9	0,8
S8	1,78	0,72

## ANEXO 4: Dados referentes a aplicação 4

Este anexo irá apresentar as tabelas com os valores utilizadas para a análise de sensibilidade da aplicação 4, com o intuito de fornecer todas as informações caso for necessário.

**Tabela A4.1: Valores para a Probabilidade de ocorrência do cenário acidental e de normalidade para o modo de falha ruptura**

Seção	Normalidade	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	0,998797	2,12E-06	4,53E-05	2,11E-05	2,12E-07	1,66E-04
S2	0,998714	2,60E-06	5,10E-05	2,14E-05	2,13E-07	1,86E-04
S3	0,998688	2,40E-06	4,80E-05	2,30E-05	2,16E-07	1,50E-04
S4	0,998712	2,50E-06	4,99E-05	2,90E-05	2,20E-07	1,84E-04
S5	0,99872	2,40E-06	4,95E-05	2,15E-05	2,20E-07	1,70E-04
S6	0,998787	2,70E-06	4,58E-05	2,02E-05	1,99E-07	1,57E-04
S7	0,998746	2,21E-06	4,40E-05	2,20E-05	2,18E-07	1,50E-04

**Tabela A4.2: Valores para a Probabilidade de ocorrência do cenário acidental e de normalidade para o modo de falha furo**

Seção	Normalidade	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	0,998797	2,20E-06	7,10E-05	1,11E-04	1,18E-06	7,10E-04
S2	0,998714	2,80E-06	7,60E-05	1,35E-04	1,30E-06	7,30E-04
S3	0,998688	2,66E-06	7,70E-05	1,22E-04	1,19E-06	7,32E-04
S4	0,998712	2,73E-06	7,80E-05	1,50E-04	1,32E-06	7,78E-04
S5	0,99872	2,52E-06	7,77E-05	1,14E-04	1,20E-06	7,41E-04
S6	0,998787	2,11E-06	7,87E-05	1,01E-04	1,70E-06	6,98E-04
S7	0,998746	2,60E-06	7,50E-05	1,89E-04	1,23E-06	7,46E-04

**Tabela A4.3: Valores para a Distância da seção para a estação de compressão a montante e raio máximo de perigo (em metros)**

Seção	$L_0$	CDR
S1	4.000	48,05469
S2	6.100	43,24325
S3	9.400	38,81225
S4	10.800	37,48822
S5	13.500	35,45417
S6	16.500	33,7194
S7	18.500	32,7686

Tabela A4.4: Valores obtidos para o fluxo de radiação de calor no caso de ocorrência de furo e de ruptura (em J/m<sup>2</sup>.s)

Seções	$I$ para ruptura	$I$ para furo
S1	8.258,644	3.860,588
S2	10.295,97	4.275,848
S3	12.906	4.645,489
S4	13.877,02	4.750,601
S5	15.593,08	4.905,548
S6	17.316,8	5.030,586
S7	18.383,56	5.096,102

Tabela A4.5: Valores para  $\omega$  para ruptura, e para furo,  $\eta_{a_i}$ ,  $\alpha_{a_i}$

Seções	$\omega$ para ruptura	$\omega$ para furo	$\eta_{a_i}$	$\alpha_{a_i}$
S1	100,5687	5,82E+08	20	0,03
S2	9234,722	1,67E+10	17	0,04
S3	160,5095	8,07E+08	37	0,06
S4	38,47956	3,03E+08	25	0,04
S5	12,1551	1,42E+08	22	0,045
S6	6,99978	1,01E+08	10	0,008
S7	5,339717	8,53E+07	25	0,04

Tabela A4.6: Valores para a Porcentagem de vegetação na zona crítica

Seções	% de Vegetação
S1	0,1
S2	0,05
S3	0,04
S4	0,19
S5	0,065
S6	0,55
S7	0,2

Tabela A4.7: Valores para  $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$  causado por ruptura

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	3,9E-08	7,7E-08	1,3E-08	1,1E-09	1E-11
S2	2,2E-07	7E-08	1,4E-08	1E-08	1E-11
S3	5,5E-08	2,1E-08	2,1E-08	1,3E-08	1E-11
S4	4,2E-08	3,3E-08	1,73E-08	1,2E-08	1E-11
S5	2,3E-07	7,4E-08	1,4E-08	1,1E-09	1E-11
S6	2,37E-08	6,2E-09	2,7E-08	7,1E-09	1E-11
S7	2,37E-08	6,3E-09	2,12E-08	9,4E-09	1E-11

Tabela A4.8: Valores para  $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$  causado por furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	1,3E-07	7E-08	2,5E-08	8E-09	1E-11
S2	6,6E-08	3,9E-08	1,6E-08	1E-08	1E-11
S3	9E-08	2,2E-08	2E-08	1,8E-08	1E-11
S4	1,1E-07	3,4E-08	2,2E-08	1,82E-08	1E-11
S5	6,6E-08	5E-08	1,9E-08	8E-09	1E-11
S6	1,83E-07	7,1E-08	2,7E-08	6,9E-09	1E-11
S7	5,1E-08	7,1E-08	2,33E-08	7,2E-09	1E-11

Tabela A4.9: Valores para  $g_{\theta_{jk},a_i}$  para o caso de ruptura

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

Tabela A4.10: Valores para  $g_{\theta_{jk},a_i}$  para o caso de furo

Seção	Detonação Deflagração	Jato de fogo	CVCE	Flash Fire	Dispersão
S1	0,00022	0,00023	0,0001	0,00031	0,00393
S2	0,00016	0,00023	0,00012	0,00028	0,00397
S3	0,00023	0,00026	0,00012	0,00026	0,00461
S4	0,0002	0,00025	0,00012	0,00025	0,00464
S5	0,00019	0,00024	0,00012	0,00033	0,00441
S6	0,0003	0,00035	0,00014	0,00042	0,00452
S7	0,00014	0,00017	0,00014	0,00025	0,00337

Tabela A4.11: Valores dos parâmetros dependentes da seção para a função consequência ambiental

Seções	$v$ (R\$/m)	$w_{ai}$ (R\$/s)	$\beta$ (R\$/J)	$L_{ai}$ (m)
S1	1,38	10	0,0014	3.500
S2	1,3	14	0,0018	2.100
S3	0,95	26	0,0014	3.300
S4	1,25	14	0,0016	1.400
S5	2,4	8,77	0,0016	2.700
S6	1,7	2,25	0,0003	3.000
S7	1,6	5	0,0016	2.000

Tabela A4.12: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ ) para modo de falha ruptura

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

Tabela A4.13: Valores para a Constante de proporcionalidade que associa  $t_R$  e  $t_Q$  ( $z_i$ ) para modo de falha furo

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

Tabela A4.14: Valores para R causada por ruptura e por furo

Seções	R para ruptura	R para furo
S1	3	1,5
S2	2,38	1,24
S3	2,25	1,17
S4	2,16	1,03
S5	2,09	0,94
S6	1,95	0,90
S7	1,9	0,8