

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

CRISTINA PEREIRA MEDEIROS

**SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA ANÁLISE DE ROBUSTEZ
EM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE
RISCO EM GASODUTOS DE GÁS NATURAL**

RECIFE / 2015

CRISTINA PEREIRA MEDEIROS

**SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA ANÁLISE DE ROBUSTEZ
EM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE
RISCO EM GASODUTOS DE GÁS NATURAL**

Dissertação submetida à UFPE para Obtenção de
Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida

RECIFE/2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

M488s Medeiros, Cristina Pereira.
Sistema de apoio a decisão para análise de Robustez em modelo de decisão multicritério de Avaliação de risco em gasodutos de gás natural / Cristina Pereira Medeiros - Recife: O Autor, 2015.
138folhas; ils.e tabs.

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2015.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia de Produção. 2. Modelo multicritério. 3 Análise de sensibilidade global. 4. Análise de risco em gasodutos. I. Almeida, Adiel Teixeira de. (Orientador). Título.

UFPE

658.5CDD (22. ed.)

BCTG/2015- 93

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

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE**

CRISTINA PEREIRA MEDEIROS

**“SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA ANÁLISE DE
ROBUSTEZ EM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO DE
AVALIAÇÃO DE RISCO EM GASODUTOS DE GÁS NATURAL”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato CRISTINA PEREIRA MEDEIROS **APROVADA**.

Recife, 23 de Fevereiro de 2015.

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

Prof. CRISTIANO CAVALCANTE AFONSO CARVALHO, D.Sc(UFPE)

Prof. Manoel Afonso de Carvalho Júnior, PhD (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é um marco em minha vida pessoal e profissional pois possibilitou ampliar meus conhecimentos e horizontes nas amizades.

Agradeço Primeiramente a Deus por conceder a vida e a oportunidade de concretizar este sonho. Em segundo a meus pais Antônio e Gorete que abdicaram dos nossos momentos juntos em favor das minhas conquistas pessoais. Agradeço ao meu namorado Luiz Henrique por estar presente nesta trajetória de maneira tão amorosa e por ter sido o meu guia e meu amigo acima de tudo. Aos meus amigos distantes e novos amigos, que torceram por minha vitória.

Ao meu orientador Prof. Ph.D Adiel Teixeira de Almeida pela confiança, ensinamentos e orientação. Ao Prof. D.Sc. Marcelo Hazin Alencar, membro do Centro de Desenvolvimento de Sistemas de Informação e Decisão (CDSID), pelo suporte durante a elaboração deste trabalho.

Aos demais professores, muito obrigada.

Por fim, ao CNPQ por proporcionar o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

Este trabalho propõe-se a analisar a sensibilidade e robustez do modelo de decisão multicritério para avaliação de risco em gasodutos de gás natural proposto por Brito & Almeida (2009). São realizadas Simulações Monte Carlo para diferentes *Patterns*, avaliando variação conjunta de parâmetros e indicando regiões de sensibilidade. As ordenações obtidas para cada replicação são avaliadas através do coeficiente de correlação τ de Kendall e ao final da simulação, valores de variação de τ são obtidos e a correlação é avaliada para o grau de significância estabelecido. Ao final são mostradas para cada seção, a variação ao longo do ranking sugerindo ao decisor recomendação de priorização, avaliando a robustez do modelo. O modelo mostrou-se eficaz para avaliação mais detalhada da avaliação de risco.

Palavras Chave: Modelo multicritério. Análise de sensibilidade global. Análise de risco em gasodutos.

ABSTRACT

This paper proposes to analyze the sensitivity and robustness of the multicriteria decision model for risk assessment in natural gas pipelines proposed by Brito and Almeida (2009). Monte Carlo simulations are performed for different *Patterns*, evaluating joint variation of parameters and indicating areas of sensitivity. The ranking is obtained for each trial evaluated by the Kendall τ rank correlation coefficient and the end of the simulation, values of variation of τ are obtained and correlation is evaluated for the level of significance. Finally are shown for each Section the variation along the ranking, suggesting to the decision maker's recommendation for prioritizing, evaluating the robustness of the model. The model proved to be effective for more detailed assessment of the risk assessment.

Keywords: Multicriteria model. Global sensitivity analysis. Risk assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Classificação conceitual dos Sistemas de Informação.....	22
Figura 3.1- Estrutura do modelo de decisão	38
Figura 3.2 - Cenários de perigo considerados no modelo	39
Figura 3.3- Avaliação empírica necessária para especificar certa função utilidade de três atributos.....	54
Figura 3.4 - Etapas do Modelo	57
Figura 3.5 - Gasoduto analisado contendo 8 seções.....	66
Figura 4.1 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	102
Figura 4.2 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	102
Figura 4.3 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	102
Figura 4.4 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	103
Figura 4.5 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	103
Figura 4.6 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	103
Figura 4.7 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	104
Figura 4.8 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	104
Figura 4.9 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	105
Figura 4.10 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	105
Figura 4.11 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	105
Figura 4.12 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	106

Figura 4.13 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	106
Figura 4.14 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	106
Figura 4.15 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	107
Figura 4.16 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2	107
Figura 4.17 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	108
Figura 4.18 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	108
Figura 4.19 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	108
Figura 4.20 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	109
Figura 4.21 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	109
Figura 4.22 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	109
Figura 4.23 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	110
Figura 4.24 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3	110
Figura 4.25 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	111
Figura 4.26 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	111
Figura 4.27 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	111
Figura 4.28 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	112

Figura 4.29 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	112
Figura 4.30 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	112
Figura 4.31 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	113
Figura 4.32 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4	113
Figura 4.33 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	114
Figura 4.34 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	114
Figura 4.35 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	115
Figura 4.36 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	115
Figura 4.37 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	115
Figura 4.38 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	116
Figura 4.39 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	116
Figura 4.40 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5	116
Figura 4.41 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 da distribuição triangular do Pattern 6.....	117
Figura 4.42 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 da distribuição triangular do Pattern 6.....	118
Figura 4.43 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 da distribuição triangular do Pattern 6.....	118
Figura 4.44 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 da distribuição triangular do Pattern 6.....	118

Figura 4.45 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 da distribuição triangular do Pattern 6.....	119
Figura 4.46 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 da distribuição triangular do Pattern 6.....	119
Figura 4.47 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 da distribuição triangular do Pattern 6.....	119
Figura 4.48 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 da distribuição triangular do Pattern 6.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros de Importação do SAD	59
Tabela 3.2 - Parâmetros que representam as preferências do decisor	67
Tabela 3.3 - Ordenação das seções em prioridade de risco	67
Tabela 3.4 - Simulação Pattern 1	69
Tabela 3.5 - Valores de τ Pattern 1	69
Tabela 3.6 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1	70
Tabela 3.7 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 5% para distribuição Triangular do Pattern 1	71
Tabela 3.8 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 1	72
Tabela 3.9 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 1	72
Tabela 3.10 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% da distribuição triangular do Pattern 1	73
Tabela 3.11 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% da distribuição triangular do Pattern 1	73
Tabela 3.12 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 5 % da distribuição Uniforme do Pattern 1	74
Tabela 3.13 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 5% da distribuição Uniforme do Pattern 1	75
Tabela 3.14 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10 % da distribuição Uniforme do Pattern 1	75
Tabela 3.15 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% da distribuição Uniforme do Pattern 1	76
Tabela 3.16 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15 % da distribuição Uniforme do Pattern 1	76
Tabela 3.17 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% da distribuição Uniforme do Pattern 1	77
Tabela 3.18 - Simulação Pattern 2.....	78
Tabela 3.19 - Valores de τ Pattern 2.....	79

Tabela 3.20 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 2	79
Tabela 3.21 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% do Pattern 2.....	79
Tabela 3.22 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern 2	80
Tabela 3.23 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% do Pattern 2.....	80
Tabela 3.24 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 2	80
Tabela 3.25 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern 2.....	81
Tabela 3.26 - Simulação Pattern 3.....	82
Tabela 3.27 - Valores de τ Pattern 3	82
Tabela 3.28 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 3	82
Tabela 3.29 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% do Pattern 3.....	83
Tabela 3.30 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern 3	83
Tabela 3.31 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% do Pattern 3.....	83
Tabela 3.32 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 3	84
Tabela 3.33 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern 3.....	84
Tabela 3.34 - Simulação Pattern 4.....	85
Tabela 3.35 - Valores de τ Pattern 4.....	85
Tabela 3.36 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 4	86
Tabela 3.37 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% do Pattern 4.....	86

Tabela 3.38 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern 4	87
Tabela 3.39 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% do Pattern 4.....	87
Tabela 3.40 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 4	88
Tabela 3.41 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern 4.....	88
Tabela 3.42 Simulação Pattern 5	89
Tabela 3.43 Valores de τ Pattern 5	89
Tabela 3.44 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 5% do Pattern 5	89
Tabela 3.45 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 5% para distribuição Triangular do Pattern 5	90
Tabela 3.46 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 5	90
Tabela 3.47 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% para distribuição Triangular do Pattern 5	91
Tabela 3.48 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern 5	91
Tabela 3.49 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% para distribuição Triangular do Pattern 5	91
Tabela 3.50 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 5	92
Tabela 3.51 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% para distribuição Triangular do Pattern 5	92
Tabela 3.52 - Percentual Diferenciado de simulação para os parâmetros	93
Tabela 3.53 - Simulação Pattern 6.....	93
Tabela 3.54 - Valores de τ Pattern 6.....	93
Tabela 3.55 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação Diferenciada do Pattern 6	93
Tabela 3.56 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern 6.....	94

Tabela 3.57 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções quanto ao Comportamento do decisor do Pattern 7	95
Tabela 3.58 - Simulação das constantes de escala do Pattern 7	96
Tabela 3.59 - Valores de τ obtidos da variação das constantes de escala do Pattern 7	96
Tabela 3.60 - Resultado da Análise de Sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 7 (KHumana)	96
Tabela 3.61 - Resultado da Análise de Sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 7 (KFinanceira)	97
Tabela 3.62 - Resultado da Análise de Sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 7 (KAmbiental)	97
Tabela 3.63 - Simulação Pattern 8.....	98
Tabela 3.64 - Valores de τ Pattern 8.....	99

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Relevância e contribuição do estudo	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivos Gerais	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	Estrutura do Trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Fundamentação Teórica	21
2.1.1	Sistemas de Apoio a Decisão	21
2.1.2	Teoria da Utilidade Multiatributo	23
2.1.3	Gerenciamento de Riscos	23
2.1.4	Análise de Robustez	24
2.1.5	Escolha do teste estatístico adequado	27
2.2	Revisão Bibliográfica sobre análise de robustez em modelo de decisão multicritério de avaliação de risco	28
2.2.1	Análise de robustez em modelo de decisão multicritério de avaliação de risco em um contexto amplo	28
2.2.2	Análise de Sensibilidade para Avaliação de risco em dutos	30
2.3	Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho	34
2.4	Metodologia Adotada	36
3	MODELO PROPOSTO PARA O SAD	38
3.1	Descrição do Modelo de Decisão	38
3.1.1	Identificação dos cenários de perigo	39
3.1.2	Divisão do gasoduto nas seções a_i	39
3.1.3	Análise de exposição dos objetos de impacto	40
3.1.4	Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais θ_{jk} e do cenário de normalidade θ_N operacional para cada seção a_i	40
3.1.5	Estimação do conjunto de <i>payoffs</i> (H, A, F)	41
3.1.6	Elicitação da Função Utilidade Multiatributo	41

3.1.7	Cálculo das probabilidades das consequências $P(h, m, n \theta_{jk}, a_i)$	42
3.1.8	Estimação dos riscos $r(ai)$ e Ordenação das seções	47
3.1.9	Descrição da análise de robustez	48
3.2	Descrição do SAD	55
3.2.1	Input	57
3.2.2	Processamento	62
3.2.3	Output	63
3.3	Aplicação do Modelo	64
3.3.1	<i>Pattern</i> 1: variação igualitária para todos os parâmetros do gás	67
3.3.2	<i>Pattern</i> 2: variação dos Parâmetros do Raio Máximo de Perigo	77
3.3.3	<i>Pattern</i> 3: variação dos Parâmetros do Fluxo de Calor (I)	81
3.3.4	<i>Pattern</i> 4: Avaliação conjunta dos parâmetros que variam por seção	84
3.3.5	<i>Pattern</i> 5: Avaliação conjunta dos parâmetros que variam por seção e Cenário	88
3.3.6	<i>Pattern</i> 6: Avaliação Diferenciada por dimensão	92
3.3.7	<i>Pattern</i> 7: Avaliação das preferências do decisor	94
3.3.8	<i>Pattern</i> 8: Avaliação conjunta dos parâmetros relacionados ao gás e das preferências do decisor	97
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	100
5	CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	121
5.1	Conclusões	121
5.2	Trabalhos Futuros	123
	REFERÊNCIAS	124
	ANEXO 1	129
	ANEXO 2	134

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 10 anos, a produção nacional de gás natural apresentou crescimento médio de 5,6% ao ano, atingindo 25,8 bilhões de m³ em 2012, volume 7,3% maior que o de 2011. Em 2012, foram arrecadados R\$ 15,6 bilhões em royalties, valor que excedeu em 20,4% o de 2011, provenientes da exploração e produção de petróleo e gás natural. Em 2012, o Brasil se situou na 34ª posição no ranking mundial de produtores de gás natural. (ANP, 2013).

O aumento acima mencionado ocorreu devido a maior demanda das termelétricas, em atendimento ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em função dos baixos níveis dos reservatórios hidrelétricos. No ano de 2012, a PETROBRAS destinou diariamente 75 milhões de m³, sendo 52% destino a fins Não térmicos, 30,67% a termelétricas, 13,33% a Refinarias e 4% a Fertilizantes (PETROBRAS, 2012).

Segundo BEN (2013), 57,6% da energia consumida no Brasil é proveniente de Fontes não renováveis, sendo o Gás Natural o segundo mais utilizado desta categoria. O crescimento da oferta das fontes energéticas, Gás Natural, petróleo e derivados representam 97% do crescimento da oferta interna de energia.

Entende-se por infraestrutura de transporte de gás natural a rede de gasodutos que transporta o gás natural seco até os pontos de entrega às distribuidoras estaduais. Esta infraestrutura é composta por uma malha que escoar gás natural de origem nacional e outra que escoar produto importado, totalizando 9.426,3 km de rede, sendo que 69,2% da extensão são gasodutos operados pela TRANSPETRO e o restante pelas demais transportadoras atuantes no setor (Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. – TBG, Transportadora Sulbrasileira de Gás – TSB, GasOcidente do Mato Grosso Ltda. – Gasocidente) (ANP, 2011).

Em 2012, o Brasil contava com 601 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos, perfazendo 19,7 mil km de extensão. Destes, 150 dutos, num total de 14,3 mil km, eram destinados ao transporte, e 451 dutos, totalizando 5,4 mil km, à transferência. Com extensão de 11,7 mil km, 110 dutos destinavam-se à movimentação de gás natural (ANP, 2013).

A malha dutoviária, quando comparada ao transporte rodoviário, permite ganhos ambientais expressivos em função de maior flexibilidade, aumento da segurança operacional, redução do número de acidentes e vazamentos e do volume de emissões atmosféricas (PETROBRAS, 2012).

O Brasil, mesmo sendo um país de dimensões continentais, não possui ainda um banco de dados conciso de acidentes e vazamentos em gasodutos tanto para transporte, como para a distribuição de gás natural. Isso é justificável por conta da relativa baixa idade e da extensão relicitada da rede de gasodutos no país (GARCEZ et. al, 2010).

Uma maneira de suprir a falta de dados internos é aproveitar-se dos bancos de dados externos. Entretanto, a simples utilização de dados estatísticos externos como parâmetro de referência pode ser um erro, pois algumas características que influenciam diretamente nessa probabilidade, tais como regulamentações, estruturas operacionais, níveis de tecnologia empregada, fiscalização, etc. podem não refletir na empresa a ser analisada, gerando assim diferenciações nas estatísticas (GARCEZ et. al, 2010).

Alguns bancos de dados Internacionais utilizados são:

- Banco de dados de incidentes no *European Gas Incident Data Group (EGIG)*;
- Banco de dados do Departamento de Transporte dos Estados Unidos – *Department of Transportation United States (DOT-USA)*;
- Banco de dados MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*) do Reino Unido;
- Banco de dados UKOPA (*United Kingdom On-shore Pipeline Operators Association*).

1.1 Relevância e contribuição do estudo

Conforme Almeida (2013), a avaliação global das alternativas e a análise de sensibilidade e robustez dependem da problemática estabelecida, sendo a problemática de Ordenação a mais complexa.

A avaliação de risco em gasodutos requer importante atenção haja vista consequências catastróficas que podem ocorrer com o aparecimento de furos ou rupturas em suas instalações. Sendo assim, a divisão dos gasodutos em seções ou trechos de riscos requer esforço considerável e minucioso para garantir a segurança humana, redução de impactos ambientais e também perdas financeiras. Com base no modelo, é possível priorizar esforços financeiros e de manutenção para atingir estes objetivos.

Para Salteli et al (2004) a definição do problema é diferente para os profissionais envolvidos na análise de risco (industrial, financeiro, etc), de apoio à decisão , avaliação

ambiental, análise de conformidade regulamentar, etc. Para estes, o grau de variação dos fatores de entrada e de material, como uma das saídas sendo procurado a partir da análise é uma avaliação quantitativa da incerteza em torno de alguns valores estimados para Y (análise de incerteza). Este pode ser conseguido nos casos mais simples, por expressão analítica ou expansão de Taylor, mas é atingido na maioria das vezes e, geralmente, por Métodos Monte Carlo em conjunto com uma variedade de estratégias de amostragem. Neste contexto, a análise de sensibilidade tem como objetivo, entre outros, a definição de prioridades, para determinar o fator que mais necessita de uma melhor determinação, e identificar os elos fracos da cadeia de avaliação (aqueles que propagar mais a variância da saída).

Kucherenko et al (2009) apresenta como principal desvantagem da análise de Sensibilidade Local (LSA) o fato destes métodos não levarem em conta as interações entre as variáveis e coeficientes de sensibilidade locais e estão relacionados a um ponto fixo nominal no espaço de parâmetros. Em contrapartida, na Análise de Sensibilidade Global (GSA), é avaliado o efeito de um fator enquanto todos os outros fatores são variados, e assim eles são responsáveis por interações entre as variáveis e não dependem da escolha de um ponto nominal.

A partir da simulação Monte Carlo será possível compreender o comportamento dinâmico e aleatório das variáveis a fim de avaliar a robustez dos parâmetros do modelo, classificando-os e indicando regiões de sensibilidade. Além disso, para parâmetros que se demonstrarem robustez é possível analisar a possibilidade de simplificação do modelo, tornando-o mais enxuto, rápido e mantendo a confiabilidade dos dados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Esta dissertação tem por objetivo analisar a sensibilidade e robustez do modelo de decisão multicritério para avaliação de risco em gasodutos de gás natural proposto por Brito & Almeida (2009), a partir da ordenação dos trechos de gasodutos em uma hierarquia de riscos multidimensionais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Deseja-se avaliar o comportamento dos parâmetros de entrada do modelo, tendo como objetivos específicos:

- Desenvolver o Sistema de Apoio a Decisão (SAD) para a análise de decisão multicritério e avaliação de risco em gasodutos de gás natural;
- Executar simulações Monte Carlo dos dados de entrada do modelo;
- Realizar análise de Sensibilidade global das alternativas;
- Inferir sobre a sensibilidade e robustez do modelo.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturada em 5 capítulos a seguir, divididos como segue:

O Capítulo I, a Introdução, apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos do estudo.

O Capítulo II traz os conceitos necessários para o entendimento e execução deste trabalho, bem como uma breve apresentação de trabalhos relacionados a avaliação de risco. O posicionamento deste trabalho e suas contribuições são apresentados ao final do capítulo seguida da metodologia adotada.

No Capítulo III são descritos o modelo analisado de Brito & Almeida (2009) e a análise de sensibilidade. Posteriormente são descritos o Sistema de Apoio a Decisão com suas entradas, processamentos e saídas e por fim a aplicação e discussão do modelo e dos *Patterns*.

Em seguida, são discutidos no Capítulo IV os resultados da Análise de Sensibilidade e por fim, apresentados no Capítulo V as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentação Teórica

A base conceitual utilizada para o trabalho é apresentada a seguir e consiste em elucidar os principais conceitos de Sistemas de Apoio a Decisão e suas contribuições, bem como a estruturação e a importância dos temas abordados no modelo proposto referentes à abordagem multicritério, seguida do gerenciamento de riscos, análise de robustez e por fim, a escolha do teste estatístico.

2.1.1 Sistemas de Apoio a Decisão

Um Sistema de Informação (SI) pode ser definido como um conjunto de componentes inter-relacionados que coletam, processam, armazenam e distribuem informação (LAUDON & LAUDON, 2011).

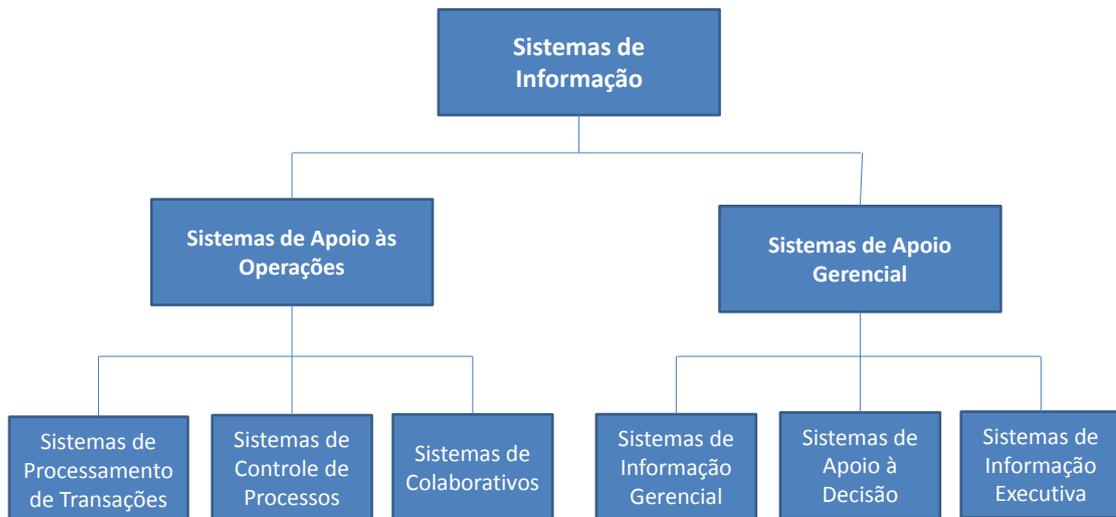
Rezende & Abreu (2013) afirmam que a irracionalidade nas interações entre os sistemas causa problemas e conseqüentes ineficiências operacionais e decisórias, afetando diretamente o processo de tomada de decisão empresarial, em todos os níveis. A integração dos sistemas de informação é realizada pela relação entre entrada, processamento e saída.

Laudon & Laudon (2011) enfatizam que estas três atividades geram conclusões que as organizações necessitam para tomar decisões controlar operações e analisar problemas.

Os SIs de acordo com a abordagem, o objetivo, o foco, a forma como a informação é disponibilizada e a que se destina podem apresentar várias classificações (ALMEIDA et al, 2002).

O'Brien (2010) apresenta a classificação dos Sis segundo o apoio às Operações e quanto ao apoio à tomada de Decisão Gerencial (Figura 2.1). Os Sistemas de Apoio às Operações produzem uma diversidade de produtos de informação para uso interno e externo. No entanto, não enfatizam a criação de produtos de informação específicos que possam ser mais bem utilizados pelos gerentes. Os Sistemas de Apoio Gerencial apoiam os gerentes (decisores) na tomada de decisão eficaz.

Figura 2.1- Classificação conceitual dos Sistemas de Informação



Fonte: O'Brien (2010, p. 23)

Os Sistemas de Informação Gerencial (SIG) fornecem para os gerentes informação na forma de relatório, enquanto os Sistemas de Apoio a Decisão (SAD) fornecem suporte computacional direto ao decisor durante o processo de decisão (O'BRIEN, 2010).

Um SAD é um sistema de informação que dá suporte ao decisor em qualquer nível, considerando o seu estilo. A tomada de decisão é realizada frente a problemas não estruturados e semi-estruturados (DAVIS & OLSON, 1985).

No primeiro caso, nos problemas não estruturados, as decisões tomadas são únicas dada sua natureza, e depende da intuição ou conhecimento a priori do decisor e esta solução não pode ser reaplicada sem a interferência dele. Já nas Semi-Estruturadas, as decisões não são totalmente definidas por procedimentos padrões e incluem aspectos estruturados (ALMEIDA et al, 2002).

Ainda segundo estes autores, a arquitetura do SAD é composta por uma *base de dados*, que podem ser acessados diretamente pelo usuário ou entram como input para a base de modelos; pela *base de modelos*, utilizando uma representação matemática do problema, no qual os algoritmos geram informação para auxiliar a tomada de decisão e; o componente *diálogo*, que concerne ao que o usuário conhece sobre o uso do sistema, opiniões de direcionamento, alternativas de representação do sistema, o conhecimento das bases e as linguagens de ação e apresentação.

2.1.2 Teoria da Utilidade Multiatributo

A Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Theory* - MAUT) foi derivada da Teoria da Utilidade e Teoria da Decisão (KEENEY e RAIFFA, 1976).

Segundo Almeida (2013), a construção de modelos que utilizam MAUT inclui, geralmente, a abordagem da Teoria da Decisão, que em seu enfoque Bayesiano permite ainda tratar as incertezas inerentes aos problemas a serem analisados através do uso de conhecimento a priori de especialistas no sistema de produção.

A diferença fundamental deste modelo é que as os modelos relativos à função valor estão relacionados a consequências determinísticas, enquanto os relativos à função utilidade estão relacionados a consequências probabilísticas, que é inserida na estrutura axiomática do MAUT (ALMEIDA, 2013);

O problema básico consiste em como estruturar e quantificar uma função utilidade u , ou seja, uma função f , de maneira que(2-1):

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)] \quad (2-1)$$

onde: u_i corresponde a uma função utilidade sobre o atributo x_i .

As condições de independência preferencial devem ser realizadas para obtenção da função utilidade multiatributo (ALMEIDA, 2013). Para tanto, são identificadas a independência em utilidade e a independência aditiva.

Em Almeida (2013) pode-se mostrar que se a condição de independência aditiva entre x e y for atendida, então existe mútua independência em utilidade entre x e y . No entanto, o contrário pode não ser verdadeiro. Isto é, se houver mútua independência em utilidade entre x e y , não se pode afirmar que haja independência aditiva.

2.1.3 Gerenciamento de Riscos

Segundo a *Society of Risk Analysis* (SRA, 2014), a análise do risco é um exame detalhado, incluindo a avaliação de riscos, avaliação de riscos e alternativas gestão de riscos, realizado para compreender natureza indesejada, consequências negativas para a vida humana, a saúde, a propriedade ou o ambiente; um processo analítico para fornecer informações em relação a eventos indesejáveis; o processo de quantificação das probabilidades e consequências esperadas para os riscos identificados.

Para Frank (1995) o Risco, de maneira generalizada, é a Incerteza associada com a realização de qualquer parâmetro, objetivo, critério ou exigência de uma decisão.

Especificamente para a segurança, o risco é tido como a frequência de ocorrência (com incerteza) de estados finais desejados, onde o grau de gravidade de cada estado final está incluído. A avaliação de risco é o processo de desenvolvimento de um modelo de risco que pode ser quantificado com incertezas. A gestão de riscos é o processo de priorização do risco, desenvolvimento de estratégias de modificação de riscos e tomada de decisão no contexto de incertezas quantificadas. A combinação de avaliação e gestão de riscos resultam na Análise de Risco.

O caso clássico de análise de decisão para a gestão do risco considera a situação em que o avaliador das probabilidades e risco também é o decisor. Neste caso, é possível argumentar que o uso de probabilidade (subjéitiva) como a única medida de incerteza é adequada porque a subjéitividade da avaliação é trazida no esquema de decisão de forma coerente pelo decisor. (AVEN et al 2014).

Um alto valor de probabilidade pode ser atribuído a um ataque contra uma instalação específica, ea resposta de gestão de risco é a implementação de medidas de proteção adequadas. Isso pode identificar alvos adequados para avaliação das probabilidades dos agentes de ataque e reduzi-los, mediante avaliação a fundo de sua ocorrência (AVEN e ZIO, 2014).

Koornneef et al (2010) define que o risco pode ser obtido como o produto da probabilidade e efeito de um evento acidental adverso e que cenários de falhas têm uma certa probabilidade atribuída a eles com base julgamentos de especialistas ou heurísticas.

Para Brito et al (2010), o gerenciamento de riscos é uma atividade crítica para muitos processos e instalações que apresentem riscos tecnológicos, principalmente para substâncias perigosas.

2.1.4 Análise de Robustez

Conforme Homma & Saltelli (1996), a análise de sensibilidade (AS) de uma saída do modelo visa quantificar a importância relativa de cada um dos parâmetros de entrada do modelo na determinação do valor de uma variável de saída. Muitos métodos diferentes têm sido desenvolvidos para Análise de Sensibilidade. As várias técnicas podem ser classificadas em dois ramos principais, dependendo da configuração com problema: O tipo 'global', para distingui-los dos métodos "locais", onde apenas um ponto do espaço dos fatores é explorado, e os fatores são alterados um de cada vez.

Análise de Sensibilidade Global (ASG) centra-se na incerteza sobre saída toda a gama de valores dos parâmetros de entrada. Dentro desse cenário de incerteza varia, em diferentes

princípios, para cada parâmetro, os dados de entrada para a análise. Estes Intervalos são valiosos, eles representam nosso conhecimento ou a falta dele. A Análise de sensibilidade pode, então, ajudar a identificar parâmetros-chave, cuja incerteza afeta mais a saída. Este por sua vez pode ser usado para estabelecer experimentos, eventualmente levando a uma melhor definição do parâmetro desconhecido e, portanto, a uma redução da sua incerteza. O processo pode ser repetido até um nível aceitável do Intervalo de incerteza de que a saída é alcançado.

Ainda segundo estes autores, no problema oposto, a ênfase está em elucidar os principais parâmetros de um sistema complexo, não no que diz respeito à incerteza de saída, mas com respeito a própria saída. Essa é a Análise de Sensibilidade local (ASL). Nesta configuração, se está interessado em algum tipo de derivado (ou Jacobiana) da saída do modelo em relação ao modelo de entrada do problema, possivelmente normalizada pelos meios ou desvios padrão das variáveis de entrada / próprias saídas. O Intervalo de entrada do parâmetro assim explorado não representa a nossa incerteza sobre esse parâmetro.

Várias técnicas de Análise de Sensibilidade Global são encontradas na literatura. Saltelli et al (2008) faz um estudo detalhado de muitas destas técnicas, dentre elas métodos baseados em variância, métodos de efeitos elementares, Métodos Monte Carlo e algumas variações deste, entre outros.

Outras técnicas utilizam de Sensibilidade Global e redução de variância. Detalhes e exemplos podem ser encontrados em Sobol & Kucherenko (2010) e Sobol & Levitan (1999).

O método Sobol está relacionado com a análise de variância (ANOVA) e decompõe-se a variação do modelo em uma série de efeitos que representam a influência de cada entrada, representado por uma distribuição de probabilidade, e as suas interações.

Helton (1993) faz uma revisão de técnicas de ASG incluindo formas de análise diferencial, as medidas de correlação de regressão com base em Monte Carlo e o teste de sensibilidade de amplitude de Fourier (*Fourier Amplitude Sensitivity Test- FAST*). Ainda segundo este autor, cada abordagem para análise de incerteza e sensibilidade tem suas vantagens e desvantagens, e todas têm sido aplicadas com sucesso.

2.1.4.1 O método Monte Carlo

Na aplicação desta técnica, os dados são artificialmente gerados empregando-se um Gerador de Número Aleatório (GNA) e uma distribuição de frequências da variável de interesse. Estes são dois pontos fundamentais na aplicação desta técnica e na sua posterior aplicação em programas de simulação. O Método Monte Carlo (MMC) é um conceito básico para compreender os procedimentos que ocorrem dentro de uma simulação. Usando o MMC, é

possível reproduzir no modelo, o comportamento das inúmeras variáveis aleatórias que compõem os sistemas do mundo real (FREITAS FILHO, 2008).

Esses números pseudo-aleatórios, (muitas vezes chamados de números aleatórios), são ingredientes fundamentais para experimentos estatísticos, simulação de sistemas estocásticos, análise numérica com métodos de Monte Carlo, algoritmos probabilísticos, jogos de computador, criptografia, e máquinas de jogos de azar, etc. (L'ECUYER, 2001).

Helton (1993) apresenta em seu trabalho vantagens de utilização da Simulação Monte Carlo, dentre as quais cito abaixo as vantagens relacionadas a sua utilização no modelo de Análise de Risco de Gasodutos de Transporte de Gás Natural:

- a. Monte Carlo é particularmente adequado para problemas de análise em que há grandes incertezas associadas com as variáveis de entrada. Em particular, a análise diferencial e metodologia de superfície de resposta tendem a executar mal quando relações entre as variáveis de entrada e de saída são não-lineares e as variáveis de entrada têm grande incertezas.
- b. Muitas vezes é necessário estimar funções de distribuição. Técnicas Monte Carlo fornecem estimativas diretas de funções de distribuição, enquanto a análise diferencial e a abordagem *FAST* não se destinam a estimativa destas funções.
- c. Técnicas Monte Carlo não requerem sofisticação que vai além do problema de análise de interesse. Em contraste, a análise diferencial, a metodologia de superfície de resposta e o *FAST* requerem uma grande quantidade de especialização e conhecimento para fazê-los funcionar. A análise diferencial e a abordagem *FAST* requerem sofisticados cálculos numéricos; a aplicação da metodologia de superfície de resposta pode requerer conhecimentos especializados em design experimental e construção de superfície de resposta.
- d. A Simulação Monte Carlo cria um mapeamento a partir da entrada de análise para os resultados da análise. Este mapeamento é rico em informações, devido à estratificação completa ao longo da gama de cada variável de entrada e a variedade das variáveis de saída que podem ser geradas e salvas. Uma vez produzido e armazenado, este mapeamento pode ser explorado de várias maneiras. Análise diferencial é inerentemente local e a metodologia de superfície de resposta emprega uma estratificação muito escassa.

2.1.5 Escolha do teste estatístico adequado

Para a determinação do teste estatístico a ser utilizado, deve-se levar em consideração como a amostra foi obtida, a natureza e as características da população e a escala de mensuração dos dados. (MONTGOMERY, 2009; DEVORE, 2006; SIEGUEL, 1977).

A Estatística Não-Paramétrica pode ser definida como uma coleção de métodos estatísticos aplicada a conjuntos de dados onde as suposições distribucionais necessárias para aplicação de uma técnica clássica (Intervalo de Confiança, Teste de Hipótese) não são satisfatoriamente atendidas (SIEGUEL, 1977).

Por apresentar procedimentos que são válidos simultaneamente para muitos tipos de distribuições, estes procedimentos são chamados de livres de distribuição ou não-paramétricos (MONTGOMERY, 2009; DEVORE, 2006).

MONTGOMERY (2009) ressalta que os testes não-paramétricos não utilizam toda a informação fornecida pela amostra. Como resultado disso, um procedimento não-paramétrico tem necessidade de um tamanho maior de amostra para o procedimento não-paramétrico com relação ao paramétrico e com isso, a perda de eficiência geralmente não é grande e frequentemente a diferença no tamanho da amostra é pequena.

Doane & Seward (2008) apresenta como vantagens da estatística não-paramétrica: podem frequentemente ser utilizadas para pequenas amostras; geralmente são mais poderosos que um teste paramétrico quando não pudermos assumir normalidade dos dados; podem ser usados para dados ordinais. Como desvantagens os autores apresentam: requerem tabelas especiais pra amostras pequenas e; os testes paramétricos são geralmente mais poderosos, se a normalidade puder ser assumida.

2.1.5.1.1 Correlação para duas amostras independentes

Frequentemente há interesse em verificar a existência de associação entre k conjuntos de valores e também o grau desta associação. É necessário também testar a significância estatística deste coeficiente.

Para o caso bivariado pode-se analisar o grau de correlação entre as amostras utilizando coeficientes de correlação por postos e, portanto, os dados devem ser apresentados em escala de mensuração pelo menos ordinal.

O coeficiente de Spearman tem a vantagem de estar linearmente relacionado com o coeficiente de concordância de Kendall (ω) e tem poder-eficiência de 91% com relação ao teste paramétrico correspondente (Pearson).

O Coeficiente de correlação por postos τ de Kendall é generalizável para um coeficiente de Correlação Parcial por Postos de Kendall¹ $\tau_{xy,z}$ que elimina os efeitos de variação devidos a uma terceira variável. Tem distribuição amostral que praticamente se confunde com a distribuição normal, mesmo em amostras tão pequenas quanto 8 e tem poder eficiência equivalente ao do Coeficiente de Spearman (91%) e sua mensuração deve ser no mínimo ao nível ordinal (SIEGEL, 1977).

Dada sua natureza de transformação de postos e sua avaliação ser obtida a partir da diferença entre dois postos, o cálculo do Coeficiente de Spearman torna-se trabalhoso para o caso de k amostras independentes

2.2 Revisão Bibliográfica sobre análise de robustez em modelo de decisão multicritério de avaliação de risco

Esta seção trata das diversas aplicações de análise de sensibilidade e robustez em modelos de avaliação de risco, mostrando a ampla aplicação, versatilidade e principalmente suas contribuições. Primeiramente é mostrada a análise de robustez em modelos de decisão multiobjetivo no contexto de risco e em seguida, avaliação de sensibilidade e robustez em modelos de risco em gasodutos, com diferentes aplicações.

2.2.1 Análise de robustez em modelo de decisão multicritério de avaliação de risco em um contexto amplo

De acordo com SRA (2014), avaliação do Risco é o processo de estabelecimento de informações sobre níveis aceitáveis de risco e/ou níveis de risco para um indivíduo, grupo, sociedade ou o meio ambiente.

Herva (2013) faz revisão bibliográfica sobre as vantagens de combinar ferramentas complementares de avaliação ambiental, Avaliação do ciclo de vida e de avaliação de risco ambiental. Neste trabalho são listados modelos multicritério adotados em suas referências, tais como MAUT, PROMETHEE, ELECTRE, AHP, MACBETH (approach – *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) e lógicas fuzzy. Uma observação relevante deste estudo é que metade dos artigos revisados incluem análise de sensibilidade para pesos dos critérios ou para parâmetros que caracterizam cada método multicritério em particular.

¹ Para detalhes consultar, Siegel (1977).

Regos (2013) apresenta em comparação de risco geral das quatro cadeias de energia mais importantes (carvão, nuclear, a gás, hidráulica). Dois modelos de decisão multicritério, o AHP eo método PROMETHEE, foram aplicados. São avaliados os acidentes graves, o terrorismo, os riscos ambientais e de saúde, risco de variações de preços. A análise de sensibilidade dos pesos foi executada para estender a validade dos resultados e demonstrar a força analítica da abordagem multicritério.

O trabalho de Alvarez-Guerra et al (2010) utiliza a SMAA(*Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis*), utilizando algoritmos PROMETHEE II para priorizar alternativas de gestão de sedimentos. Esta abordagem segue para determinar onde a intervenção é mais crítica, baseado no risco (associado a aspectos ecológicos e humanos devido à exposição a substâncias químicas). Os autores utilizam simulações Monte-Carlo para explorar todos os valores possíveis para os pesos e medidas de critérios, e avalia a robustez da seleção para gestão de risco. Para cada critério e alternativa são avaliadas as distribuições segundo distribuição triangular.

O estudo de Tervonen(2009) concentra-se na região de Lorraine França, onde o ferro foi extraído por mais de um século. Os túneis de mineração subterrânea causaram afundamento do solo, o que causou edifícios em colapso. O objeto deste estudo foi o de partilha do país em zonas e atribuir essas zonas em categorias de risco pré-definidos(Categoria 1 é para zonas com maior risco e Categoria 4 para baixo), a fim de decidir quais as zonas que precisam de vigilância constante. Neste artigo foi apresentado o método SMAA-TRI (baseado em *Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis*) para analisar a robustez dos resultados ELECTRE TRI com base em uma análise de estabilidade de parâmetros. Simulação de Monte Carlo é aplicada a fim de descrever para cada alternativa a parcela de valores de parâmetros a ele atribuídos em diferentes categorias.

À luz dos conceitos de avaliação de risco, Frank (1995) utiliza modelo AHP (*Analytic hierarchy process*) para avaliar e decidir entre estratégias de melhoria de segurança em face do custo, segurança e outras incertezas para os veículos de voo da NASA, veículos lançadores e unidades de investigação, fornecendo informações básicas sobre a necessidade ea utilização da avaliação e gestão de riscos de acidentes que poderiam ser iniciadas por qualquer das Unidades de Potência Auxiliar (APU) do módulo do ônibus ou do Poder Unidades de foguetes de combustível sólido da nave hidráulico.

2.2.2 Análise de Sensibilidade para Avaliação de risco em dutos

Esta seção terá como objetivo mostrar a análise de sensibilidade realizada nas avaliações de risco em dutos a fim de identificar fatores de relevância (parâmetros) tais como tamanho, diâmetro, Fluxo de Calor dentre outros, para referência da análise de sensibilidade de gasodutos de gás natural mediante abordagem de avaliação multicritério de risco.

A avaliação de risco em gasodutos com abordagem Multicritério podem ser encontradas em detalhes em Brito & Almeida (2009), Brito et al (2010) Alencar & Almeida (2010), Lins & Almeida (2012) para avaliação de gasodutos de transporte de gás Natural e de Hidrogênio.

Alzbutas et al (2014) apresentam informações estatísticas disponíveis e análise probabilística relacionada a falhas de dutos de gás natural, baseado nos dados da UKOPA (*United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association*) no seu relatório para o ano de 2009, apresentando estimativas médias estatísticas dependentes da idade de taxa de falha (a frequência de falha por ano), que foram calculados para cada 5 anos, no período de 1969-2008. Para estimativa das taxas de falha na análise da confiabilidade dependente da idade e avaliação de combustão é realizada aplicando métodos bayesianos e modelos de tendência da taxa geral. A alimentação destes dados foi explorada por MCMC (*Markov Chains Monte Carlo*).

Para Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados ao fluxo de calor, foram assumidas distribuições de probabilidade normal ou uniforme (ora assumidos, ora baseado em dados). Como resultado da análise de sensibilidade deste estudo, verificou-se que distância do centro tem a maior influência sobre o fluxo de calor causado pela combustão do gasoduto.

Uma Análise da interação térmica em sistemas de dutos é apresentado por Mazzola (1999), que faz avaliação de risco em gasodutos de gás natural considerando os cenários acidentais que possam ocorrer como consequência de uma falha do gasoduto e os efeitos térmicos provocados pelo jato de fogo, a partir da avaliação de diferentes tamanhos de ruptura. A análise de sensibilidade foi realizada para investigar a influência de diversos parâmetros de entrada sobre os resultados da análise. Esta investigação foi feita para o pior caso entre aqueles que foram previamente analisados (2% de ruptura, incidindo a jato). Foram feitas variações dos parâmetros: distância entre eixos do gasoduto (X_n), a temperatura da chama (TF) e Velocidade do gás dentro de tubulação (V_g). As variações destes foram realizadas em $\pm 20\%$, sendo caracterizada como uma análise local de sensibilidade. Uma vez estabelecido os riscos, os resultados da análise podem sugerir possíveis medidas de intervenção, tais como a implementação de medidas de proteção ou a adoção de diferentes estratégias de gestão de acidentes.

Análise de sensibilidade global do impacto das impurezas em caso de falha de gasoduto CO₂ é apresentado em Brown et al (2013). Este estudo mostra que as extensões destes gasodutos compreendem geralmente várias centenas de quilômetros, possivelmente em pressões de linha acima de 100 bar. A liberação deste gás é asfíxiante em concentrações superiores a 7% a segurança dos dutos de CO₂, diretamente ligado ao aquecimento global.

Para a análise de sensibilidade global deste modelo, foram aplicados os métodos Monte Carlo (MC), Quasi - Monte Carlo (QMC) e uma extensão do *FAST* (*Fourier amplitude sensitivity test*), o *EFAST*². Além disso, foi descrita uma técnica baseada em redes esparsas gPC (*generalised polynomial chaos*). Esta formulação permite a simples avaliação dos índices a Sobol, enquanto que a grid de amostragem esparsa reduziu consideravelmente o número de avaliação das amostras necessárias. Como resultado, a aproximação dos índices da Sobol³ obtido com apenas 7 pontos mostrou apresentar estimativa razoável dos índices e sua ordenação. Para efeitos de comparação, a simulação de MC e QMC de tamanhos semelhantes também foram realizadas, no entanto, estes não conseguiram produzir resultados significativos, para este caso. Dado o bom desempenho do GPC no cálculo dos índices de Sobol descritos, este método foi aplicado ao problema de taxa de saída de CO₂.

Em Koornneef et al (2010) são realizadas avaliações de risco quantitativas (QRAs) para gasodutos de CO₂. As fontes de incerteza que foram avaliadas são: taxas de insucesso, a pressão da tubulação, temperatura, comprimento, diâmetro, seção tamanho do orifício, tipo e direção do lançamento, as condições meteorológicas, o diâmetro do jato, fração de massa de vapor na liberação e da relação dose-efeito para CO₂.

Na análise de Sensibilidade, para cada parâmetro e escolha metodológica (que é diferente para parâmetros distintos) é assumido um valor padrão. Quando o valor de um parâmetro é variado para estimar a sensibilidade do seu resultado, todos os outros parâmetros são ajustados pelo valor de efeito. No total, foram desenvolvidos 14 conjuntos de cenários de falha. Cada conjunto é composto por dois cenários de falhas: uma para ruptura completa e um para furo. Cada conjunto pode ser comparado com, pelo menos, um outro conjunto no qual um parâmetro é diferente. Por fim, foi possível analisar para cada parâmetro de entrada variado na análise de sensibilidade, seus limites e foi possível também inferir sobre o modelo, como por exemplo, os resultados obtidos indicam que os riscos provenientes de furos de CO₂ deverão ser significativamente menor do que o de rupturas. Mitigação de riscos deve ser focada em reduzir

² Maiores Detalhes consultar Saltelli et al (2009)

³ Sobol (2001)

a probabilidade e as consequências de grandes lançamentos e menos em reduzir a probabilidade e as consequências de vazamentos de pequeno porte. Opções para mitigar esses riscos estão disponíveis, mas irá adicionar o custo da infra-estrutura dos gasodutos.

Gharabagh et al (2009) apresenta modelo para avaliação e gerenciamento de risco de dutos de transporte e alimentação de produtos químicos muito tóxicos e inflamáveis, tais como cloro, amônia, butadieno, etc. A maioria destes dutos são colocados acima do solo em áreas próximas à estrada ou auto-estrada. Foi proposto um modelo de risco relativo (modelo de índice) e modelo de risco absoluto (modelo probabilístico). O duto de cloro foi selecionado com base nas distâncias de alto risco para a análise de risco. Além disso, os índices de risco relativo foram também determinados em todas as partes do duto. Por fim, a análise de sensibilidade possibilitou a avaliação para mitigação do risco com base em alterações nos índices de risco relativo, antes e após as recomendações, podendo inferir que estas são correlacionadas com as mudanças no risco individual do duto.

A análise da confiabilidade de dutos de planta de água pesada contendo defeitos de corrosão devido à H_2S foi realizado com a finalidade de estabelecer a inspeção baseada em risco (*RBI*) (SANTOSH et al, 2006). O duto que transporta H_2S é mais suscetível à corrosão interna, reduzindo assim a sua capacidade de carga. A produção de água pesada em sulfureto de hidrogênio (H_2S), com base plantas de água pesada envolve manipulação de grandes quantidades de H_2S , o qual é tóxico e altamente inflamável. Liberação acidental até mesmo de uma pequena quantidade de H_2S tem enormes consequências sobre as pessoas da fábrica e o público em torno, além das perdas de produção, reparação e manutenção.

Priorização de risco desses componentes permite determinar o nível ótimo de inspeção ou a eficácia de inspeção necessária para manter o risco em seu nível atual com o envelhecimento de componentes. A incerteza das variáveis aleatórias em que a função de estado limite depende é modelado usando distribuições probabilísticas normais e não-normais. Análise de sensibilidade foi realizada em variáveis aleatórias envolvidas no problema para identificar os parâmetros importantes através da influência destes para os resultados de probabilidade de falhas para o gasoduto.

Khan e Haddara (2004) apresentam uma metodologia de concepção de um programa de inspeção e manutenção ideal aplicado a uma base de produção de óxido de etileno. Utiliza a abordagem de manutenção baseada no risco (RBM) é baseada na integração da abordagem de confiabilidade e uma estratégia de avaliação de risco para obter um cronograma de manutenção ideal. O risco é calculado através da combinação dos resultados das análises de sequência e a

probabilidade e posteriormente comparado com critérios conhecidos aceitáveis. As frequências das tarefas de manutenção são obtidos através da minimização do risco estimado. Para este contexto, Etileno é transportado da zona de armazenamento localizada na vizinhança remota para a unidade de reação, através do gasoduto. O cenário de acidente mais credível prevista para esta unidade é a liberação de etileno através de um vazamento ou ruptura, fazendo com que o desenvolvimento de uma nuvem de vapor com fonte de ignição, cause uma bola de fogo. São considerados fatores de risco individuais e sociais. Das cinco unidades mais perigosas em uma instalação de produção de etileno considerados no trabalho, o gasoduto de transporte de etileno é a unidade que tem o maior risco. A análise de sensibilidade realizada consiste na verificação dos dados de falha conforme distribuição Weibull e lognormal, avaliando a robustez dos resultados para Intervalos do programa de manutenção.

Bonvicini (1998) fornece uma aplicação da lógica *fuzzy* para a avaliação de risco do transporte de matérias perigosas por estrada e gasoduto, a fim de avaliar as incertezas que afetam ambas as estimativas de risco individuais e sociais. Na avaliação de incerteza pela lógica *fuzzy*, os parâmetros de entrada incertos são descritos por números *fuzzy* e os cálculos são realizados utilizando aritmética difusa; as saídas também serão números *fuzzy*. A partir da análise de risco de transporte, foi possível encontrar funções de densidade de probabilidade para algumas entradas incertas. Para os outros, para os quais foram encontradas apenas poucas informações e não funções de densidade de probabilidade, formas simples, como triangular, trapezoidal, Gauss ou mais geralmente simétrica, têm sido usados para representar números *fuzzy*. A análise de sensibilidade foi realizada de maneira a identificar as variáveis que contribuem principalmente para a amplitude da incerteza, consideradas também como números *fuzzy* no tempo. Por fim, uma comparação com a análise de sensibilidade é realizada com relação a Simulação Monte Carlo. Os autores acrescentam que se uma boa ferramenta computacional e boas funções densidade de probabilidade para todas as entradas (dos parâmetros) estão disponíveis, a análise estatística tradicional baseada no método de Monte Carlo pode ser aplicado com sucesso para avaliar a incerteza. Uma vez que os dados disponíveis de análise de risco de transporte de materiais perigosos são pequenos e pouco disponíveis, um procedimento computacional simples e menos intensivo como a lógica *fuzzy* pode ser uma alternativa útil para quantificar a incerteza.

2.3 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho

Almeida et al (2001) observa que a área de manutenção tem passado por uma evolução grande em termos de métodos aplicáveis ao seu processo de gerenciamento e decisão.

Aven & Zio (2014) ressaltam que as técnicas de avaliação e gestão de riscos têm sido aprimoradas através da investigação e aplicação, de novas perspectivas e desafios.

A avaliação probabilística do risco às vezes também referida como uma avaliação quantitativa dos riscos sistematiza os conhecimentos, informações e incertezas sobre os fenômenos envolvidos nas atividades estudadas (FLAGE et al, 2014).

Na avaliação e gestão de riscos, eventos adversos a vida humana, a sociedade, a diversidade ambiental e animal, além de consequências financeiras são avaliadas nos quais a estimativa do risco está diretamente ligada às relações de causa e consequência.

Ao longo dos anos, diferentes tratamentos têm sido aplicados para estimar riscos em gasodutos. Brito & Almeida (2009) destaca que, se a análise de risco considera apenas aspectos humanos ou financeiros, sua avaliação é insuficiente.

Na identificação dos riscos, ocorre o reconhecimento que um perigo existe e então esforços são realizados para tentar definir as suas características. Muitas vezes, riscos existem e são medidos por algum tempo antes de suas consequências adversas sejam reconhecidas. Em outros casos, a identificação de riscos é um processo deliberado, e espera-se antecipar possíveis riscos (SRA, 2014).

Para a tomada de decisão ser mais assertiva possível deve-se haver um nível de conhecimento adequado para a entrada de um modelo, expressando as incertezas a partir de métricas de risco.

Comumente na literatura, são analisados apenas uma dimensão de risco. À luz da necessidade de contribuir para análise de diversos aspectos, Brito & Almeida (2009) propuseram modelo multidimensional de avaliação de risco em gasodutos de gás natural, agregando perspectivas de risco financeiro, humano e ambiental. O critério financeiro está relacionado as perdas associadas a perdas de receitas, por ressarcimento de clientes, danos a propriedades, multas, indenizações; o critério humano baseia-se na estimativa do número de pessoas atingidas fisicamente devido a um cenário acidental e o critério ambiental leva em consideração impactos sobre a biodiversidade.

A partir da incorporação das preferências dos decisores, sendo estes responsáveis pela gestão de gasodutos, é possível modelar seu comportamento na tomada de decisão ao exercer atividades de planejamento, manutenção e prevenção e possibilitar a mitigação dos riscos e

consequentemente as consequências a eles associados. Esta é uma necessidade realística diária na tomada de decisão, e por conseguinte, Brito & Almeida (2009) propuseram uma modelagem probabilística através da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), a partir de uma estrutura axiomática do estabelecimento de preferências do decisor. Como resultado da avaliação do modelo multicritério, uma hierarquia de riscos multidimensionais é obtida.

Em sequência, Brito et al (2010) integraram ao modelo de Brito & Almeida (2009), uma abordagem não compensatória, o ELECTRE TRI, classificando as seções do gasoduto de gás natural em categorias de risco. Este modelo disponibiliza ao decisor uma priorização das seções que devem receber medidas preventivas em um dado espaço de tempo, bem como a complexidade destas medidas.

A abordagem multiobjetivo foi incorporada à avaliação de risco de gasodutos de transporte de hidrogênio por Alencar & Almeida (2010). Para análise de cada dimensão são necessárias a agregação de diversos parâmetros inerentes ao gás estudado, parâmetros relacionados às probabilidades de ocorrência e, por fim, parâmetros associados as preferências do decisor.

A complexidade de combinação destes parâmetros é aumentada à medida que os modelos abrangem subcritérios, como no modelo de Lins & Almeida (2012) que leva em conta consequências para os seres humanos (tais como queimaduras, etc.) e considera a diversidade ecológica do entorno do gasoduto. Os modelos propostos por Alencar & Almeida (2010), Brito & Almeida (2009) e Brito et. al (2010) apenas incluem uma análise das mortes na dimensão humana, e a área de vegetação destruída na formulação do problema.

Mazzola (1999), em sua avaliação de risco em gasodutos de gás natural, afirma que o resultado do estudo depende diretamente dos parâmetros analisados. Sendo assim, a análise de sensibilidade realizada com o propósito de avaliar a variação de resultados como uma função da variação de dados problema, identificou grande influência dos parâmetros sobre o resultado final.

Na construção do modelo de decisão multicritério é de suma importância a realização da análise de sensibilidade. Sua contribuição vai desde a verificação de inconsistências das preferências do decisor até a identificação de parâmetros que mais afetam a saída do modelo.

O resultado final da avaliação global das alternativas depende da análise de sensibilidade, que pode apresentar problemas e requer a revisão de etapas anteriores do modelo (ALMEIDA, 2013).

Uma vez identificada a sensibilidade de um parâmetro, maior atenção é requerida no estabelecimento deste, como por exemplo, em sua coleta de dados. Novos valores são obtidos e refinações sucessivas do modelo devem ser realizadas.

Como o modelo estudado é baseado na avaliação de fatores que não estão sob controle do decisor, ou seja, é baseado no risco, atenção especial é requerida para a estimação das probabilidades de ocorrência destes fatores.

Baseado na importância do refinamento sucessivo do modelo e sua complexidade como demonstrado anteriormente, verifica-se a possibilidade de aprofundamento de análise dos parâmetros que compõe o modelo, avaliando a iteração conjunta ou parte destes. Visto que para ter acuracidade na análise de sensibilidade um elevado número de simulações deve ser realizada, necessita-se de uma ferramenta computacional para modelar o problema.

Além da necessidade supracitada, a modelagem computacional deve possibilitar ao fim, meios de apoiar a tomada de decisão conjuntamente com a disponibilização de informações gerenciais.

No âmbito analisado, propõe-se contribuir para a análise detalhada dos parâmetros do modelo de Brito & Almeida (2009) a partir de Simulações Monte Carlo, estabelecendo informações importantes para análise do modelo, indicando regiões de sensibilidade e inferindo a robustez do modelo para diferentes graus de significância. Para tratar destes dados e gerar informação a partir deles, um Sistema de Apoio a Decisão é apresentado como meio para atingir estes objetivos.

2.4 Metodologia Adotada

A metodologia baseia-se na avaliação de robustez de um modelo de análise de riscos multidimensionais a partir do modelo proposto por Brito & Almeida (2009). Nele utilizou-se a Teoria da Utilidade Multi-Atributo para o tratamento da Análise de risco de gasodutos de Gás Natural, cuja forma aditiva para o cálculo da utilidade foi utilizada. Para maiores informações, consultar (KEENEY & RAIFFA, 1976).

Para a Análise de sensibilidade e robustez fez-se necessário Revisão de Literatura e Bibliográfica para definição dos passos de análise apresentados.

Com base no estudo realizado, desenvolveu-se o SAD para possibilitar as análises necessárias para inferência sobre o modelo.

Para o desenvolvimento da análise multicritério são levados em consideração cenários de simulação, que podem Considerar:

- Diferentes valores dos parâmetros que compõem o problema, mantendo o número de seções e de cenários de risco;
- Números distintos de Cenários de risco e/ou seções;
- A variação do comportamento do decisor para a obtenção das utilidades unidimensionais;
- Diferentes ordenações e valores das constantes de escala;
- Combinação de um ou mais destes fatores.

Uma vez estabelecido o cenário, são geradas simulações para avaliar o impacto das modificações para o problema.

As simulações dos parâmetros são realizadas a partir de Simulações Monte Carlo, cuja variação dos seus valores originais é obtida a partir de um percentual estabelecido pelo decisor e/ou analista, podendo ainda seguir uma distribuição de probabilidade Uniforme ou Triangular. O número de Simulações (casos) deve ser tão grande quanto necessário para atingir a variação esperada (FREITAS FILHO, 2008).

Para verificar a conformidade da variação segundo o cenário simulado, é imprescindível a aplicação do teste de hipóteses para avaliar a correlação entre os valores originais e os obtidos computacionalmente. Para isso, são analisadas a correlação de cada simulação com o ranking original e ao final dos casos, avaliada a correlação do τ médio, que é o coeficiente de correlação τ de Kendall. Para um número N de iterações em uma simulação Monte Carlo, uma série de τ_i será obtida e em seguida é necessário verificar a significância estatística destes valores. A propagação desta distribuição fornecerá informações sobre os limiares dos parâmetros e inferências sobre a robustez do modelo poderão ser realizadas (DAHER & ALMEIDA, 2012).

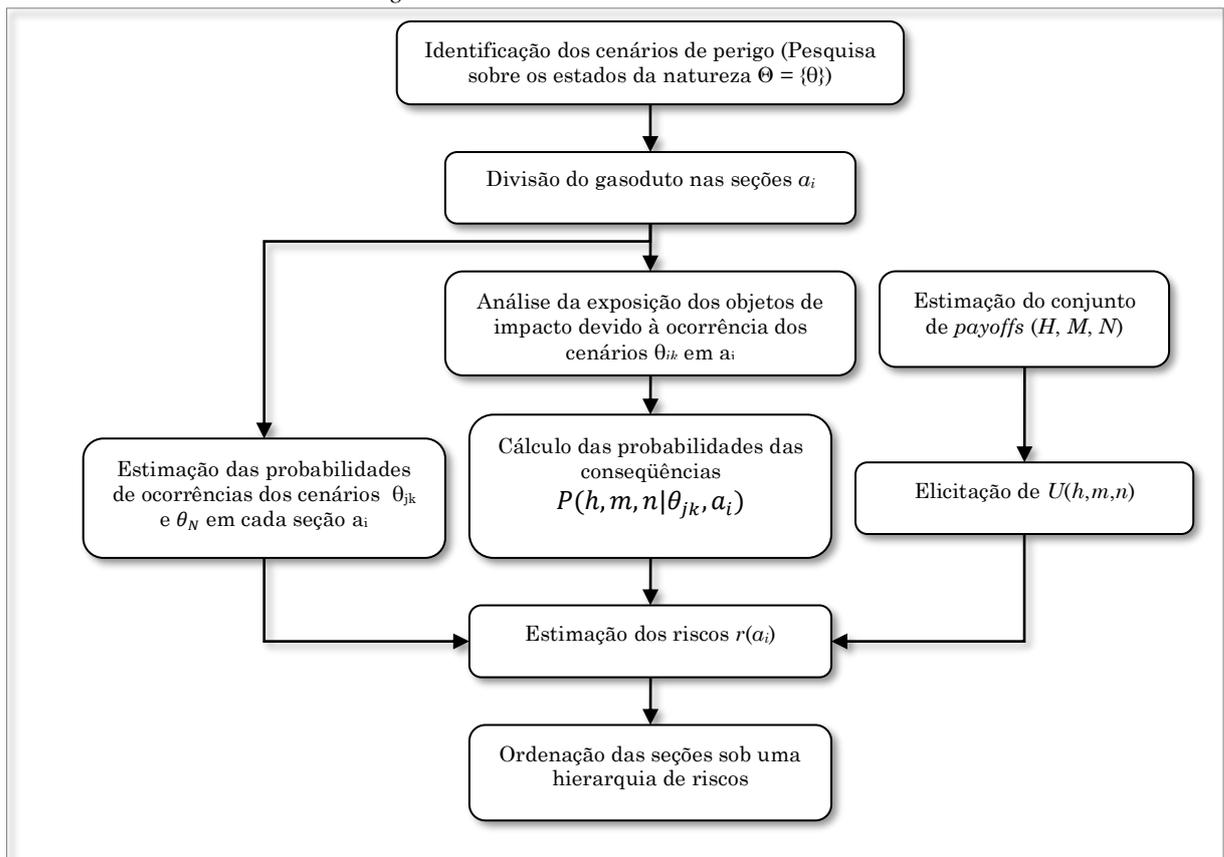
3 MODELO PROPOSTO PARA O SAD

3.1 Descrição do Modelo de Decisão

Trata-se de um modelo de decisão baseado em uma abordagem multicritério com o objetivo de priorizar seções de risco de gasoduto a partir da ordenação de seus diversos trechos (seções).

A análise baseia-se no trabalho de Brito & Almeida (2009), no qual o problema é bem definido e são analisadas dimensões de risco Ambiental (A), Financeira (F) e Humana (H), modeladas a partir da estrutura axiomática da *MAUT* (Teoria da Utilidade Multiatributo) na avaliação multidimensional ou multicritério de riscos. As subseções seguintes irão apresentar brevemente as características do problema de decisão multicritério descrito por Brito & Almeida (2009). A Figura 3.1 apresenta a estrutura do modelo de decisão.

Figura 3.1- Estrutura do modelo de decisão



Fonte: Brito & Almeida (2009)

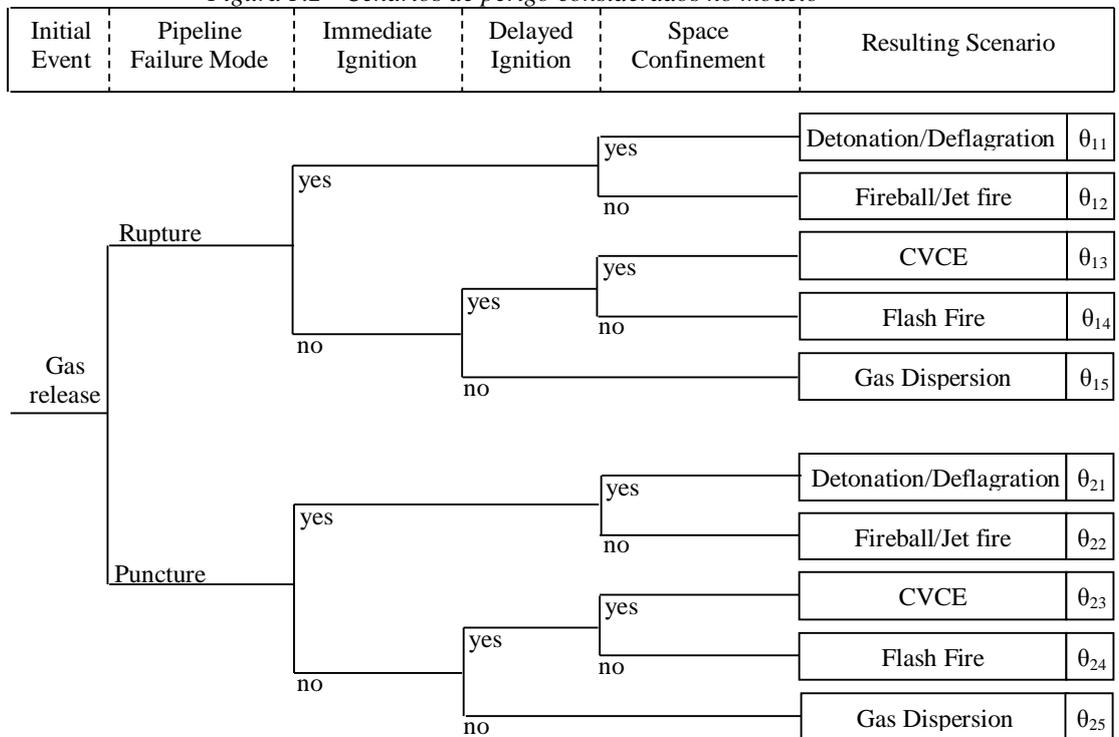
3.1.1 Identificação dos cenários de perigo

Esta etapa consiste na descrição de todos os possíveis cenários resultantes de vazamentos acidentais durante a operação do duto e também do cenário de Normalidade, ou seja, a situação em que o duto funcione sem vazamentos de qualquer natureza.

Uma vez identificados, os cenários formam o conjunto de estados da natureza $\Theta = \{\theta_{11}, \theta_{12}, \dots, \theta_{21}, \theta_{22}, \dots, \theta_{jk}\}$, relacionados ao modo de falha j e ao cenário de perigo resultante k .

Para este contexto foram identificados os principais cenários de perigo resultantes dos modos de falha (furo e ruptura) em um gasoduto e são mostrados na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Cenários de perigo considerados no modelo



Fonte: Brito & Almeida (2009)

3.1.2 Divisão do gasoduto nas seções a_i

A divisão em seções tem por objetivo analisar suas características particulares conforme cada dimensão de risco analisada. Para cada seção é possível considerar o risco total ao longo das alternativas, na qual cada alternativa pode ser formada por seções menores.

A definição das seções não segue um método específico, mas as considerações para delimitá-las compreendem características comuns (uniformes) dentro de uma mesma seção.

As seções obtidas definem um conjunto discreto de alternativas $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ e estas serão ordenadas em prioridade de risco.

3.1.3 Análise de exposição dos objetos de impacto

Nesta análise é preciso determinar uma área de perigo para cada seção do gasoduto. O modelo utilizado faz uma avaliação conservadora dos riscos envolvidos para cada cenário e seção, considerando a zona de perigo mais crítica para cada seção, associada ao pior cenário acidental que pode nela ocorrer.

É utilizado o raio máximo de perigo (*CDR – Critical Danger Radius*) proposto por Jo & Ahn (2002), dado pela Equação(3-1), para definição da abrangência das consequências analisadas:

$$CDR \cong 1,512 \cdot \frac{P_o^{1/2} \cdot d^{5/4}}{L_o^{1/4}} \quad (3-1)$$

Onde:

- *CDR* corresponde à distância máxima de perigo (m), adotando-se um fluxo máximo de calor de 15kW/m², para o qual a exposição de até 30 segundos tem aproximadamente uma probabilidade de 1% de provocar fatalidade;
- P_o é o valor de pressão constante (N/m²) na estação de compressão a montante na seção;
- d é o diâmetro do duto (m);
- L_o é a extensão do gasoduto a partir da estação de compressão a montante (m).

3.1.4 Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais θ_{jk} e do cenário de normalidade θ_N operacional para cada seção a_i

Para cada cenário acidental identificado na etapa descrita em 0, são obtidas as probabilidades *a priori*, $\pi_i(\theta)$ de ocorrência destes para cada seção a_i . O uso deste conhecimento faz-se necessário, pois muitas vezes é difícil obter dados frequentistas de taxa de falha (ρ) de alguns componentes do gasoduto, a taxa de vazamento do gasoduto, ou a probabilidade de ocorrência de um cenário acidental (θ_{jk}). Sua importância também é ressaltada pela difícil obtenção destes dados a partir de bases de dados nacionais, conforme descrito no Capítulo 1.

Outro aspecto abordado no modelo de Brito & Almeida (2009) é que os riscos de cada seção analisada apresentam como maior parcela a perda associada ao cenário de Normalidade Operacional. Este representa o cenário em que não há ocorrência de vazamentos e não há

impactos acidentais. Para este cenário, os valores obtidos para cada seção são próximos de 1, cuja utilidade da consequência é 1 (melhor consequência) e a perda é -1. Por consequência disto, o risco total para cada seção é muito próximo de -1.

3.1.5 Estimação do conjunto de *payoffs* (H , A , F)

A proposta deste modelo procura avaliar riscos considerando três principais dimensões na distribuição e transporte de gás natural via gasodutos: Riscos sobre seres humanos (R_H), Riscos Financeiros (R_f) e Riscos Ambientais (R_a).

Para a dimensão Humana, é utilizado um modelo conservador que considera a estimativa do número de pessoas atingidas fisicamente devido a um cenário acidental, apresentando ao menos queimaduras de segundo grau, não necessariamente de mortes.

Na dimensão Ambiental, são analisados impactos sobre a biodiversidade afetados e também se considera inadequado analisar monetariamente estas perdas. A verificação é baseada na área calculada em metros quadrados afetados pelo acidente.

As perdas monetárias são decorrentes dos prejuízos de um acidente. Estes correspondem à perda de receitas por interrupção do fornecimento, multas contratuais por interrupções no fornecimento do gás, multas e demais ressarcimentos por ocasionar danos à pessoas, ao meio ambiente ou à organizações e empresas, além dos gastos decorrentes da realização de manutenção do trecho acidentado e volta à normalidade operacional.

3.1.6 Elicitação da Função Utilidade Multiatributo

Os autores utilizam as funções utilidades sobre as consequências para incorporar a preferência do decisor ao risco nas perdas decorrentes de acidentes com vazamento de gás natural. Como o valor mínimo das três dimensões de consequências é zero, e é possível estimar aproximadamente um valor dentro da zona de perigo através do *CDR*, a elicitação pode ser realizada dentro de um conjunto fechado de consequências.

Inicialmente foi utilizada apenas a função exponencial para elicitar o comportamento perante o risco do decisor (para aversão e propensão) além da função linear, para o caso neutro ao risco. Neste trabalho propõe-se analisar além das funções citadas, a função logística a fim de identificar a região em que ocorre mudança na estrutura de preferências.

Os estágios do procedimento de elicitação da função utilidade multiatributo é baseado em Keeney e Rayffa (1976) cuja teoria foi explanada na seção 2.1.2 e a aplicação é detalhada na seção 3.2.1.

Considera-se a $U(h,a,f)$ uma função utilidade aditiva, tipicamente encontrada inclusive no contexto de problemas de manutenção. Dessa forma, segue que (3-2):

$$U(h, a, f) = k_h U(h) + k_e U(e) + k_f U(f) \quad (3-2)$$

onde $U(h)$, $U(a)$ e $U(f)$ são as utilidades unidimensionais para as dimensões de risco abordadas, respectivamente humana, ambiental e financeira e as constantes “ k ” são constantes de escala estimadas a partir de um procedimento de elicitación baseado na comparação entre loterias de *payoffs* $k_h + k_a + k_f$.

As utilidades unidimensionais são ajustadas mediante variação do parâmetro “ a ” na Equação (3-3) para distribuição exponencial e na Equação (3-4) para a logística. Os parâmetros “ b ” e “ c ” são ajustados automaticamente de maneira que os valores da utilidade estejam entre 0 e 1. Estas curvas devem ser moldadas de maneira a melhor definir o comportamento do decisor quanto ao risco analisado em cada critério.

$$y = b \exp(ax) + c \quad (3-3)$$

$$y = b \exp(-a/x) + c \quad (3-4)$$

3.1.7 Cálculo das probabilidades das conseqüências $P(h,m,n|\theta_{jk},a_i)$

Neste modelo, as conseqüências humanas, ambientais e financeiras ocorrerão numa forma aleatória e independente, com correlação insignificante, podendo, portanto, serem estimadas separadamente. À luz deste comportamento aleatório, a análise de sensibilidade apresentada posteriormente pode ser realizada de maneira a utilizar entradas aleatórias para avaliação da robustez do modelo.

As probabilidades podem ser representadas pelas respectivas funções de densidades de probabilidade, $f(a|\theta_{jk},a_i)$ e $f(f|\theta_{jk},a_i)$, nas dimensões ambiental e financeira. A dimensão humana é obtida por uma função de probabilidade, por se tratar de uma distribuição discreta de probabilidade $f(h|\theta_{jk},a_i)$.

3.1.7.1 Estimação da função consequência Humana

A consequência da dimensão humana despreza os efeitos de comunicação e interação entre as pessoas e considera que o ferimento de cada indivíduo em um cenário acidental corresponde a um ensaio independente de Bernoulli, $P(p_h | \theta_{jk}, a_i)$ dado pela equação (3-5).

$$P(p_h | \theta_{jk}, a_i) = \binom{n_{a_i}}{p_h} \cdot \delta^{p_h} \cdot (1 - \delta)^{n_{a_i} - p_h} \quad (3-5)$$

Onde

- θ_{jk} corresponde ao cenário acidental em análise;
- a_i corresponde a seção;
- p_h é o número de pessoas com ferimentos, queimaduras de primeiro ou segundo grau;
- n_{a_i} é número máximo estimado de pessoas a serem atingidas na zona de perigo associado a uma seção a_i ;
- δ é a probabilidade de uma pessoa na zona de perigo ser atingida e sofrer danos conforme Equação (3-6).

$$\delta = \alpha_{\theta_{jk}, a_i} \cdot (\omega \cdot P_{fat} + P_{fat}) \quad (3-6)$$

Os parâmetros relacionados a δ compreendem:

- P_{fat} é a probabilidade de ocorrer uma fatalidade, relacionada à probit Y através da Equação (3-7).
- ω representa quantas vezes mais provável que uma fatalidade é a ocorrência de, no mínimo, queimaduras de primeiro ou segundo grau. Este representa uma parcela da probabilidade de ocorrer uma fatalidade, logo sua relação é dada pela Equação (3-8):

$$P_{fat} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3-7)$$

$$\omega \cdot P_{fat} + P_{fat} \leq 1 \quad (3-8)$$

Y é considerada como uma variável aleatória gaussiana de média 5 e variância 1 e é calculado em Brito & Almeida (2009) a partir de uma expressão conservadora proposta Tsao & Perry (1979) obtida pela equação (3-9).

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

No qual t é o tempo de exposição de uma pessoa a um nível de radiação térmica (s).

O Fluxo de Radiação de Calor ($I_{\theta_{jk}}$) é obtido pela equação (3-10) e na unidade ($J/m^2 \cdot s$) (Jo & Crowl, 2008):

$$I = \frac{\eta \cdot \tau_a \cdot Q_{eff} \cdot H_c}{4 \cdot \pi \cdot (CDR)^2} \quad (3-10)$$

Para o qual:

η é a razão do calor irradiado pelo total de calor liberado pelo fogo (para o gás natural utiliza-se um valor constante igual a 0,2, valor estimado em laboratório para o metano),

τ_a é a transmissividade atmosférica,

Q_{eff} é taxa efetiva de vazamento de gás (kg/s),

H_c o calor de combustão do gás natural ($5,002 \times 10^7 J/kg$),

CDR é a distância radial do fogo ao local de interesse (m).

A transmissividade atmosférica pode ter valor constante igual a 1, mas no modelo de Brito & Almeida (2009), o valor de τ_a é obtido pela Equação (3-11), conforme Jo e Crow (2008):

$$\tau_a = 2,02 \cdot [P_w \cdot (RH) \cdot (CDR)]^{-0,09} \quad (3-11)$$

Onde:

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

A taxa efetiva de vazamento de gás (Q_{eff}) é obtida através da equação(3-12) de acordo com Jo e Crow (2008):

$$Q_{eff} = \begin{cases} \frac{1.783 \times 10^{-3} \cdot A_p \cdot \alpha \cdot P_0}{\sqrt{1 + 4.196 \times 10^{-3} \cdot \alpha^2 \cdot \frac{L}{d}}}, & \alpha^2 \cdot \frac{L}{d} \leq 2410 \\ 5,349 \times 10^{-4} \cdot A_p \cdot \alpha \cdot P_0, & \alpha^2 \cdot \frac{L}{d} > 2410 \end{cases} \quad (3-12)$$

Onde:

- A_p é a área transversal do duto (m^2),
- α 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 em condições operacionais (N/m^2)
- L o comprimento do duto desde a estação de fornecimento do gás até o ponto onde o vazamento ocorre (m) e
- d o diâmetro do gasoduto (m).

3.1.7.2 Estimação da função consequência Ambiental

Considerando a extensão de área de vegetação queimada (p_a) uma variável aleatória contínua, e função da variável aleatória t_Q , tem-se como função consequência a distribuição de probabilidade, com θ_{jk} corresponde ao cenário acidental e a_i a seção em análise, a função consequência ambiental é dada por(3-13) e p_a definida como (3-14).

$$f(p_a | \theta_{jk}, a_i) = -\frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i}} \left[\frac{\left(1 - \frac{p_a}{S_{a_i}}\right)^{\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \cdot I_{\theta_{jk}}}}{p_a - S_{a_i}} \right] \quad (3-13)$$

$$p_a = S_{a_i} \cdot \left[1 - \exp\left(-\lambda_{\theta_{jk}} \cdot I_{\theta_{jk}} \cdot t_Q\right) \right] \quad (3-14)$$

Onde :

- S_{a_i} é área de vegetação presente na zona de perigo associado ao trecho (m^2);
- $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$ é uma constante associada ao cenário e ao trecho (m^2/J);
- $I_{\theta_{jk}}$ é o fluxo de radiação de calor associado a um cenário acidental ($J/m^2.s$);
- t_Q é o tempo até que as chamas decorrentes da ignição do gás e da queima de material combustível sejam apagadas (s);

- g_{θ_{jk}, a_i} corresponde ao inverso do tempo médio para o apagamento das chamadas ($1/t_Q$).

Neste modelo, o tempo de interrupção automática t_i do fluxo de gás pela válvula a montante é considerado como aproximadamente 10 segundos. O tempo t_Q até que as chamadas das queimadas sejam apagadas é uma variável aleatória, cuja distribuição de probabilidade terá parâmetros que serão em função do cenário e seção analisados. Essa variável segue distribuição de probabilidade exponencial, cuja função densidade de probabilidade é apresentada na equação (3-15).

$$f(t_Q) = g_{\theta_{jk}, a_i} e^{-g_{\theta_{jk}, a_i} \cdot t_Q} \quad (3-15)$$

3.1.7.3 Estimação da função consequência Financeira

A consequência financeira é dada pela equação (3-16), na qual P_f (3-17) é igual ao somatório das perdas referentes ao faturamento cessante $F(t_Q)$ (3-18), danos decorrentes do ressarcimento da interrupção de produção dos clientes empresariais $W(t_Q)$ (3-19), e as perdas financeiras por danos a propriedades, multas e indenização por danos físicos $M(t_Q)$ (3-20).

$$f(p_f | \theta_{jk}, a_i) = \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\xi_i} \exp\left(-g_{\theta_{jk}, a_i} \cdot \frac{P_f - \varphi_i}{\xi_i}\right) \quad (3-16)$$

$$P_f = F(t_Q) + W(t_Q) + M(t_Q) \quad (3-17)$$

$$F(t_Q) = v \cdot R \cdot t_i + v \cdot L_{a_i} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + v \cdot Q \cdot z_i \cdot t_Q \quad (3-18)$$

$$W(t_Q) = w_{a_i} \cdot (1 + z_i) \cdot t_Q \quad (3-19)$$

$$M(t_Q) = \beta \cdot I_{\theta_{jk}} \cdot A_{a_i} \cdot t_Q \quad (3-20)$$

onde:

$$\xi_i = w_{a_i} \cdot (1 + z_i) + v \cdot Q \cdot z_i + \beta \cdot I_{\theta_{jk}} \cdot A_{a_i} \quad (3-21)$$

$$\varphi_i = v \cdot L_{a_i} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z_i + v \cdot R \cdot t_i \quad (3-22)$$

Onde:

- v é um valor médio de venda do gás por m^3 (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 do trecho em estudo (m);
- d é o diâmetro do trecho 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);
- $z_{i\theta_{jk,a_i}}$ é a constante de proporcionalidade que associa t_R e t_Q , anteriormente mencionado.
- β é uma constante de proporcionalidade correspondente a uma constante decorrente de danos às propriedades, multas e indenizações por danos físicos, devido à energia liberada pelo cenário acidental (R\$/J);
- $I_{\theta_{jk}}$ é o fluxo de radiação de calor associado a um cenário acidental ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$);
- A_{a_i} é a área da zona de perigo relacionado ao trecho a_i (m^2).

3.1.8 Estimação dos riscos $r(a_i)$ e Ordenação das seções

A estimação dos riscos associados a uma seção do gasoduto é dado a partir da soma das perdas associadas a cada cenário e seção, nas três dimensões, multiplicada pelas probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e adicionada à probabilidade associada a um cenário θ_N de normalidade (3-23).

$$\left\{ \pi_i(\theta_{jk}) \cdot \sum_j \sum_k \left\{ - \left[\begin{array}{l} + \int_h f(h|\theta_{jk,a_i}) k_h u(h) dh \\ + \int_a f(a|\theta_{jk,a_i}) k_a u(a) da \\ + \int_f f(f|\theta_{jk,a_i}) k_f u(f) dh \end{array} \right] \right\} + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \right\} \quad (3-23)$$

A perda associada a um cenário de normalidade θ_N , nas três dimensões de consequências, é nula, ou seja, igual a -1.

Os riscos associados a uma seção analisada, nas três dimensões, humanas, ambiental e financeira são mostradas em nas Equações (3-24), (3-25) e (3-26) respectivamente. Para a

dimensão humana, o somatório das perdas inicia em um $n_{a_i} = 0$, correspondendo a ausência de pessoas feridas até o maior número de pessoas feridas na seção analisada. Os limites da integral da dimensão ambiental corresponde a ausência de área de vegetação afetada até a área total atingida da seção. Os limites da integral para a dimensão financeira variam de 0 a ∞ , onde t_Q é a variável de integração (utilizado em cada parcela do somatório de P_f).

$$r_h(a_i) = \sum_j \sum_k \left\{ - \sum_{p_h=0}^{n_{a_i}} \left[\binom{n_{a_i}}{p_h} \cdot \delta^{p_h} \cdot (1 - \delta)^{n_{a_i}-p_h} \cdot u(p_h) \right] \cdot \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \quad (3-24)$$

$$r_a(a_i) = \sum_j \sum_k \left\{ - \left[\int_0^{S_i} \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\lambda_{\theta_{jk}, a_i}} \left[\frac{\left(1 - \frac{p_a}{S_{a_i}}\right)^{\lambda_{\theta_{jk}, a_i} \cdot \theta_{jk}}}{p_a - S_{a_i}} \right] \cdot u(p_a) dp_a \right] \cdot \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \quad (3-25)$$

$$r_f(a_i) = \sum_j \sum_k \left\{ - \left[\int_0^{\infty} \frac{g_{\theta_{jk}, a_i}}{\xi_i} \exp\left(-g_{\theta_{jk}} \cdot \frac{p_f - \varphi_i}{\xi_i}\right) \cdot u(p_f) dp_f \right] \cdot \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \quad (3-26)$$

Uma vez calculado o risco total, as seções são hierarquizadas em priorização do risco, para as quais são avaliadas a razão das diferenças, em uma escala intervalar. Logo, é possível mostrar ao decisor quanto se ganha ao passar de uma alternativa (seção) para outra, ou seja, quanto uma seção incrementa ao risco com relação à outra.

3.1.9 Descrição da análise de robustez

A análise de sensibilidade é realizada mediante Simulação Monte Carlo, para a qual são avaliadas, mediante aplicação do teste estatístico a variação das seções conforme priorização de risco. Para diferentes níveis de significância, alterações do ranking das seções são obtidas, além do Intervalo de variação de saída dos parâmetros. A seguir são apresentadas as principais características consideradas para avaliação da robustez para o modelo de Brito & Almeida (2009).

3.1.9.1 Números aleatórios gerados a partir de distribuições teóricas de probabilidade

Segundo L'Ecuyer (2001), o propósito dos números aleatórios é produzir uma sequência de números que se assemelham a números que foram gerados aleatoriamente a partir de uma distribuição específica de probabilidade.

Freitas Filho (2008) ressalta que, por serem gerados artificialmente, os valores aleatórios obtidos são números pseudo-aleatórios, significando que a sequência de números produzidos por um algoritmo é reproduzível e, portanto, não aleatória no sentido estrito do termo. Porém, estatisticamente falando, a comparação entre um conjunto de valores gerados em um computador com outro, verdadeiramente aleatório, gerado, por exemplo, pela natureza, não apresenta diferenças.

Os números pseudo-aleatórios, (muitas vezes chamados de números aleatórios), são ingredientes fundamentais para experimentos estatísticos, simulação de sistemas estocásticos, análise numérica com métodos de Monte Carlo, algoritmos probabilísticos, jogos de computador, criptografia, e máquinas de jogos de azar, etc. (L'ECUYER, 2001).

Matematicamente, um GNA pode ser definido como uma estrutura $(S; \mu; f; U; g)$, onde S é um conjunto finito de estados, μ é uma distribuição de probabilidade em S usada para selecionar o estado inicial (semente) $s_0 \in S$, o mapeamento $f: S \rightarrow S$ é uma função de transição, U é um conjunto finito de símbolos de saída e $g: S \rightarrow U$ é uma função de saída.

O gerador opera da seguinte maneira: inicia-se do estado inicial s_0 (semente) e faz-se $u_0 = g(s_0)$. Procede-se então de acordo com a recorrência $s_n = f(s_{n-1})$, para $n \geq 1$. A saída no passo n é $u_n = g(s_n) \in U$. Assume-se que existam procedimentos eficientes para calcular f e g e para gerar a semente s_0 de acordo com μ . As variáveis u_n são os números aleatórios (ou observações) produzidos pelo gerador. Espera-se que as observações u_1, u_2, \dots, u_n comportem-se como variáveis aleatórias uniformemente distribuídas sobre o conjunto U . O conjunto U é frequentemente um conjunto de inteiros da forma $\{0, 1, \dots, m-1\}$ ou um conjunto finito de valores entre 0 e 1 para aproximar a distribuição $U[0; 1]$ (L'ECUYER, 1994).

Os tipos de geradores de números aleatórios mais comumente utilizados são (JAIN, 1991):

- Geradores Congruentes Lineares,
- Geradores de Atraso de *Fibonacci*,
- Geradores de Registradores de Deslocamento, e
- Geradores Híbridos.

A partir da geração dos números aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1, como foi apresentado, é possível utilizar-se das transformações citadas para obter variáveis definidas por distribuições teóricas de probabilidade.

Para o caso estudado neste trabalho, dentre as diversas distribuições teóricas contínuas possíveis de serem artificialmente geradas, serão apresentadas dois procedimentos: a distribuição uniforme e a distribuição triangular. A escolha destas distribuições se baseia no fato em que não se pode afirmar com certeza quais distribuições os parâmetros analisados no problema possam assumir.

Os métodos de geração de Números Aleatórios apresentados a seguir são baseados em Thomopoulos (2013).

3.1.9.1.1 Uniforme Contínua

Uma variável x é definida como uniforme contínua com parâmetros (a,b) quando x é igualmente preferível para qualquer lugar entre a e b . A função densidade de x é conforme Equação (3-27):

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} \text{ para } a \leq x \leq b \quad (3-27)$$

A distribuição cumulativa da função é dada pela Equação (3-28) e o valor esperado e a variância de x é dada pelas Equações (3-29) e (3-30) respectivamente.

$$F(x) = \frac{(x-a)}{(b-a)} \text{ para } a \leq x \leq b \quad (3-28)$$

$$E(x) = \frac{(b+a)}{2} \quad (3-29)$$

$$V(x) = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (3-30)$$

Utilizando a transformação inversa em (3-28), a fórmula para geração de NA uniformemente distribuído é tal que:

$$X = a + u(b-a) \quad (3-31)$$

Os parâmetros necessários para a obtenção de uma variável com distribuição uniforme são apenas os valores extremos do Intervalo $[a, b]$.

Sendo assim, para gerar uma variável aleatória a partir da distribuição uniforme contínua, a seguinte rotina é executada:

- a) Gerar um NA uniformemente distribuído $u \sim U(0,1)$;
- b) $x = a + u(b - a)$;
- c) Resultado = x.

3.1.9.1.2 Distribuição Triangular

Por vezes a distribuição triangular é usada em modelos de simulação quando a verdadeira distribuição de probabilidade não é conhecida. Para sua aplicação, o analista estima o valor mínimo, máximo e mais provável da variável. Estes valores são denotados como: a , b e $\sim x$, respectivamente. Os NA são chamados de x onde ($a \leq x \leq b$) e ($a \leq \sim x \leq b$).

Outra variável é agora introduzida e chamada de distribuição triangular padrão. A variável aleatória é x' e varia entre 0 e 1 no qual o valor mais provável (moda) é denominada \bar{x}' , então ($0 \leq x' \leq 1$) e ($0 \leq \bar{x}' \leq 1$). A notação para as duas variáveis, triangular x e triangular padrão x' , é como segue Equações (3-32) e (3-33):

$$x \sim T(a, b, \sim x) \quad (3-32)$$

$$x' \sim T(0, 1, \bar{x}') \quad (3-33)$$

A triangular padrão x' é relacionada com a triangular x como segue:

$$x' = \frac{(\bar{x} - a)}{(b - a)} \quad (3-34)$$

$$x' = \frac{(x - a)}{(b - a)} \quad (3-35)$$

e

$$\bar{x}' = \frac{\bar{x} - a}{b - a} \quad (3-36)$$

A função densidade de x' é dada por:

$$f(x') = \frac{2x}{\bar{x}'} (0 \leq x' \leq \bar{x}') \quad (3-37)$$

$$\frac{2(1-x')}{(1-\bar{x}')} (\bar{x}' < x' \leq 1) \quad (3-38)$$

A média e a variância da triangular padrão x' é mostrada:

$$E(x') = \frac{\bar{x}' + 1}{3} \quad (3-39)$$

$$V(x') = \frac{1 + \bar{x}'^2 - \bar{x}'}{18} \quad (3-40)$$

O valor esperado e a variância da triangular x é relacionada da mesma forma a partir de x' , como segue:

$$E(x) = a + E(x')[b - a] \quad (3-41)$$

$$V(x) = V(x')[b - a]^2 \quad (3-42)$$

Pelo método da transformação inversa facilmente se obtém a fórmula para gerar amostras com distribuição triangular. Sendo assim, a variável x é dada por:

$$x = a + x'(b - a) \quad (3-43)$$

Para gerar uma variável aleatória a partir da distribuição uniforme contínua, a seguinte rotina é executada:

- I. Gerar um NA uniformemente distribuído $u \sim U(0,1)$
- II. $x' = \sqrt{u \sim \bar{x}'}$ se $u \leq \bar{x}'$
 $1 - \sqrt{(1 - \bar{x}')(1 - u)}$ se $u > \bar{x}'$
- III. Resultado = $T(a, b, \bar{x})$

3.1.9.2 Coeficiente de correlação τ de Kendall

Os dados são dispostos em postos e relacionados os N indivíduos e em seguida os valores de Y são verificados se estão em ordem natural (crescente). Se estiverem, recebem o valor +1 e se não estiverem, recebem o valor -1 e em seguida são somados e chamados de “ S ”.

O valor do coeficiente de correlação de Kendall é calculado pela razão do total efetivo pelo total máximo possível⁴ dado pela Equação (3-44).

$$\tau = \frac{S}{\frac{1}{2}N(N-1)} \quad (3-44)$$

O grau de significância do teste é dado para:

Amostras pequenas ($N \leq 8$): utilizar a tabela de Probabilidades associadas a valores tão grandes quanto os valores observados de S no Coeficiente de Correlação de Kendall para testar os valores extremos de $p \leq \alpha$;

Amostras grandes ($N > 8$), utilizar a tabela da Normal onde o valor de z é dado pela Equação (3-45) e a hipótese nula será rejeitada quando $z \geq z_{crítico}$.

$$z = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}}} \quad (3-45)$$

3.1.9.3 Função Utilidade para três Atributos

Se as preferências das loterias X_1 , X_2 e X_3 dependem somente de suas distribuições de probabilidade marginais e não de sua probabilidade conjunta, então (KEENEY e RAIFFA, 1976) a utilidade é dada pela Equação (3-46):

$$U(x_1, x_2, x_3) = k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) + k_3 u_3(x_3) \quad (3-46)$$

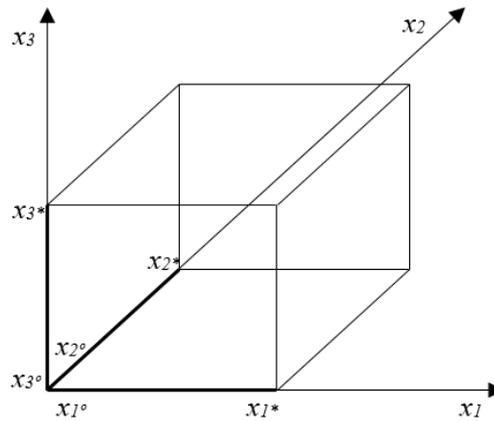
Este é o resultado para a função utilidade aditiva para três atributos. As funções utilidade u_1 , u_2 e u_3 são obtidos em uma escala de 0 a 1 e os K_i 's são as constantes de escala. A avaliação necessária para utilidade entre três atributos é mostrado na Figura 3.3.

⁴ Para o caso de correlação perfeita, o total máximo possível é dado pela combinação $C_{k,2}$.

A função utilidade $u(x_1, x_2, x_3)$ pode ser facilmente encontrada por meio de três funções utilidades condicionais e uma utilidade de uma consequência qualquer;

Quando temos três atributos mutuamente independentes, necessitamos apenas avaliar três funções utilidades condicional e a utilidade do ponto $u(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$.

Figura 3.3- Avaliação empírica necessária para especificar certa função utilidade de três atributos.



Fonte: Keeney & Raiffa (1976)

3.1.9.4 Estabelecimento das constantes de escala

O conjunto de equações para definir as constantes de escala (k_i 's) pode ser obtido a partir de considerações de certeza, considerações probabilísticas ou uma combinação dos dois. Por exemplo, se as consequências x e y são igualmente preferíveis para o decisor, então claramente $u(x) = u(y)$. Uma vez que as utilidades de u_i 's tenham sido estabelecidas, $u_i(x_i)$ e $u_i(y_i)$ são apenas números (KEENEY e RAIFFA, 1976).

Ainda baseado nestes autores, para o caso n atributos, quando u_i e u são obtidos em uma escala de 0 a 1, temos:

$$u(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 1 \quad u(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = 0 \tag{3-47}$$

$$u(x_i^*) = 1, u(x_i^0) = 0, \text{ para todo } X_i \tag{3-48}$$

Então

$$u(x_i^*, x_i^0) = k_i, i = 1, \dots, n \tag{3-49}$$

Por causa da dificuldade de resolver n equações (não necessariamente lineares), por o conjunto de k_i 's são geralmente requeridos um conjunto de equações que são simples de avaliar. Basicamente limita-se a duas questões:

I. Para qual probabilidade de p o decisor é indiferente a:

a) A loteria dado um p com chance x^* e $1-p$ com chance de x^o e

b) A consequência $(x_1^o, \dots, x_{i-1}^o, x_i^*, x_{i+1}^o, \dots, x_n^o)$.

Definido como p a resposta do decisor, então usando de (3-47) a utilidade esperada da loteria é p e a partir de (3-49), a utilidade da consequência é k_i . Equacionando as utilidades $k_i = p$. Pode-se claramente gerar os valores de cada k_i 's dessa maneira.

II. Selecione um nível de X_i e X_j tal que para todos os valores fixos dos demais atributos, você é indiferente a:

a) A consequência obtendo x_i' e x_j^o juntos

e

b) A consequência obtendo x_j' e x_i^o juntos

Usando (3-47) e (3-48), as utilidades destas duas consequências indiferentes podem ser equacionadas:

$$k_i u_i(x_i') = k_j u_j(x_j') \quad (3-50)$$

Uma grande falha da utilização da Questão I e II é que deve ser realizada para valores extremos de x^o e x^* , implicando em dificuldade de estabelecimento para o decisor estabelecer. Outra dificuldade é que a Questão I é o efeito resultante da variação de todos os n atributos simultaneamente.

É então utilizado na prática, o estabelecimento dos k_i 's poderão ser ordenados utilizando a Questão I para avaliar o maior k_i , e finalmente usar a Questão tipo II para avaliar a magnitude dos k_i 's relativo ao maior k_i . Uma vez que os k_i 's estejam na forma aditiva, deve-se somá-los de maneira que seja igual a 1.

3.2 Descrição do SAD

O Sistema de Apoio a Decisão Apresentado tem por objetivos principais dispor ferramenta computacional para auxiliar na tomada de decisão na análise de risco em Gasodutos de gás Natural, com base no modelo proposto por Brito & Almeida (2009) e, executar Análise de Sensibilidade do modelo.

Para este contexto, o SAD caracteriza-se como um modelo representativo, conforme classificação apresentada em Almeida et al (2002) pois apresenta a análise de risco para as

Seções estabelecidas no problema de decisão frente aos cenários de ocorrência, para as quais são estimadas distribuições de probabilidade de seus eventos e, por fim, sugerir ao decisor a priorização das seções (Alternativas) com base no risco calculado.

Seu desenvolvimento foi realizado em Ambiente Delphi 2007, utilizando a linguagem de Programação Object Pascal. A aplicação é voltada para ambiente Windows, com inserção de dados a partir de planilha Excel e utiliza o Sistema de gerenciamento de banco de dados da Microsoft, Access, como base de dados (BD).

O software permite que usuários sejam capazes de criar/modificar/fechar um novo projeto (Novo BD). A modificação dos parâmetros que compõe o problema e as características associadas aos mesmos é permitida apenas a partir da importação de planilha eletrônica.

Ao longo das rotinas executadas no sistema, são apresentados diálogos para orientar a execução dos passos ou ainda ao fazer uma operação 'ilegal' ou quando o usuário está prestes a realizar uma operação que pode ser "perigosa". Como exemplos, pode-se citar a inserção de dados fora dos padrões para a primeira situação e para a segunda, o alerta para alteração do banco de dados ou a escolha de uma opção que reinicie o procedimento ou parte dele.

O usuário do sistema deve ter conhecimento prévio sobre os fatores que influenciam no sistema, visto que são necessários a entrada de diversos parâmetros que servirão como base para a tomada de decisão. É necessário também ter conhecimento do significado do teste de hipóteses para analisar de maneira satisfatória os níveis de significância do teste e suas implicações.

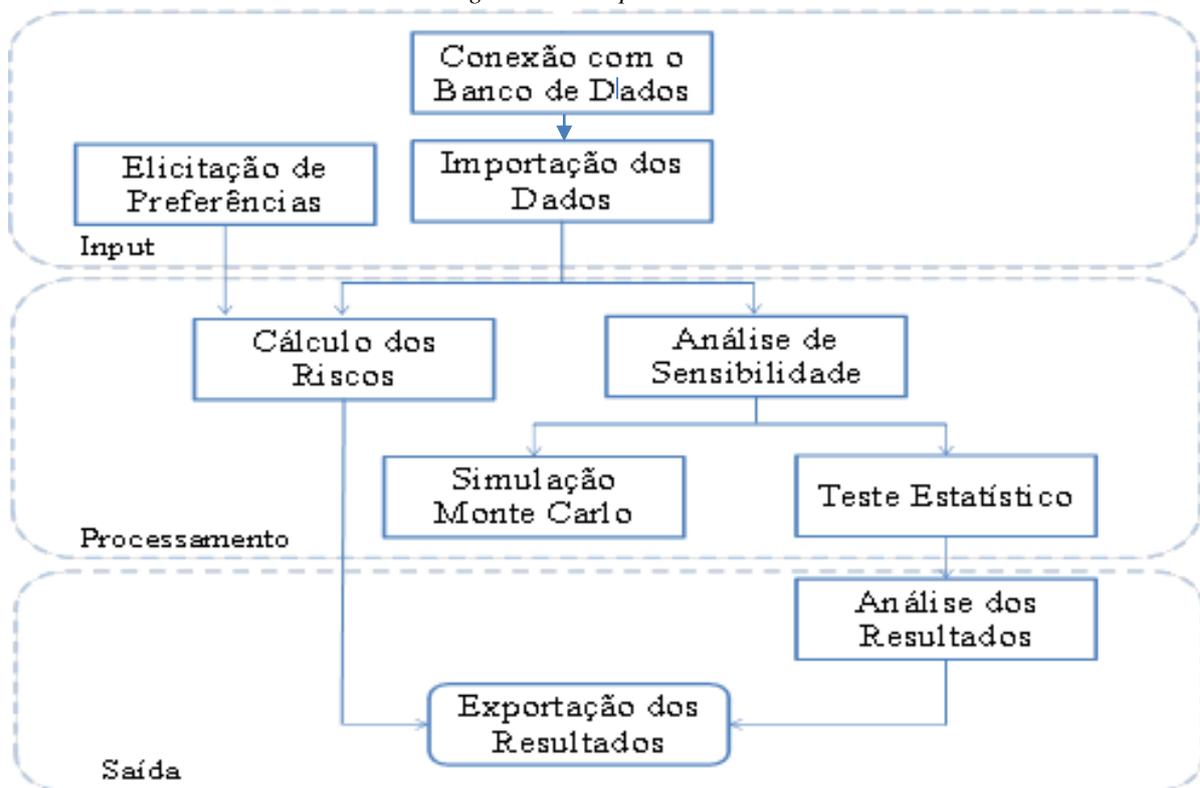
A base de modelos tem fundamentos teóricos e práticos construídos a partir das discussões e literaturas apresentadas no Capítulo 2 e Seção 3.1 desta Dissertação. Através desta ferramenta de apoio a decisão, é possível:

- a) Calcular o risco associado às seções do gasoduto;
- b) Propor ao decisor as seções em prioridade de risco;
- c) Possibilitar Análise de Sensibilidade para os parâmetros do modelo, sendo possível variar todos eles, ou um conjunto destes segundo distribuições de probabilidade Uniforme e Triangular;
- d) Simular casos a partir da Simulação Monte Carlo para um número de replicações que sejam viáveis para a validação do modelo;
- e) Fazer verificação da correlação dos rankings obtidos em cada replicação através do coeficiente de correlação τ de Kendall com base em diferentes valores de α para rejeição do teste de hipóteses;

- o Determinar o coeficiente para N replicações e para cada replicação separadamente;
- f) Verificar a variação dos parâmetros que levaram a mudança de posição do ranking e com isso, a correlação com o ranking original;
- g) Possibilitar a visualização gráfica das variações bem como a exportação para posterior uso e análise;

A Figura 3.4 mostra as etapas do Modelo proposto. Para maiores detalhes sobre as rotinas disponíveis do SAD, consultar o ANEXO 2.

Figura 3.4 - Etapas do Modelo



3.2.1 Input

As entradas do modelo são definidas por parâmetros relacionados ao modelo de Análise de Risco proposto por Brito & Almeida (2009). Estes parâmetros compreendem duas categorias: parâmetros relacionados ao gás e parâmetros relacionados a estrutura de preferências.

Os parâmetros referentes ao gás se subdividem em:

- a) Parâmetros que variam por seção, ou seja, são inerentes ao gasoduto, independente do modo de falha que ocorra:
- L_i : extensão do gasoduto (m)
 - d : diâmetro da seção do gasoduto (m);
 - Q : vazão regular do gás (m^3/s);
 - v : valor de venda do gás ($\$/m^3/s$);
 - w_{a_i} : estimativa da multa do contrato ($\$/s$);
 - P_0 : valor da pressão constante (kgf/cm^3);
 - L_0 : extensão do gasoduto até o estado de compressão (m);
 - Veg: quantidade de vegetação na zona de perigo crítica (%)
 - β : constante de proporcionalidade ($\$/J$);
 - n_{a_i} : número máximo de pessoas feridas;
 - α_{a_i} : probabilidade de ter ao menos uma pessoa afetada pela radiação térmica;
 - P_w : pressão de vapor de água saturada (N/m^2);
 - RH : umidade relativa (%).
- b) Parâmetros que variam por Seção e Cenário, apresentam diferentes valores de acordo com o cenário de ocorrência.
- ω : fator que mostra quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade ser uma queimadura de 1° ou ° grau;
 - $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$: constante relacionada ao cenário e seção (m^2/J);
 - g_{θ_{jk},a_i} : inverso do tempo médio do apagamento das chamas (1/s);
 - R : taxa de liberação do gás a partir do furo ou ruptura (m^3/s).
 - a_i : proporção do tamanho do furo (adimensional) obtido pela razão efetiva do furo pela área transversal do duto;
 - $Z_{i\theta_{jk},a_i}$;
 - θ_{jk,a_i} : probabilidade de ocorrência do cenário acidental.

Os parâmetros relacionados a estrutura de preferências são mostrados a seguir:

- a) Preferência entre as dimensões (ex: H>F>A)
- b) Constantes de escala para as três dimensões
- c) Equivalente Certo

- d) Parâmetros a , b e c relacionados as distribuições de probabilidade que definem a utilidade da dimensão.

3.2.1.1 Importação dos dados

Os dados de entrada do software são importados através de planilha eletrônica Excel e cada aba é importada para uma tabela no Banco de Dados. São feitas checagens de preenchimento, e validação de importação (para o caso das constantes de escala que devem somar 1) pois as planilhas de 1 a 5 devem estar previamente preenchidas. A Tabela 3.1 apresenta as planilhas a serem preenchidas e importadas para o modelo.

Tabela 3.1 - Parâmetros de Importação do SAD

ID	Planilha	Importação
1	Cenários	Preencher apenas com os cenários que serão utilizados
2	Seções	Seções/Trechos dos gasodutos
3	Parametro_Secao	$L_i, d, Q, v, w_{a_i}, P_0, L_0, Veg, \beta, n_{a_i}, \alpha_{a_i}, P_w, RH$
4	Parametro_Secao xCenario	$\omega, \lambda_{\theta_{jk,a_i}}, g_{\theta_{jk,a_i}}, R, a_i, z_{i\theta_{jk,a_i}}$
5	θ_{jk,a_i}	Valores de θ_{jk,a_i}
6	ParametroxDimens ao	Estrutura de preferências do decisor: Comportamento quanto ao risco, Constantes de escala, parâmetros das funções utilidade

Uma vez importados os parâmetros do modelo, é possível calcular os riscos para cada seção. No entanto, se ainda não foi avaliada a estrutura de preferências do decisor, os parâmetros da planilha 6 estarão vazios, então faz-se necessária a Elicitação das preferências antes de prosseguir com o cálculo dos riscos.

3.2.1.2 Elicitação das Funções Utilidade

A elicitação pode ser modificada a qualquer momento para avaliar mudanças, para checagem das preferências do decisor ou para avaliar as saídas conforme diferentes parâmetros de entrada.

Na etapa de Elicitação, são seguidas as etapas de Estabelecimento da função Utilidade como mostrado na Seção 3.1.6, como proposto por Keeney e Rayffa (1976) .

Nesta etapa são introduzidas a terminologia de ideias e a apresentação do espaço de consequências, cuja definição de seus limites é explicada abaixo.

Em seguida verificam-se as utilidades unidimensionais para as dimensões humana, ambiental e financeira. Para isto são utilizadas curvas de preferência que podem assumir

distribuições teóricas de probabilidade exponencial ou logística (equações) ou ainda representar a utilidade a partir de uma função linear. As distribuições exponencial e logística são compostas por 3 parâmetros a , b e c , cujos valores de ' a ' são estabelecidos pelo decisor, de acordo com sua preferência de variação do gráfico e os demais parâmetros ' b ' e ' c ' são ajustados a medida que ' a ' é variado, conforme descrito em 3.1.6.

Para todas as dimensões deseja-se mitigar o risco e, portanto, a melhor consequência esperada é aquela em que não há perdas, ou seja, é igual a zero. Na seção 3.1.6 estabeleceu-se os limites que cada função pode assumir.

A máxima perda Humana corresponde ao valor máximo inserido do parâmetro independentemente da seção em que ocorra.

A máxima perda financeira é calculada conforme seção da consequência, e o valor máximo também é obtido comparando todas as seções, não importando em qual ela se encontre. Apesar de calculada, o decisor pode inserir no problema um valor maior de perda financeira, sendo esta o novo valor máximo assumido. Em contrapartida, não é possível inserir um valor menor do que o máximo calculado para a consequência, pois implicaria em uma utilidade inferior a zero, o que não é possível.

A máxima perda Ambiental é calculada pela área máxima de vegetação afetada, não importando a seção de ocorrência.

Definidos os valores mínimos (nulos para todas as dimensões) e máximos, os valores de utilidade são normalizados de 0 a 1, para os quais, a pior consequência é aquela em que há perda máxima na dimensão e a melhor quando não há perdas.

A forma obtida pelos gráficos de utilidade é definida pelo comportamento do decisor, que pode ser propenso, avesso ou neutro ao risco. A parametrização realizada para geração dos gráficos de utilidade foi feita de maneira a possibilitar a mudança de comportamento da curva e, por conseguinte, a mudança do comportamento do decisor, melhor se adequando às suas preferências.

Para o caso exponencial, a curva parte de valores de ' a ' próximos a zero, significando que a preferência parte de um pressuposto de neutralidade. Com valores de ' a ' inferiores a zero, a curva tende a assumir o comportamento propenso e, quando ' a ' assume valores positivos, o comportamento averso ao risco é obtido.

Para o caso logístico, a parametrização foi realizada de maneira que o decisor possa inicialmente verificar a propensão ao risco, transitar entre os comportamentos averso e propenso a partir do ponto de inflexão característico da simóide desta distribuição, até verificar

a aversão ao risco. Esta curva é muito útil para que o decisor verifique em qual ponto da loteria ele deixa de ser propenso e passa a ser averso ao risco.

Outra possibilidade é optar pela função linear, na qual é identificada a neutralidade do decisor mediante análise das perdas associadas a determinada dimensão.

3.2.1.3 Elicitação das constantes de Escala

A próxima etapa corresponde a avaliação das constantes de escala, seguindo os procedimentos da seção 3.1.9.4.

Primeiro verifica-se a ordem de preferência das constantes de escala, através da escolha das loterias apresentadas na tela. Em seguida, é requerido a responder qual valor de S , para todos os valores fixos dos demais atributos ele é indiferente e a primeira relação é estabelecida como mostrado na Equação (3-50).

A partir do nível de S , verifica-se a utilidade com base na equação da utilidade unidimensional e obtém-se a primeira relação. Repete-se o procedimento para obtenção da segunda relação:

De maneira genérica, tem-se que K_1 corresponde a constante de escala da dimensão mais preferível, K_2 a constante de escala do critério de segunda maior importância e consequentemente K_3 a constante da dimensão que representa a terceira em ordem de preferência (3-51). Uma vez que os k_i 's estejam na forma aditiva, deve-se somá-los de maneira que seja igual a 1(3-52). as relações entre as constantes são obtidas em (3-53) e (3-54).

$$k_1 > k_2 > k_3 \quad (3-51)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1 \quad (3-52)$$

$$k_2 = k_1 u(S_1) \quad (3-53)$$

$$k_3 = k_1 u(S_2) \quad (3-54)$$

Substituindo (3-53) e (3-54) em (3-52), temos

$$k_1 = \frac{1}{(1 + u(S_1) + u(S_2))} \quad (3-55)$$

Com estas relações estabelecidas, é possível obter os valores das constantes de escala e todos os parâmetros de entrada do modelo necessários para o cálculo do risco foram estabelecidos.

3.2.2 Processamento

Esta etapa é dividida em duas outras: o cálculo do risco total e priorização das seções segundo o risco e análise de sensibilidade.

3.2.2.1 Cálculo dos Riscos

A primeira etapa do processamento faz uso dos dados importados para o banco de dados para o cálculo do risco Total para cada seção, em seguida, verifica-se a ordenação das seções de maior risco e, por fim, o cálculo da razão das diferenças. O ranking obtido nesta etapa é chamado de Ranking Original.

Segundo o modelo proposto, somam-se as perdas associadas a cada cenário e trechos, nas três dimensões abordadas, multiplicada pelas probabilidades dos cenários acidentais e adicionado a perda associada a um cenário θ_N de normalidade, conforme equação (3-23).

3.2.2.2 Análise de Sensibilidade

A Segunda etapa de processamento é a Análise de Sensibilidade Global, na qual são realizadas simulações dos parâmetros de entrada e verificada a variação do resultado final.

São Realizadas Simulações Monte Carlo a partir da escolha dos parâmetros que se deseja avaliar. Para estes parâmetros são gerados Números aleatórios conforme distribuição de probabilidade uniforme ou triangular. O valor original do parâmetro é variado em um intervalo obtendo-se os valores máximo e mínimo do parâmetro, respectivamente. Para a distribuição triangular, o Valor mais provável do parâmetro corresponde ao valor original dele. O número de Simulações (N) a serem avaliadas deve ser maior do que 1 e deve ser tão grande quanto necessário para atingir os percentuais de variação estabelecidos .

No teste estatístico são avaliadas as mudanças dos rankings obtidos das seções dos gasodutos, identificando se houve correlação através do coeficiente de correlação τ de Kendall que avalia se há correlação entre duas amostras independentes. Cada replicação é comparada com o ranking original e obtido o valor de τ .

Pode-se considerar τ como função do número mínimo de inversões ou permutas entre elementos vizinhos, necessário para transformar um posto em outro. Seus valores podem variar entre -1 e 1, sendo respectivamente correlação perfeita negativa e positiva. Para o caso

estudado, correlações negativas não são favoráveis visto que indica uma inversão de ordem, na qual as seções de maior risco (prioritárias) passariam a ocupar as últimas posições.

Após calculado o coeficiente de correlação para N replicações, são obtidos o valor médio, a mediana, moda, os valores mínimo e máximo e o desvio padrão de τ . Para os casos em que não há moda, é apresentada a nomenclatura N/A (valor não está disponível seguindo padrão EXCEL).

O τ tem distribuição amostral que praticamente se confunde com a distribuição normal, mesmo em amostras tão pequenas quanto 8 e tem poder eficiência equivalente ao do Coeficiente de Spearman (91%) e sua mensuração deve ser no mínimo ao nível ordinal (SIEGEL, 1977). Isto significa que os coeficientes de correlação τ de Kendall e de Spearman rejeitam a hipótese nula ao mesmo grau de Significância quando comparados entre si e quando comparado com o teste paramétrico, Pearson, a hipótese nula é rejeitada em 91% dos casos.

É possível avaliar no software, com base no valor médio de τ para N replicações, se a hipótese nula (não há correlação) é rejeitada para valores de α entre 0,01 e 0,7.

3.2.3 Output

Na Análise dos Resultados é possível verificar o percentual de vezes que determinada seção permaneceu no ranking original e também o percentual em que variou de ranking a partir da tabela.

Para cada seção são gerados gráficos de barras indicando a posição original da seção e o percentual correspondente ao seu deslocamento ao longo do ranking. O objetivo desta visualização é identificar a variação do ranking para a seção, podendo o decisor analisar melhor as variações ocorridas com relação a priorização do risco.

Para cada replicação rejeitada no teste de hipóteses, são analisados os percentuais de variação dos parâmetros. Em seguida, são avaliadas as variações mínimas e máximas de cada parâmetro para o conjunto simulado. Devido a particularidades dos parâmetros, foi verificada a necessidade de separá-los em três grupos para melhor analisá-los: Os parâmetros que variam por seção (Tipo I), parâmetros que variam por Cenário (Tipo II) e parâmetros que variam por seção e cenário (Tipo III).

Para o Tipo I, os valores assumidos para cada seção dependem unicamente das características do trecho, ou seja, independem do cenário de ocorrência. Estes estão intimamente relacionados com as características físicas, tais como comprimento, diâmetro, etc. A análise destes é efetuada a partir da visualização gráfica das variações por seção. Ressalta-se

que são utilizados gráficos de pontos para representar os dados, pois há uma discretização das seções, ou seja, o percentual máximo obtido para uma seção não indica o limiar para a próxima. Para sintetizar as informações da variação dos parâmetros, os percentuais de variação para todos os parâmetros desta ‘categoria’ e o seu Intervalo de rejeição são mostrados em uma tabela. Estes valores indicam quanto este parâmetro pode variar permanecendo prioritárias as seções de risco conforme o ranking original. Para diferentes valores de α , são apresentados diferentes percentuais de variação dos parâmetros.

Para o Tipo II, os valores dos parâmetros dependem apenas do cenário de ocorrência, independente da seção analisada. Logo, não são apresentadas suas variações gráficas por seção como descrito no Tipo I. São apresentadas, no entanto, a sintetização das variações ocorridas para os cenários.

Por fim, no Tipo III, estes parâmetros podem assumir diferentes valores para as combinações de cenários e seções possíveis e sua análise segue a mesma ideia de mostrar os limites mínimos e máximos para as seções como no Tipo I, agregando também a noção de variação por cenário como no Tipo II.

O único cenário que não está incluso nesta análise de variação é o cenário de Normalidade, pois como discutido na seção 0, este corresponde ao fluxo normal de gás no gasoduto. Sua variação é única por seção e sua probabilidade de ocorrência é obtida pelo parâmetro θ_{jk,a_i} .

3.3 Aplicação do Modelo

A aplicação preferencialmente será hipotética, baseada em dados simulados. Podem ser feitas duas aplicações: uma real e outra hipotética. A vantagem da aplicação com dados simulados é que pode testar o modelo em situações mais amplas e testar os limites do modelo. O caso real, se limita às coincidências do que for encontrado e pode ser muito limitado. No entanto, modelos que envolvam forte participação de agentes da organização (decisores ou especialistas), como por exemplo, em estruturação de problemas (VFT, p. e) requerem prioritariamente a aplicação real, pelo menos na parte de elicitação e estruturação do problema.

De acordo com Fishman (1999), cada *trial* (também chamado neste trabalho como replicação, caso ou interação) da Simulação Monte Carlo gera um vetor de amostra e se os elementos deste vetor são independentes, a geração de Números Aleatórios a partir de distribuições teóricas de probabilidade (discretas ou contínuas) produzem amostras eficientemente.

Como descrito na Seção 0 desta dissertação, os trechos obtidos definem um conjunto discreto de alternativas $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ e independentes uma das outras. Logo, para cada parâmetro avaliado em cada *Pattern* (casos avaliados), são gerados números aleatórios conforme distribuição de probabilidade pré-estabelecida (Uniforme ou triangular). Para cada *Pattern*, um total de 100.000 Simulações são analisadas a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados.

A definição e justificativa de cada *Pattern* é apresentada nas subseções a seguir, cuja elaboração destes foi realizada de maneira a identificar a robustez e a influência dos parâmetros para as saídas do problema.

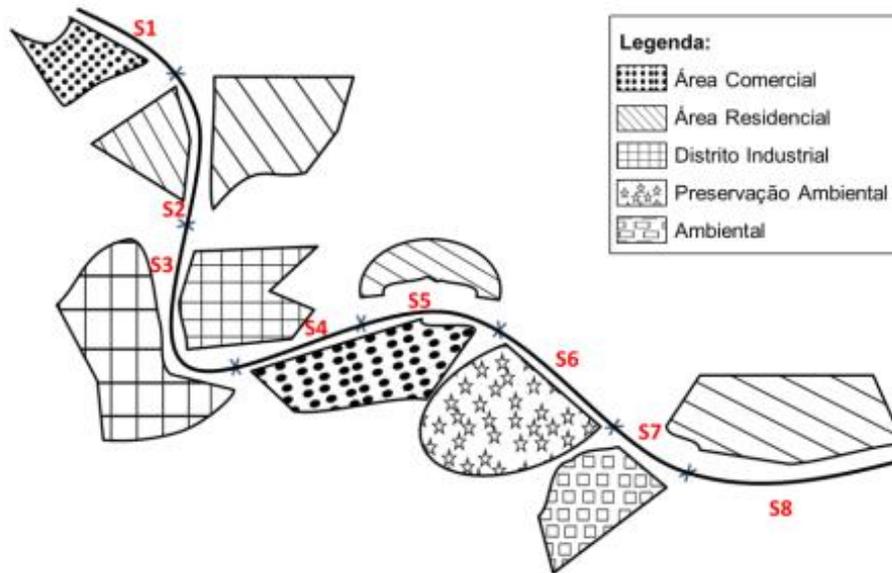
Ao final de cada simulação são calculados os valores de correlação τ de Kendall e ao final seu valor médio é avaliado. É importante salientar que o valor médio de τ foi considerado rejeitado para o maior grau de confiança possível, dentre os disponíveis para análise: 99,9%, 95%, 90%, 85%, 80%, 75% e 70% correspondendo respectivamente aos valores de α iguais a 0,01, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25 e 0,30. Isso significa que, se o valor de τ médio obtido é rejeitado para um valor de α de 0,10 e 0,05, é considerado o valor de 0,05, ou seja, há uma probabilidade de 95% dos casos simulados corresponderem a aqueles valores de τ (que representa a correlação da ordenação).

As simulações são baseadas nos dados de Krym et al (2012) que analisam os riscos associados as dimensões humana, ambiental e financeira para um gasoduto de transporte de gás natural com extensão de 26.800 m, que está dividido em 8 seções conforme visto na Figura 3.5.

Os parâmetros de entrada correspondentes a este modelo são apresentados no ANEXO 1. Cada uma das 8 seções possui características distintas, no entanto uniformes ao longo da seção. Foi considerado um gasoduto de diâmetro (d) igual em toda sua extensão, com valor de 0,2031 m. Valores iguais também foram considerados para a pressão de operação ($P_0 = 35 \text{ Kgf/cm}^2$), pressão de vapor de água saturada ($P_w = 3086 \text{ N/m}^2$), e umidade relativa ($RH = 65\%$). Os demais parâmetros que variam por seção (L_i , Q , v , w_{a_i} , L_0 , V_{eg} , β , n_{a_i} , α_{a_i}) apresentam valores particulares ao longo dos 8 trechos.

Para os parâmetros que variam por seção e cenário, tem-se que a proporção do tamanho do furo (a_i) assume valores iguais a 0,0181453 para ocorrência de ruptura no gasoduto e 0,00363 para ocorrência de furos.

Figura 3.5 - Gasoduto analisado contendo 8 seções



Fonte: Krym et al (2012)

A taxa de liberação do gás a partir do cenário de ocorrência atribuiu-se valores de 2,82 e 1,35 m³/s para ruptura e furo respectivamente.

Os valores do fator que mostra quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade seja uma queimadura de 1° ou ° grau (ω) foi obtido pelo valor padrão, considerando o valor máximo possível a ser assumido (para este contexto), respeitando a relação dada pela Equação (3-8), ou seja, o produto de ω e P_{fat} adicionada a Probabilidade da fatalidade deve ser menor ou igual a 1.

Os demais parâmetros $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$, g_{θ_{jk},a_i} e $Z_{i\theta_{jk},a_i}$; apresentam valores distintos para cada combinação de trecho e cenário acidental.

As probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e o cenário de Normalidade são apresentados no ANEXO 1.

Como dito na seção 3.1.5, o estabelecimento do conjunto de payoffs pode ser definido em um conjunto fechado. Para a dimensão Ambiental, este conjunto é delimitado pela (maior) área de vegetação atingida dentre os cenários analisados, sendo para este contexto o valor aproximado de 413 m². Para a dimensão Humana, o maior número de pessoas feridas atingidas pela radiação é igual a 25 e, para a dimensão Financeira, o valor máximo assumido para o modelo é de R\$ 8.200.000, cujos valores superiores ao máximo a serem calculados assumem possuem utilidade igual a 0 (equivalente a perda máxima). Os valores mínimos de perda nas

três dimensões é igual a zero, ou seja, a obtenção da utilidade máxima (igual a 1) é alcançada quando não há perdas humana, ambiental ou financeira.

Para cada dimensão foram obtidas as utilidades unidimensionais, considerando comportamento averso para cada uma delas, distribuição exponencial para as Dimensões Humana e Ambiental e para a dimensão Financeira, utilidade segundo distribuição logística.

No modelo de Krym et al (2012) foi considerado que todas as utilidades seguem distribuição exponencial e comportamento averso ao risco para todas as dimensões. Nesta análise serão consideradas duas distribuições: exponencial e logística. As constantes de escala foram obtidas de maneira a reproduzir as preferências do decisor e ajustadas de maneira que $k_h > k_f > k_e$ cujos parâmetros são mostrados na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 são apresentados os resultados do risco calculado para as 8 seções analisadas multidimensionalmente.

Tabela 3.2 - Parâmetros que representam as preferências do decisor

Dimensão	Constante de escala	PDF	A	B	C	Máxima Perda
Humana	0,412293762	Exp	0,2	-6,78E-03	1,007E+00	25
Financeira	0,384260407	Log	1,03E+08	-3,52138247	1,000E+00	8200000
Ambiental	0,203445831	Exp	4,85E-03	-0,15651765	1,157E+00	413

Tabela 3.3 - Ordenação das seções em prioridade de risco

Seção	Descrição	Diferença Absoluta (E-05)	Razão
S1	Área Comercial	14,36638429	2211,30222
S4	Distrito Industrial/Comercial	0,006496798	0,0035049
S7	Área Residencial/Ambiental	1,853631852	1,60818875
S8	Área Residencial2	1,152620831	0,23940357
S6	Área de Preservação Ambiental	4,814551505	5,27976683
S2	Área Residencial1	0,911887145	0,13224517
S3	Distrito Industrial	6,895428683	
S5	Área Residencial/Comercial		

3.3.1 Pattern 1: variação igualitária para todos os parâmetros do gás

Na seção 3.2.1 foram detalhados os parâmetros que compõem o modelo de decisão e estes possuem características que variam por seção ou ainda podem variar por seção e cenário.

Para avaliar a robustez do modelo é necessário verificar o Intervalo de todos os parâmetros conjuntamente, mediante teste estatístico. Neste intuito, serão avaliadas variações em percentual de 5%, 10%, 15% e 20% para distribuição triangular e uniforme e 100.000 *trials*

para cada composição. São avaliados os parâmetros: $L_i, d, Q, v, w_{a_i}, P_0, L_0, Veg, \beta, n_{a_i}, \alpha_{a_i}, P_w, RH, \omega, \lambda_{\theta_{jk}, a_i}, g_{\theta_{jk}, a_i}, R, a_i, z_{i\theta_{jk}, a_i}$.

Também são avaliadas variações nas probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais e variação das probabilidades de não ocorrência, ou seja, do cenário de Normalidade.

Ao fim espera-se avaliar a robustez do ranking obtido a partir da priorização de risco das seções, indicando o número de simulações correlacionadas, o grau de confiança obtido, avaliação das diferenças dos rankings e o percentual dos parâmetros na saída.

Como não são conhecidas as distribuições de probabilidade que representam o comportamento das variáveis do problema, são consideradas duas distribuições: Uniforme e Triangular. Como avaliação preliminar, foram consideradas variações de 5%, 10%, 15% e 20% para as duas distribuições indicando se haverá influência significativa na rejeição da hipótese nula. A Tabela 3.4 mostra o resultado da simulação para a variação conjunta dos parâmetros, e para as simulações que obtiveram correlação são apresentados na Tabela 3.5 detalhes da variação do coeficiente de correlação τ de Kendall.

Para ambas as distribuições, não foram verificadas correlação para valores de α inferiores a 0,30 (valor máximo considerado no estudo, relacionado ao grau de confiança de 70%).

Quando a variação foi de 15%, a distribuição triangular foi responsável por rejeitar 52,10% das 100.000 simulações realizadas a um grau de confiança de 70% ($\alpha = 0,30$). Para este mesmo Intervalo na distribuição uniforme foram rejeitadas 57,63% das simulações para $\alpha = 0,25$.

Pode-se observar que a distribuição triangular apresentou valores de α superiores aos da distribuição uniforme para avaliação do mesmo Intervalo da simulação. Para 5%, a distribuição triangular rejeitou ao grau de confiança de 90%, 49,87% das simulações contra 95% em grau de confiança e 64,499% das simulações quando utilizada a distribuição uniforme. Avaliação semelhante é constatada no Intervalo de 10% e 15%.

Com base nisso, é possível afirmar que a distribuição triangular proporcionou uma maior variação de entrada dos parâmetros ocasionando uma saída (ordenação) com maior variação das seções e, portanto, menor correlação entre a simulação e a ordenação original. Especificamente para esta análise de avaliação de risco de gasodutos de gás natural no contexto estudado, a distribuição triangular se mostrou mais conservadora no sentido de proporcionar menor correlação na saída e, portanto ser mais crítica na análise dos resultados.

Com relação aos valores de τ de Kendall, quanto menor o valor do Intervalo analisado, maior o valor de τ médio obtido. De maneira semelhante, à medida que o Intervalo é diminuído,

o desvio padrão também diminui, constatando que o modelo é mais robusto para menores variações com base no valor de τ médio que representa o valor médio de todos os valores obtidos das 100.000 simulações.

Para todas as variações analisadas, foi observada em algum momento correlação perfeita positiva, ou seja, a ordenação obtida pela simulação foi exatamente igual à ordenação original, fato este representado pelo valor de τ máximo igual a 1.

Tabela 3.4 - Simulação Pattern 1

Distribuição	Intervalo	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
Triangular	5%	0,1	100.000	49,87
	10%	0,2	100.000	50,39
	15%	0,3	100.000	52,10
	20%	---	100.000	0
Uniforme	5%	0,05	100.000	64,49
	10%	0,15	100.000	55,68
	15%	0,25	100.000	57,63
	20%	---	100.000	0

Tabela 3.5 - Valores de τ Pattern 1

Distribuição	Intervalo	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
Triangular	5%	0,3827	-0,2857	1	0,2857	0,3571	0,2321
	10%	0,2432	-0,5414	1	0,3571	0,2857	0,2718
	15%	0,1865	-0,5827	1	0,2857	0,2143	0,2755
	20%	---	---	---	---	---	---
Uniforme	5%	0,5307	-0,1429	1	0,5000	0,5714	0,2041
	10%	0,3467	-0,5000	1	0,3571	0,3571	0,2463
	15%	0,2227	-0,5714	1	0,22143	0,2143	0,2538
	20%	---	---	---	---	---	---

A seguir são mostrados em detalhes os valores obtidos de ordenação e variação dos parâmetros separados por distribuição de entrada dos dados: triangular e uniforme respectivamente.

Como discutido nesta seção, a distribuição triangular mostrou-se apresentar valores mais críticos para análise e portanto, optou-se por prosseguir com esta distribuição ao longo dos demais *Patterns*.

3.3.1.1 Análise *Pattern* 1 segundo distribuição Triangular

Nesta subdivisão do *Pattern* 1 são avaliados os resultados obtidos quando a simulação é realizada a partir da distribuição triangular. Como dito anteriormente, nesta análise são variados conjuntamente os parâmetros relacionados ao gás.

A partir da Tabela 3.6 é possível observar a mudança da ordenação das seções para variação de 5% dos valores originais dos parâmetros, ao indicar a sua posição inicial, o percentual de permanência e o percentual de variação ao longo das simulações.

A seção 1, correspondente a uma Área Comercial, representa a área mais crítica da análise de risco, pois esta se encontra na posição 1 da ordenação Original. O Estudo mostra que esta seção é robusta a variação de 5%, pois em 67,02% das simulações correlacionadas a seção 1 permaneceu como a mais crítica entre as demais, apresentando também o maior percentual de permanência quando comparada com as demais, seguida pela seção 5 que representa Área Residencial juntamente com área Comercial, na última posição.

A Tabela 3.7 sintetiza os valores em percentual de variação para todos os parâmetros do gás, indicando que os valores mínimos e máximos de rejeição foram muito próximos de 5%, valor do Intervalo para esta simulação, com exceção do parâmetro n_{a_i} , indicando variações mínimas e máximas de -1,96 e 1,96 respectivamente.

Tabela 3.6 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 5% da distribuição triangular do *Pattern* 1

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	67,02	32,98
2	S 4	29,01	70,99
3	S 7	17,72	82,28
4	S 8	14,74	85,26
5	S 6	18,81	81,19
6	S 2	15,38	84,62
7	S 3	26,30	73,70
8	S 5	53,36	46,64

Tabela 3.7 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 5% para distribuição Triangular do Pattern 1

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	5	-4,98	4,98
D	5	-4,98	4,96
Q	5	-4,98	4,97
Y	5	-4,98	4,97
w_{a_i}	5	-4,97	4,98
P_0	5	-4,97	4,96
L_0	5	-4,98	4,97
V_{eg}	5	-4,98	4,96
B	5	-4,97	4,97
n_{a_i}	5	-1,96	1,96
α_{a_i}	5	-4,97	4,97
P_w	5	-4,97	4,97
RH	5	-4,97	4,97
$\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$	5	-4,97	4,97
g_{θ_{jk}, a_i}	5	-4,98	4,97
R	5	-4,97	4,97
$z_{i\theta_{jk}, a_i}$	5	-4,72	4,72
Ω	5	-4,97	4,97
A_i	5	-4,97	4,97

A Tabela 3.8 apresenta os resultados da análise de sensibilidade para variação de 10% conforme distribuição triangular. Novamente a seção 1 se mostrou mais robusta na análise de variação permanecendo 62,83% das vezes como mais crítica entre as seções de risco. A seção 4, representante de Distrito Industrial/Comercial e tida como segunda em prioridade de risco, permanece 23,34% das vezes como segunda colocada. Atenção também é dada para a seção 5 que permanece na ultima posição 42,83% das vezes.

A Tabela 3.9 mostra o resultado da análise de Sensibilidade do percentual de variação mínimo e máximo de rejeição para Intervalo de 10%, cujos valores dos parâmetros ficaram muito próximos de seus valores extremos.

Tabela 3.8 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 1

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	62,83	37,17
2	S 4	23,34	76,66
3	S 7	17,21	82,79
4	S 8	12,97	87,03
5	S 6	17,19	82,81
6	S 2	13,4	86,6
7	S 3	18,43	81,57
8	S 5	42,83	57,17

Tabela 3.9 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 1

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	10	-9,95	9,95
D	10	-9,93	9,93
Q	10	-9,95	9,95
Y	10	-9,92	9,96
w_{a_i}	10	-9,92	9,94
P_0	10	-9,95	9,94
L_0	10	-9,95	9,93
Veg	10	-9,95	9,94
B	10	-9,93	9,96
n_{a_i}	10	-8,08	8,08
α_{a_i}	10	-9,94	9,94
P_w	10	-9,96	9,95
RH	10	-9,93	9,94
$\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$	10	-9,94	9,94
g_{θ_{jk}, a_i}	10	-9,95	9,95
R	10	-9,94	9,94
$z_{i\theta_{jk}, a_i}$	10	-9,67	9,67
Ω	10	-9,94	9,95
a_i	10	-9,95	9,94

A Tabela 3.10 apresenta os resultados da análise de sensibilidade da ordenação das seções para Intervalo de 15% mediante entrada dos dados segundo distribuição triangular. A seção 1 mostra variar bastante quando submetida a entradas com Intervalo de 15%. Seu percentual de permanência e de mudança de posição é de cerca de 50%, correspondendo a maior variação analisada quando comparada com os Intervalos de 5% e 10%. As seções correspondentes às

posições de 2 a 7 parecem mudar significativamente (em número de vezes) com relação as suas respectivas posições originais.

Com exceção do parâmetro n_{a_i} , os demais apresentaram valores próximos a 15% em valor médio de rejeição, conforme mostrado na Tabela 3.11.

Tabela 3.10 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% da distribuição triangular do Pattern 1

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	50,27	49,73
2	S 4	19,03	80,97
3	S 7	16,43	83,57
4	S 8	12,13	87,87
5	S 6	16,46	83,54
6	S 2	13,58	86,42
7	S 3	17,32	82,68
8	S 5	36,31	63,69

Tabela 3.11 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% da distribuição triangular do Pattern 1

Parâmetro	Intervalo (%)	% Mín Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	15	-14,91	14,93
D	15	-14,92	14,93
Q	15	-14,91	14,89
Y	15	-14,9	14,94
w_{a_i}	15	-14,9	14,95
P_0	15	-14,92	14,93
L_0	15	-14,91	14,94
Veg	15	-14,91	14,91
B	15	-14,94	14,93
n_{a_i}	15	-13,04	13,04
α_{a_i}	15	-14,88	14,93
P_w	15	-14,92	14,92
RH	15	-14,95	14,91
$\lambda_{\theta_{jk},a_i}$	15	-14,93	14,93
g_{θ_{jk},a_i}	15	-14,92	14,91
R	15	-14,91	14,92
$Z_{i\theta_{jk},a_i}$	15	-14,82	14,82
Ω	15	-14,92	14,91
a_i	15	-14,92	14,92

3.3.1.2 Análise *Pattern 1* segundo distribuição Uniforme

Nesta subseção serão analisadas as variações correspondentes às entradas segundo distribuição Uniforme. São simulados 100.000 *trials* estimando Intervalo diferentes para cada caso estudado, variando todos os parâmetros.

A Tabela 3.12 apresenta pouca variação de posição da seção 1 (Área Comercial) quando submetido ao Intervalo de 5% e distribuição Uniforme. A última seção apresenta valores semelhantes de permanência e variação (52,47% e 47,53% respectivamente). Entre as seções que apresentaram grande variação de posição ao longo do ranking, a seção 4 (correspondente à posição 2 do ranking original) apresenta a menor (64,88%).

A Tabela 3.13 mostra os percentuais de rejeição média dos valores dos parâmetros quando submetidos ao Intervalo de 5% e distribuição uniforme. Com exceção dos parâmetros n_{a_i} e $Z_{i\theta_{jk,a_i}}$, todos apresentam percentuais médios de variação de $\pm 5\%$.

Tabela 3.12- Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 5 % da distribuição Uniforme do *Pattern 1*

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	92,94	7,06
2	S 4	35,12	64,88
3	S 7	24,81	75,19
4	S 8	21,59	78,41
5	S 6	27,22	72,78
6	S 2	17,29	82,71
7	S 3	26,95	73,05
8	S 5	52,47	47,53

Tabela 3.13- Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 5% da distribuição Uniforme do Pattern 1

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	5	-5	5
D	5	-5	5
Q	5	-5	5
Y	5	-5	5
w_{a_i}	5	-5	5
P_0	5	-5	5
L_0	5	-5	5
Veg	5	-5	5
B	5	-5	5
n_{a_i}	5	-1,96	1,96
α_{a_i}	5	-5	5
P_w	5	-5	5
RH	5	-5	5
$\lambda_{\theta_{jk},a_i}$	5	-5	5
g_{θ_{jk},a_i}	5	-5	5
R	5	-5	5
$z_{i\theta_{jk},a_i}$	5	-4,72	4,72
Ω	5	-5	5
a_i	5	-5	5

A Tabela 3.14 apresenta os resultados da análise da mudança na ordenação das seções quando valores originais são submetidos ao Intervalo de 10%. A seção 1 permanece robusta com 62,83% das vezes mantendo a posição crítica do gasoduto.

As variações médias obtidas são aproximadamente de 10% para a maioria dos parâmetros conforme Tabela 3.15.

Tabela 3.14- Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10 % da distribuição Uniforme do Pattern 1

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	62,83	37,17
2	S 4	23,34	76,66
3	S 7	17,21	82,79
4	S 8	12,97	87,03
5	S 6	17,19	82,81
6	S 2	13,4	86,6
7	S 3	18,43	81,57
8	S 5	42,83	57,17

Tabela 3.15- Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% da distribuição Uniforme do Pattern 1

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	10	-10	10
D	10	-10	10
Q	10	-10	10
Y	10	-10	10
w_{a_i}	10	-10	10
P_0	10	-10	10
L_0	10	-10	10
Veg	10	-10	10
B	10	-10	10
n_{a_i}	10	-8,08	8,08
α_{a_i}	10	-10	10
P_w	10	-10	10
RH	10	-10	10
$\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$	10	-10	10
g_{θ_{jk}, a_i}	10	-10	10
R	10	-10	10
$z_{i\theta_{jk}, a_i}$	10	-9,72	9,72
Ω	10	-10	10
A_i	10	-10	10

Para variação de 15%, todas as seções variam consideravelmente, indicando que a seção 1 deixa de ser prioritária em 60,79% das simulações correlacionadas, conforme Tabela 3.16 e a maioria dos parâmetros apresentaram percentual médio de correlação igual ao Intervalo (15%) como pode ser visto na Tabela 3.17.

Tabela 3.16- Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15 % da distribuição Uniforme do Pattern 1

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	39,21	60,79
2	S 4	17,02	82,98
3	S 7	16,58	83,42
4	S 8	14,29	85,71
5	S 6	18,52	81,48
6	S 2	13,22	86,78
7	S 3	20,91	79,09
8	S 5	29,47	70,53

Tabela 3.17- Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% da distribuição Uniforme do Pattern 1

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	15	-15	15
D	15	-15	15
Q	15	-15	15
Y	15	-15	15
w_{a_i}	15	-15	15
P_0	15	-15	15
L_0	15	-15	15
Veg	15	-15	15
B	15	-15	15
n_{a_i}	15	-13,04	13,04
α_{a_i}	15	-15	15
P_w	15	-15	15
RH	15	-15	15
$\lambda_{\theta_{jk,a_i}}$	15	-15	15
$g_{\theta_{jk,a_i}}$	15	-15	15
R	15	-15	15
$z_{i\theta_{jk,a_i}}$	15	-14,82	14,82
Ω	15	-15	15
a_i	15	-15	15

3.3.2 Pattern 2: variação dos Parâmetros do Raio Máximo de Perigo

O raio máximo de perigo (CDR) é calculado a partir da relação pessimista da área de perigo em um jato horizontal do gás (BRITO & ALMEIDA, 2009).

O CDR é diretamente proporcional à pressão operacional do duto (P_0) elevada à potência de um meio, ao diâmetro do gasoduto (d) elevado a cinco quartos e inversamente proporcional e da extensão do gasoduto até o estado de compressão (L_0) elevado a um quarto conforme Equação (3-1). Uma vez que a avaliação dos riscos de cada seção depende do raio de abrangência afetado, faz-se necessário estudo da interação dos parâmetros a ele relacionados para o risco total obtido. O valor obtido de CDR está diretamente relacionado com a área de vegetação atingida, a partir do cálculo da área multiplicada pelo percentual de vegetação atingido (parâmetro % Veg), na dimensão Ambiental. Sua relação direta também é observada na avaliação Financeira no cálculo da transmissividade atmosférica(3-11) no valor de ξ_i (Equação(3-21)) e nas perdas financeiras por danos a propriedades, multas e indenizações

($M(t_Q)$) ver equação (3-20). O *CDR* está relacionado também à determinação do número de pessoas feridas na área afetada, determinando o número máximo de pessoas feridas (n_{a_i}).

Outro fator que justifica o estudo do *CDR* é a sua relação com o cálculo do fluxo de calor (*I*) sobre o cenário acidental estudado, afetando parâmetros das três dimensões.

Por fim, justifica-se que o raio da zona de perigo de uma bomba termonuclear é extenso o suficiente para abranger áreas distintas, e portanto, atingindo simultaneamente pessoas, meio ambiente e prejuízos financeiros (Brito & Almeida, 2009).

Para cada variação abaixo descrita foram simuladas 100.000 vezes, segundo distribuição triangular.

Para este estudo foi considerado Intervalo inicial de 20% e observado o grau de significância máximo para o qual a hipótese nula é rejeitada (verificada a correlação). Quando valores de α superiores a 0,05 são obtidos como o máximo de rejeição, uma nova simulação é realizada reduzindo o Intervalo em 5%. Sendo assim, foram simulados os Intervalos de 20%, 15% e 10%, cujos percentuais do número de simulações correlacionadas e o valor de α de rejeição são apresentados na Tabela 3.18. Como resultados tem-se que quanto menor o Intervalo, maior o percentual de simulações correlacionadas. O grau de confiança de 95% foi atingido quando a variação de entrada dos parâmetros foi igual a 10%.

Uma vez que o Intervalo é diminuído, o valor médio de τ é aumentado, ou seja, há uma maior correlação entre as simulações e a ordenação original. O desvio padrão também é diminuído a medida que o Intervalo diminui. O menor valor mínimo obtido foi de -0,6429 para o Intervalo de 20% indicando que houve o maior número de permutações entre as seções para este caso. Para todos os Intervalos foram encontrados valores máximos iguais a 1 e para os Intervalos de 15% e 20% o valor mediano e a moda foram iguais em cada um deles.

Tabela 3.18 - Simulação Pattern 2

Intervalo	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
10%	0,05	100.000	59,80
15%	0,10	100.000	54,80
20%	0,15	100.000	52,87

Tabela 3.19 - Valores de τ Pattern 2

Intervalo	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
10%	0,5078	-0,4286	1	0,5714	0,5000	0,2197
15%	0,4154	-0,5000	1	0,4286	0,4286	0,2396
20%	0,3359	-0,6429	1	0,3571	0,3571	0,2449

Quando os parâmetros do raio máximo de perigo são variados em 10%, a seção 1 permanece praticamente inalterada correspondendo ao percentual em permanência na primeira posição de 98,16%. A seção 4 (posição 2 original) e seção 5 (ultima posição) são as seções que apresentam mais equilíbrio de variação, ou seja, seus valores de permanência na sua posição original e conseqüentemente a sua variação estão em torno de 50% (Tabela 3.20).

O percentual de variação média de rejeição está em torno de $\pm 9,93\%$, como mostrado na Tabela 3.21.

Tabela 3.20 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 2

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	98,16	1,84
2	S 4	41,35	58,65
3	S 7	26,17	73,83
4	S 8	21,52	78,48
5	S 6	29,26	70,74
6	S 2	17,15	82,85
7	S 3	23,74	76,26
8	S 5	49,69	50,31

Tabela 3.21- Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% do Pattern 2

Parâmetro	% Intervalo	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
d	10	-9,93	9,92
P_0	10	-9,93	9,95
L_0	10	-9,95	9,96

Quando variados em 15%, a seção 1 reduz o seu percentual de permanência em comparação com o Intervalo de 10%, porém mantém-se alto (82,43%) como mostrado na Tabela 3.22. A Tabela 3.23 apresenta os valores médios de rejeição dos parâmetros d , P_0 e L_0 .

Tabela 3.22 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern 2

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	82,43	17,57
2	S 4	29,8	70,2
3	S 7	23,84	76,16
4	S 8	20,28	79,72
5	S 6	28,1	71,9
6	S 2	18,7	81,3
7	S 3	19,58	80,42
8	S 5	44,8	55,2

Tabela 3.23 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% do Pattern 2

Parâmetro	Intervalo %	% Mín Rejeitado	% Max Rejeitado
d	15	-14,93	14,91
P_0	15	-14,93	14,91
L_0	15	-14,91	14,92

Conforme Tabela 3.24, a seção 1 permanece prioritária na maioria das vezes, embora passe a apresentar aumento no percentual de variação de 17,57% (Intervalo de 15%) para 44,79% (Intervalo 20%).

A última posição do ranking parece não mudar significativamente à medida que os Intervalos são alterados. Para 10% apresenta percentual de variação de 50,31%, para Intervalo igual a 15% variou 55,2% e por fim, Intervalo de 20% variou 57,92%. Isso indica que em cerca de 50% das vezes essa seção permanece como a de menor risco em relação as demais.

Os resultados da análise de sensibilidade para cada parâmetro do *CDR* é apresentado na Tabela 3.25.

Tabela 3.24 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 2

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	55,21	44,79
2	S 4	20,04	79,96
3	S 7	21,76	78,24
4	S 8	19,21	80,79
5	S 6	27,09	72,91
6	S 2	19,36	80,64
7	S 3	19,98	80,02
8	S 5	42,08	57,92

Tabela 3.25 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern 2

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
d	20	-19,87	19,90
P_0	20	-19,91	19,94
L_0	20	-19,89	19,92

3.3.3 Pattern 3: variação dos Parâmetros do Fluxo de Calor (I)

O fluxo de radiação média sobre o cenário acidental é dado pela Equação(3-10) e apresenta valores distintos para cada seção, variando entre os cenários de furo e ruptura. Seus respectivos parâmetros são: P_w e RH utilizados para o cálculo da transmissividade atmosférica (τ_a); L_0 , P_0 , d , a_i referentes a taxa efetiva de vazamento de gás (Q_{eff}).

O Fluxo de calor está diretamente relacionado aos cálculos da extensão de área de vegetação queimada (p_a). Esta dependente da função da variável aleatória t_Q , que é o tempo de apagamento das chamas. Sendo assim, a consequência ambiental é fortemente afetada quanto maior for o fluxo de calor.

O cálculo da probabilidade de ocorrer uma fatalidade (P_{fat}) a um indivíduo atingido é dependente da determinação do fluxo de calor. Além disso, os valores de ω (fator que representa quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade ser uma queimadura de 1º ou 2º grau), assumem uma parcela da P_{fat} , sendo portanto, estes dois parâmetros dependentes de I, podendo ser considerado o parâmetro de maior interesse de estudo na análise de riscos da dimensão humana.

As perdas financeiras decorrentes de danos físicos, a propriedades e multas e indenizações dependem da intensidade do calor médio liberado, justificando o interesse no impacto da variação do fluxo de calor para a priorização de risco das seções avaliadas para as três dimensões.

Primeiro foi simulado o Intervalo de 20% com distribuição triangular, cujo grau de significância de 85% rejeitou 52,49% das simulações. Em seguida foram testados o Intervalo de 15% e 10%, obtendo-se grau de confiança de 90% e 95%, respectivamente como mostrado na Tabela 3.26.

Com referência aos valores de τ , para todos Intervalos foram encontrados valores máximos iguais a 1e os valores mínimos variaram de -0,6429 a -0,4286. A moda e mediana demonstraram proximidade em seus valores e o desvio padrão foi diminuído discretamente a medida que valores menores de Intervalo foram simulados, como indicado pela Tabela 3.27.

Tabela 3.26 - Simulação Pattern 3

Intervalo	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
10%	0,05	100.000	59,19
15%	0,10	100.000	54,25
20%	0,15	100.000	52,49

Tabela 3.27 - Valores de τ Pattern 3

Intervalo	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
10%	0,5037	-0,4286	1	0,5714	0,500	0,2202
15%	0,4114	-0,500	1	0,4286	0,4286	0,2396
20%	0,3340	-0,6429	1	0,3571	0,3571	0,2438

Quando variado em 10% os valores dos parâmetros do fluxo de calor, a seção 1 mostrou-se bastante robusta, mudando apenas 2,07% das vezes ao longo das simulações correlacionadas. A seção 4 obteve variação de cerca de 59% e a seção 5, permaneceu balanceada entre a sua posição original e variação. Estes resultados são mostrados na Tabela 3.28.

Os valores de rejeição destes parâmetros permearam valores de $\pm 9,95\%$ e são mostrados em detalhes na Tabela 3.29.

Tabela 3.28 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 3

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	97,93	2,07
2	S 4	40,78	59,22
3	S 7	25,71	74,29
4	S 8	21,72	78,28
5	S 6	29,15	70,85
6	S 2	16,98	83,02
7	S 3	23,85	76,15
8	S 5	49,61	50,39

Tabela 3.29 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% do Pattern 3

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
D	10	-9,94	9,95
P_0	10	-9,96	9,94
L_0	10	-9,95	9,95
P_w	10	-9,94	9,96
RH	10	-9,96	9,95
a_i	10	-9,96	9,94

Para variação de 15%, as seções correspondentes as posições originais de 2 a 7 permaneceram cerca de 20%, enquanto a posição 1 houve alta permanência, seguida da última posição que equilibrou permanência e variação, cujos valores de cada seção estão dispostos na Tabela 3.30 para análise, enquanto a Tabela 3.31 mostra que os valores médios de correlação para os parâmetros do fluxo de calor correspondem a cerca de $\pm 14,91\%$.

Tabela 3.30 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern 3

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	82,02	17,98
2	S 4	29,13	70,87
3	S 7	23,8	76,2
4	S 8	20,33	79,67
5	S 6	28,05	71,95
6	S 2	19,06	80,94
7	S 3	19,76	80,24
8	S 5	45,02	54,98

Tabela 3.31- Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% do Pattern 3

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
D	15	-14,89	14,93
P_0	15	-14,91	14,91
L_0	15	-14,90	14,92
P_w	15	-14,91	14,91
RH	15	-14,91	14,92
a_i	15	-14,92	14,92

Por fim, a análise da variação de 20% mostrada na Tabela 3.32 indica que há redução significativa do percentual de vezes que a seção 1 permanece como prioritária de 82,02% para 49,75% quando o Intervalo é aumentado de 15% para 20%. A Tabela 3.33 mostra os percentuais de variação média para cada parâmetro do fluxo de calor.

Tabela 3.32 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 3

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	49,75	50,25
2	S 4	19,45	80,55
3	S 7	20,76	79,24
4	S 8	19,08	80,92
5	S 6	26,26	73,74
6	S 2	18,03	81,97
7	S 3	20,98	79,02
8	S 5	41,85	58,15

Tabela 3.33 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern 3

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
D	20	-19,78	19,87
P_0	20	-19,89	19,91
L_0	20	-19,88	19,88
P_w	20	-19,88	19,90
RH	20	-19,89	19,91
a_i	20	-19,89	19,90

3.3.4 Pattern 4: Avaliação conjunta dos parâmetros que variam por seção

Os parâmetros observados como variados nas seções discretas do gasoduto são, em maioria, provenientes de suas características físicas. São eles: a extensão do gasoduto, o diâmetro, a vazão do gás, valor da pressão constante, pressão de vapor de água saturada e umidade relativa. Outros parâmetros dependem da localização, tais como extensão do gasoduto até o estado de compressão, quantidade de vegetação na zona de perigo crítica, número máximo de pessoas feridas, probabilidade de ter ao menos uma pessoa afetada pela radiação térmica e outras. Por fim, há parâmetros que dependem do acordo entre o fornecedor e receptor do gás que são valor de venda do gás e a estimativa da multa do contrato.

Uma vez que não há um procedimento formal para a divisão do gasoduto em seções (embora leve em consideração agrupamento de área comercial, residencial, etc.), é importante verificar qual o comportamento se uma determinada extensão da seção é definida como maior ou menor (conforme um percentual) ou se ainda diferentes distâncias da estação de compressão irão impactar significativamente na priorização de risco das seções, de acordo com suas perdas características. Os valores de multa de contrato ou ainda as perdas decorrentes do vazamento

do gás a montante ou ainda o número de pessoas atingidas pelo cenário de ocorrência também merecem análise conjunta para analisar o impacto nos resultados.

Sendo assim, julga-se necessário verificar a importância desse grupo de parâmetros a fim de analisar a variação de entrada.

Seguindo o mesmo princípio dos demais *Patterns* descritos anteriormente, foram simulados mediante distribuição triangular, iniciando pelo Intervalo de 20% o qual rejeitou 52,84% das 100.000 replicações. O grau de confiança de 95% foi obtido para o Intervalo de 10%, cujos valores são detalhados na Tabela 3.34.

A partir da Tabela 3.35 verifica-se que o valor igual a -0,4286 foi obtido como mínimo para os Intervalos de 10%, 15% e 20% e todos obtiveram τ máximo igual a 1. O valor médio de τ para $\alpha = 0,05$ foi de 0,5035.

Tabela 3.34 - Simulação Pattern 4

Intervalo	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
10%	0,05	100.000	59,097
15%	0,10	100.000	54,619
20%	0,15	100.000	52,843

Tabela 3.35 - Valores de τ Pattern 4

Intervalo	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
10%	0,5035	-0,4286	1	0,5714	0,5000	0,2208
15%	0,4127	-0,4286	1	0,4286	0,4286	0,239
20%	0,3365	-0,4286	1	0,4286	0,3571	0,2437

A seção permanece robusta correspondendo a um pequeno percentual de variação de 2,06% conforme valores relacionados na Tabela 3.36 e os valores médios de rejeição dos parâmetros são mostrados na Tabela 3.37.

Tabela 3.36 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 4

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	97,94	2,06
2	S 4	40,61	59,39
3	S 7	25,67	74,33
4	S 8	21,58	78,42
5	S 6	29,24	70,76
6	S 2	17,07	82,93
7	S 3	23,71	76,29
8	S 5	49,70	50,30

Tabela 3.37 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% do Pattern 4

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	10	-9,94	9,94
d	10	-9,92	9,94
Q	10	-9,95	9,95
v	10	-9,94	9,94
w_{a_i}	10	-9,95	9,94
P_0	10	-9,94	9,93
L_0	10	-9,94	9,95
Veg	10	-9,95	9,94
β	10	-9,95	9,94
n_{a_i}	10	-8,08	8,08
α_{a_i}	10	-9,95	9,95
P_w	10	-9,95	9,93
RH	10	-9,95	9,95

A variação de 15% demonstrou robustez na avaliação da primeira posição, enquanto as demais apresentam grande variação segundo resultados obtidos na Tabela 3.38.

A análise de sensibilidade da variação dos parâmetros que variam por seção é apresentada na Tabela 3.39.

Tabela 3.38 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern 4

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	81,76	18,24
2	S 4	28,97	71,03
3	S 7	23,96	76,04
4	S 8	20,51	79,49
5	S 6	27,64	72,36
6	S 2	18,85	81,15
7	S 3	19,66	80,34
8	S 5	44,56	55,44

Tabela 3.39 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% do Pattern 4

Parâmetro	Intervalo (%)	% Mín Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	15	-14,92	14,9
d	15	-14,95	14,88
Q	15	-14,92	14,91
v	15	-14,91	14,92
w_{a_i}	15	-14,9	14,91
P_0	15	-14,9	14,94
L_0	15	-14,9	14,91
Veg	15	-14,94	14,9
β	15	-14,9	14,93
n_{a_i}	15	-13,04	13,04
α_{a_i}	15	-14,92	14,95
P_w	15	-14,93	14,95
RH	15	-14,93	14,92

Quando os parâmetros que variam por seção são variados em 20% todas as seções apresentam mudanças significativas, sendo a seção 1 a de maior permanência na posição original (Tabela 3.40). A Tabela 3.41 apresenta que o único parâmetro a apresentar valor médio igual ao Intervalo foi o n_{a_i} .

Tabela 3.40 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 4

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	56,82	43,18
2	S 4	20,35	79,65
3	S 7	21,86	78,14
4	S 8	19,15	80,85
5	S 6	26,54	73,46
6	S 2	19,65	80,35
7	S 3	20,08	79,92
8	S 5	39,81	60,19

Tabela 3.41 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern 4

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	20	-19,87	19,93
d	20	-19,9	19,9
Q	20	-19,9	19,86
v	20	-19,89	19,89
w_{a_i}	20	-19,91	19,91
P_0	20	-19,88	19,91
L_0	20	-19,89	19,89
Veg	20	-19,87	19,9
B	20	-19,92	19,85
n_{a_i}	20	-20	20
α_{a_i}	20	-19,87	19,88
P_w	20	-19,84	19,9
RH	20	-19,9	19,9

3.3.5 Pattern 5: Avaliação conjunta dos parâmetros que variam por seção e Cenário

Estes parâmetros dependem do cenário de ocorrência e seu estudo é de suma importância, pois esta é a base de avaliação dos riscos multidimensionais mediante cenários de ocorrência.

Os parâmetros analisados neste *Pattern* são: ω , o fator que mostra quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade ser uma queimadura de 1º ou 2º grau; $\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$: constante relacionada ao cenário e seção (m^2/J); g_{θ_{jk}, a_i} : inverso do tempo médio do apagamento das chamas (1/s); R : taxa de liberação do gás a partir do furo ou ruptura (m^3/s); a_i : proporção do tamanho do furo (adimensional) obtido pela razão efetiva do furo pela área transversal do duto; $z_{i\theta_{jk}, a_i}$ e θ_{jk, a_i} : probabilidade de ocorrência do cenário acidental.

O maior grau de confiança obtido foi de 90% para o Intervalo igual a 5% (Tabela 3.42). A permanência da seção 1 na primeira posição e da seção 5 na última posição foi média de 64%, indicando que estas seções tendem a ser a mais prioritária e a menos prioritária respectivamente quando o Intervalo é de 5% (Tabela 3.44).

É mostrado na Tabela 3.43 que o desvio padrão calculado para os 4 Intervalos simulados apresentam pouca variação quando comparados e que os valores mínimos não obedeceram uma sequência de crescimento a medida que o Intervalo aumenta como visto nos demais *Patterns* simulados. Os valores médios de rejeição de cada parâmetro são apresentados na Tabela 3.45.

Tabela 3.42 - Simulação Pattern5

Intervalo	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
5%	0,10	100.000	62,34
10%	0,15	100.000	55,56
15%	0,15	100.000	49,16
20%	0,20	100.000	52,48

Tabela 3.43 - Valores de τ Pattern5

Intervalo	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
5%	0,4633	-0,2857	1	0,5000	0,5000	0,2196
10%	0,3511	-0,5714	1	0,4286	0,3571	0,2612
15%	0,3042	-0,7143	1	0,3571	0,2857	0,2688
20%	0,2580	-0,5714	1	0,3571	0,2857	0,2693

Tabela 3.44 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 5% do Pattern 5

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	63,94	36,06
2	S 4	31,83	68,17
3	S 7	15,61	84,39
4	S 8	11,97	88,03
5	S 6	19,43	80,57
6	S 2	15,99	84,01
7	S 3	35,13	64,87
8	S 5	66,2	33,8

Tabela 3.45 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 5% para distribuição Triangular do Pattern 5

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
$\lambda_{\theta_{jk},a_i}$	5	-4,92	4,92
g_{θ_{jk},a_i}	5	-4,92	4,92
R	5	-4,92	4,93
$z_{i\theta_{jk},a_i}$	5	-4,69	4,66
ω	5	-4,92	4,92
a_i	5	-4,91	4,92
θ_{jk,a_i}	5	-4,93	4,92

A partir das variações de 10% (Tabela 3.46), 15% (Tabela 3.48) e 20% (Tabela 3.50) percebe-se que a seção 1 permanece prioritária e que a seção 5 também continua ocupando a última posição da ordenação como no Intervalo de 5%. A seção segue como a terceira seção que mais permanece na posição original (2º lugar) nas 3 variações descritas.

A Tabela 3.47, Tabela 3.49 e Tabela 3.51 apresentam respectivamente os valores médios de rejeição mínima e máxima para cada parâmetro analisado.

Tabela 3.46 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 10% do Pattern 5

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	69,46	30,54
2	S 4	30,17	69,83
3	S 7	16,99	83,01
4	S 8	11,47	88,53
5	S 6	18,93	81,07
6	S 2	13,86	86,14
7	S 3	30,22	69,78
8	S 5	58,68	41,32

Tabela 3.47 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 10% para distribuição Triangular do Pattern 5

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
$\lambda_{\theta_{jk},a_i}$	10	-9,82	9,82
g_{θ_{jk},a_i}	10	-9,85	9,84
R	10	-9,83	9,83
$z_{i\theta_{jk},a_i}$	10	-9,65	9,69
ω	10	-9,81	9,83
α_i	10	-9,82	9,83
θ_{jk,a_i}	10	-9,85	9,84

Tabela 3.48 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 15% do Pattern5

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	68,53	31,47
2	S 4	27,73	72,27
3	S 7	17,68	82,32
4	S 8	13,08	86,92
5	S 6	20,57	79,43
6	S 2	14,06	85,94
7	S 3	25,49	74,51
8	S 5	53,21	46,79

Tabela 3.49 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 15% para distribuição Triangular do Pattern5

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
$\lambda_{\theta_{jk},a_i}$	15	-14,71	14,74
g_{θ_{jk},a_i}	15	-14,74	14,75
R	15	-14,74	14,73
$z_{i\theta_{jk},a_i}$	15	-14,62	14,68
Ω	15	-14,73	14,71
α_i	15	-14,73	14,76
θ_{jk,a_i}	15	-14,74	14,75

Tabela 3.50 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 5

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	59,2	40,8
2	S 4	23,65	76,35
3	S 7	15,95	84,05
4	S 8	10,94	89,06
5	S 6	20,39	79,61
6	S 2	13,61	86,39
7	S 3	22,39	77,61
8	S 5	46,7	53,3

Tabela 3.51 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% para distribuição Triangular do Pattern 5

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
$\lambda_{\theta_{jk},a_i}$	20	-19,64	19,64
g_{θ_{jk},a_i}	20	-19,66	19,66
R	20	-19,64	19,63
$Z_{i\theta_{jk},a_i}$	20	-19,76	19,61
Ω	20	-19,66	19,66
α_i	20	-19,64	19,70
θ_{jk,a_i}	20	-19,68	19,68

3.3.6 Pattern 6: Avaliação Diferenciada por dimensão

Nesta análise serão considerados percentuais de 5, 10, 15 e 20 respectivamente de forma a analisar com mais criticidade (maior percentual de variação) a dimensão humana, seguido dos parâmetros correspondentes a avaliação das consequências financeiras, ambiental e por fim os parâmetros comuns a todas as dimensões. Esta sequência foi obtida a partir da estrutura de preferências do decisor, conforme descrito na Seção 3.3 com base em Krym et al (2012).

Tabela 3.52 - Percentual Diferenciado de simulação para os parâmetros

Exclusivos por Dimensão			Comuns a todas as Dimensões
Humana	Ambiental	Financeira	
n_{a_i}	Veg	L_i	d
α_{a_i}	$\lambda_{\theta_{jk},a_i}$	Q	P_0
ω		Y	L_0
		w_{a_i}	P_w
		B	RH
		g_{θ_{jk},a_i}	a_i
		Zi_{θ_{jk},a_i}	
		R	
20%	10%	15%	5%

Tabela 3.53 - Simulação Pattern6

Intervalo	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
Variado	0,05	100.000	83,596

Tabela 3.54- Valores de τ Pattern6

Intervalo	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
Variado por Tipo de Parâmetro	0,6399	-0,3571	1	0,500	0,6429	0,1780

Tabela 3.55 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções para variação Diferenciada do Pattern 6

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	100	0
2	S 4	39,54	60,46
3	S 7	28,53	71,47
4	S 8	22,8	77,2
5	S 6	32,44	67,56
6	S 2	20,94	79,06
7	S 3	32,42	67,58
8	S 5	62,78	37,22

Tabela 3.56 - Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros para variação de 20% do Pattern6

Parâmetro	Intervalo (%)	% Min Rejeitado	% Max Rejeitado
L_i	15	-14,94	14,91
d	5	-4,98	4,98
Q	15	-14,94	14,94
v	15	-14,95	14,93
w_{a_i}	15	-14,95	14,94
P_0	5	-4,97	4,98
L_0	5	-4,98	4,97
Veg	10	-9,95	9,96
β	15	-14,95	14,94
n_{a_i}	20	-20	20
α_{a_i}	20	-19,91	19,92
P_w	5	-4,97	4,97
RH	5	-4,98	4,98
$\lambda_{\theta_{jk}, a_i}$	10	-9,96	9,96
g_{θ_{jk}, a_i}	15	-14,94	14,94
R	15	-14,94	14,94
$z_{i\theta_{jk}, a_i}$	15	-14,82	14,82
ω	15	-14,93	14,92
a_i	5		

3.3.7 Pattern 7: Avaliação das preferências do decisor

Neste *Pattern* serão avaliadas as preferências do decisor, primeiramente verificando a influência do comportamento quanto a aversão, propensão e neutralidade ao risco e em seguida, verificar se a variação das constantes de escala causam mudanças significativas no resultado. Os parâmetros relacionados ao gás são fixados em seus valores originais.

3.3.7.1 Avaliação do comportamento do decisor

Como os comportamentos originais considerados no problema foram de aversão ao risco, não foi considerada neutralidade do decisor para nenhum critério abaixo descrito.

O resumo de cada variação é apresentada na Tabela 3.57. Nesta análise, dois casos não alteraram a ordenação: o primeiro consiste em analisar as dimensões humana e financeira de maneira propensa ao risco e averso na ambiental e a segunda consiste na simulação do decisor ser averso ao risco nas dimensões humana e ambiental, enquanto assume comportamento propenso na dimensão financeira. Como não houve alteração para estes dois casos, é dito que há correlação perfeita positiva, ao passo que o valor de τ é igual a 1.

Em quatro casos foi obtido o valor de τ igual a 0,9286 ao grau de significância de 99%, indicando inversão de ordem entre duas seções vizinhas, conforme mostrado na Tabela 3.57.

Por fim, o menor grau de correlação de τ (0,7857) foi obtido quando todas as dimensões foram consideradas com propensão ao risco. No entanto, este valor de correlação é considerado alto pois rejeita a hipótese nula ao grau de confiança de 95%.

Tabela 3.57 - Resultado da Análise de sensibilidade da Ordenação das Seções quanto ao Comportamento do decisor do Pattern 7

Dimensão	Comportamento						
	Averso	Propenso	Propenso	Propenso	Averso	Propenso	Averso
Humana	Propenso	Averso	Averso	Propenso	Propenso	Propenso	Averso
Financeira	Propenso	Averso	Propenso	Averso	Averso	Propenso	Propenso
Ambiental	Propenso	Averso	Propenso	Averso	Averso	Propenso	Propenso
Ordenação	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	S7	S4	S7	S4	S4	S7	S7
	S4	S7	S4	S7	S7	S4	S4
	S8	S8	S8	S8	S8	S8	S8
	S6	S2	S6	S6	S6	S2	S6
	S2	S6	S2	S2	S2	S3	S2
	S3	S3	S3	S3	S3	S6	S3
	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5
τ	0,9286	0,9286	0,9286	1,0000	1,0000	0,7857	0,9286

3.3.7.2 Avaliação das Constantes de Escala

Considerando que a elicitación das constantes de escala faz parte de um processo decisório que depende da percepção do decisor, característica inerente ao problema multicritério, variações nas constantes de escala devem ser consideradas, pois o decisor pode avaliar como uma determinada importância em um critério aumentado ou diminuído impacta no resultado final. Neste contexto, foi aplicado o Intervalo de $\pm 20\%$ para cada dimensão (uma por vez) e verificada a variação.

A partir da Tabela 3.58 verifica-se que a ordenação é bastante robusta para Intervalo de 20% dos valores originais das constantes de escala. Quando variado 20% para cada dimensão, 100% das simulações obtiveram correlação com a ordenação original ao grau de confiança de 99%.

Os valores de τ obtidos são mostrados na Tabela 3.59 indicando que o desvio padrão obtido neste *Pattern* foi pequeno, resultando em valores mínimos acima de 0,8 e moda e mediana igual a 1.

Quando variado 20% na dimensão humana, grande semelhança foi encontrada em relação ao ranking original, mudando apenas 17,6% das vezes as seções 4 e 7 e 5,49% as seções 8 e 6 (Tabela 3.60).

Ao modificar a constante de escala financeira, as seções 4 e 7 apresentaram variação pouco superior ao obtido na variação da constante humana. A Tabela 3.61 apresenta percentual de variação de 33,81 para estas duas seções. As seções 4 e 7 também foram invertidas em posição em poucos casos.

A alteração da constante da dimensão ambiental proporcionou apenas variação das seções 4 e 7, conforme Tabela 3.62.

Tabela 3.58 - Simulação das constantes de escala do Pattern 7

Intervalo	Dimensão	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
20%	Humana	0,01	100.000	100
	Financeira	0,01	100.000	100
	Ambiental	0,01	100.000	100

Tabela 3.59 - Valores de τ obtidos da variação das constantes de escala do Pattern 7

Intervalo	Dimensão	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
20%	Humana	0,9835	0,9286	1	1	1	0,0301
	Financeira	0,9712	0,8571	1	1	1	0,0434
	Ambiental	0,9793	0,9286	1	1	1	0,0324

Tabela 3.60 - Resultado da Análise de Sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 7 (KHumana)

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	100	0
2	S 4	82,4	17,6
3	S 7	82,4	17,6
4	S 8	94,51	5,49
5	S 6	94,51	5,49
6	S 2	100	0
7	S 3	100	0
8	S 5	100	0

Tabela 3.61 - Resultado da Análise de Sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 7(KFinanceira)

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	100	0
2	S 4	66,19	33,81
3	S 7	66,19	33,81
4	S 8	93,54	6,46
5	S 6	93,54	6,46
6	S 2	100	0
7	S 3	100	0
8	S 5	100	0

Tabela 3.62 - Resultado da Análise de Sensibilidade da Ordenação das Seções para variação de 20% do Pattern 7(KAmbiental)

Posição	Ranking	% Ranking Original	% Mudança
1	S 1	100	0
2	S 4	71,06	28,94
3	S 7	71,06	28,94
4	S 8	100	0
5	S 6	100	0
6	S 2	100	0
7	S 3	100	0
8	S 5	100	0

3.3.8 Pattern 8: Avaliação conjunta dos parâmetros relacionados ao gás e das preferências do decisor

Uma vez que já foram avaliados conjuntamente os parâmetros relacionados ao Gás Natural no *Pattern 1* e analisadas as preferências do decisor no *Pattern 7*, faz-se necessário finalizar as simulações com o estudo do comportamento da associação destes dois *Patterns*.

No 1º *Pattern* foi verificado que variações de 20% resultaram em ordenações das seções muito diferentes daquela obtida na original, resultando em baixo valor de τ , e consequentemente a não rejeição da hipótese nula, ou seja, para Intervalo de 20% não há correlação para grau de confiança acima de 70%.

A avaliação conjunta dos parâmetros do gás demonstrou robustez dos resultados quando submetidos a variação de 5% e sensibilidade para variações de 10% e 15%. Em adição, será

avaliado neste *Pattern* se o mesmo Intervalo aplicado aos parâmetros do gás e as constantes de escala simultaneamente provocam perturbações significativas nos resultados.

Quando confrontados os resultados do *Pattern 8* com aqueles obtidos no *Pattern 1* com variação segundo distribuição triangular, não houve influência no grau de confiança de rejeição da hipótese nula para as três dimensões. Sendo assim, a variação de 5% para todos os parâmetros do gás conjuntamente (*Pattern 1*) rejeitam a hipótese nula de não correlação ao grau de confiança de 90%. Quando esses mesmos parâmetros são submetidos a variação de 5% simultaneamente com igual percentual em cada constante de escala, a correlação entre as simulações é obtida também ao grau de confiança de 90% (Tabela 3.63). De maneira análoga, esta verificação é válida para Intervalo de 10% e 15%.

Como constatado no *Pattern* anterior, não há influência significativa das constantes de escala para o resultado final dentro do Intervalo verificado. Este fato é confirmado pelos valores muito próximos do desvio padrão quando comparados em um mesmo Intervalo, para as três dimensões. Valores muito próximos e até mesmo iguais são encontrados para a moda e mediana obtidas (Tabela 3.64).

Tabela 3.63 - Simulação *Pattern 8*

Intervalo	Dimensão	α	Total de Simulações	% de Simulações Correlacionadas
5%	Humana	0,10	100.000	50,24
	Financeira	0,10	100.000	50,27
	Ambiental	0,10	100.000	49,92
10%	Humana	0,20	100.000	50,31
	Financeira	0,20	100.000	50,34
	Ambiental	0,20	100.000	50,31
15%	Humana	0,30	100.000	51,93
	Financeira	0,30	100.000	52,27
	Ambiental	0,30	100.000	52,13

Tabela 3.64 - Valores de τ Pattern 8

Intervalo	Dimensão	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Mediana	σ
5%	Humana	0,3833	-0,6429	1	0,4286	0,4286	0,2323
	Financeira	0,3839	-0,5714	1	0,4286	0,4286	0,2321
	Ambiental	0,3822	-0,5714	1	0,4286	0,3571	0,2328
10%	Humana	0,2426	-0,8571	1	0,2857	0,2857	0,2732
	Financeira	0,2428	-0,7857	1	0,2857	0,2857	0,2729
	Ambiental	0,2435	-0,8570	1	0,2857	0,2857	0,2703
15%	Humana	0,1861	-0,8571	1	0,2143	0,2143	0,2752
	Financeira	0,1876	-0,8571	1	0,2143	0,2143	0,2762
	Ambiental	0,1872	-0,8571	1	0,1429	0,2143	0,2752

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A discussão apresentada neste capítulo faz referência aos *Patterns* simulados no capítulo anterior. Primeiramente a análise é feita mediante variação de todos os parâmetros do gás, uma vez que não se pode considerar a princípio eliminação de nenhum destes na análise, mas sim avaliar a influência conjunta para o estudo.

Como mostrado no *Pattern 1*, a distribuição triangular apresentou maiores variações na saída em comparação a utilização do mesmo Intervalo na distribuição uniforme.

Em ambas as distribuições, os resultados obtidos a partir da variação de 20% dos valores originais dos parâmetros foram demasiados, de maneira que para nenhum valor de α (entre os analisados neste trabalho) houvesse rejeição do valor médio de τ .

Para a distribuição triangular, o grau de confiança de 90% foi atingido quando todos os parâmetros relacionados ao gás foram variados conjuntamente a partir de um Intervalo de 5%. Para a distribuição uniforme, ao variar em 5% os valores originais dos parâmetros foi obtido um grau de confiança de 95%. Estes dois resultados demonstram que o modelo foi bastante robusto para variação de 5% de todos os parâmetros do gás.

A partir da variação conjunta destes parâmetros para Intervalo iguais ou superiores a 10% foi demonstrada sensibilidade reduzindo o grau de confiança para 80% e 70% respectivamente para Intervalo de 10% e 15% na distribuição triangular.

Reduções também foram observadas no grau de confiança quando submetidos os parâmetros à distribuição uniforme de 85% para 75%, Intervalo de 10% e 15% respectivamente. Isso significa que a medida que o range é aumentado, uma maior variação na saída é gerada e por conseguinte, menor será a correlação entre a simulação e a ordenação original.

A partir da análise estatística pode-se avaliar o nível de significância de rejeição da hipótese nula e diferentes valores de α podem ser analisados para o problema, uma vez que o decisor poderá julgar necessário ter diferentes ações de manutenção ou de alocação de recursos para diferentes níveis de significância. Neste contexto o SAD permite a avaliação para diferentes valores de α e em seguida analisar o comportamento da ordenação das seções ao longo do ranking para o nível de significância especificado.

A partir da análise de sensibilidade é possível fazer algumas suposições sobre o modelo e indicar ao decisor as alternativas relevantes na decisão multicritério de priorização de risco de gasodutos de gás natural.

Para iniciar a análise retornaremos a seção 3.3 quando foi descrita a aplicação do modelo. A razão das diferenças demonstra quantas vezes mais uma seção incrementa o risco em relação a outra seção. Na Tabela 3.3 foi visto que a diferença absoluta entre a seção 1 (primeira posição) e a seção 4 (segunda posição) é de 2211,3022. Ou seja, a seção 1 incrementa o risco em relação a seção 4 em 2211 vezes. Como esta diferença é muito grande, torna esta seção bastante robusta.

Foi verificado no *Pattern* 1 que a seção 1 foi robusta para as variações de 5% e 10% (acima de 62% de permanência como prioritária em risco) e para variação de 15%, tornou-se mais sensível, variando cerca de 50% das vezes.

Nesta discussão será abordado apenas o maior grau de confiança obtido na simulação em cada *Pattern*. A Figura 4.1 mostra a variação da Seção 1 ao longo das simulações correlacionadas para Intervalo de 5%, ao grau de confiança de 90%. A partir dela é possível verificar que pouca variação apresentada pela seção 1 corresponde as primeiras posições, ou seja, mesmo quando ela não permaneceu na posição 1, 29,41% das vezes ela permaneceu na primeira metade da ordenação, mostrando-se bastante crítica.

A segunda posição do ranking é composta pela seção 4, que em 14,64% das vezes ocupou a primeira posição e 18,07% a terceira posição. Do total de 70,99% de variação, 32,71% corresponde as posições 1 e 3, em torno de sua posição original (Figura 4.2).

Com relação a seção 7, correspondente a terceira posição, esta varia mais para as primeiras posições (1 e 2 somam 37,64%) do que permanece na terceira posição (17,72%) como mostrado na Figura 4.3.

A posição 4, ocupada originalmente pela seção 8, apresenta variação tanto para as primeiras posições quanto para as últimas (Figura 4.4).

A seção 6 tende a ocupar uma região central de prioridade de risco (Figura 4.5), enquanto as seções 2, 3 e 5 (Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 respectivamente) tendem a permanecer nas últimas posições.

Figura 4.1 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1

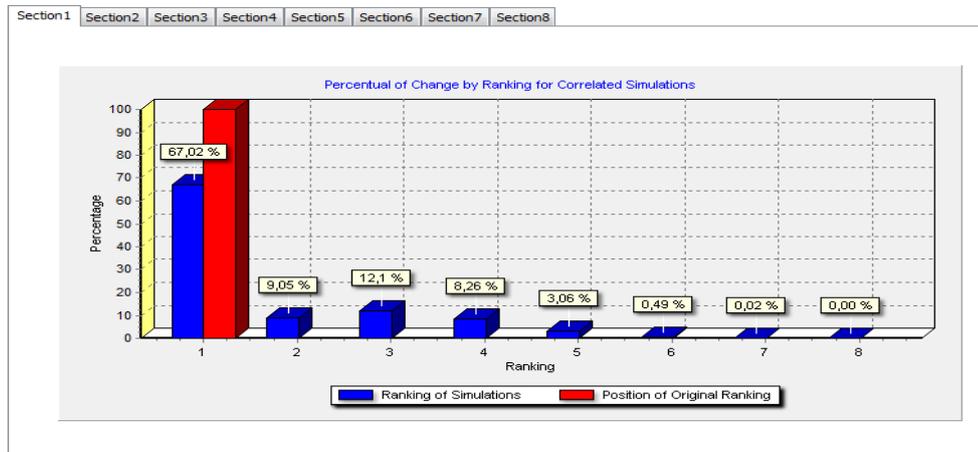


Figura 4.2 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1

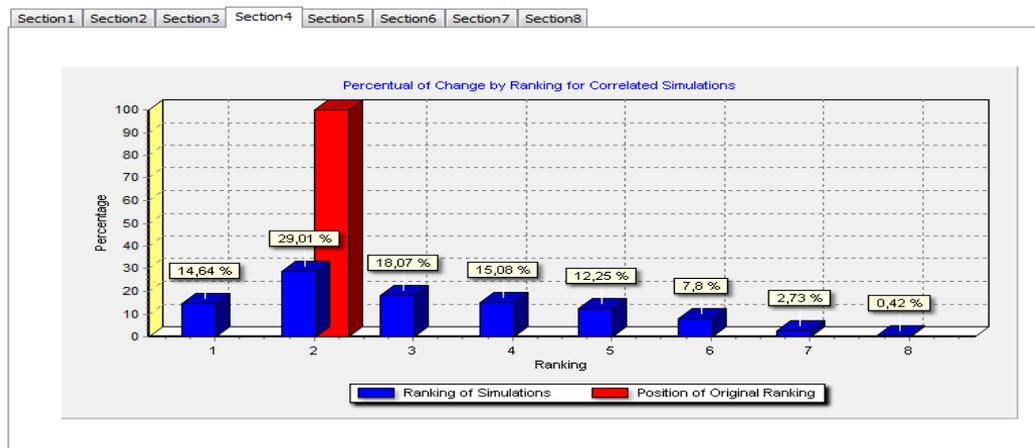


Figura 4.3 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1

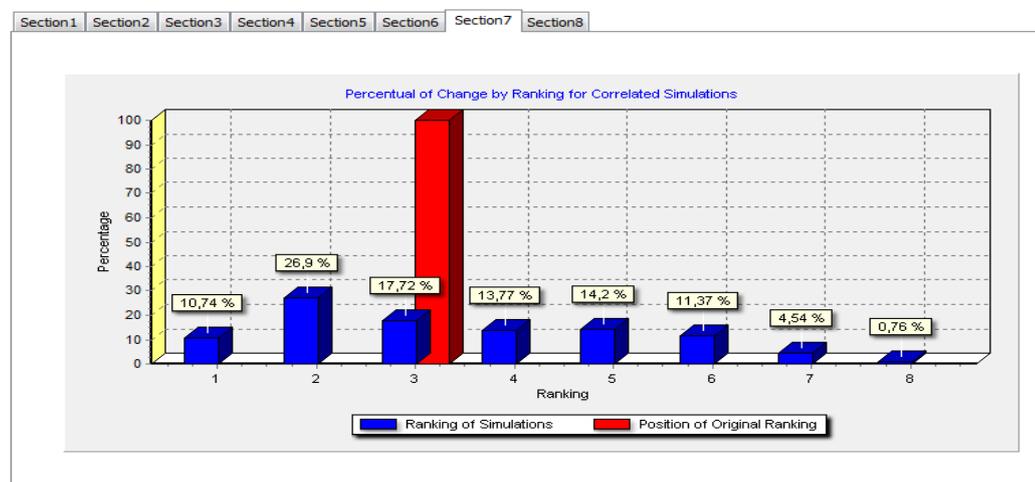


Figura 4.4 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1

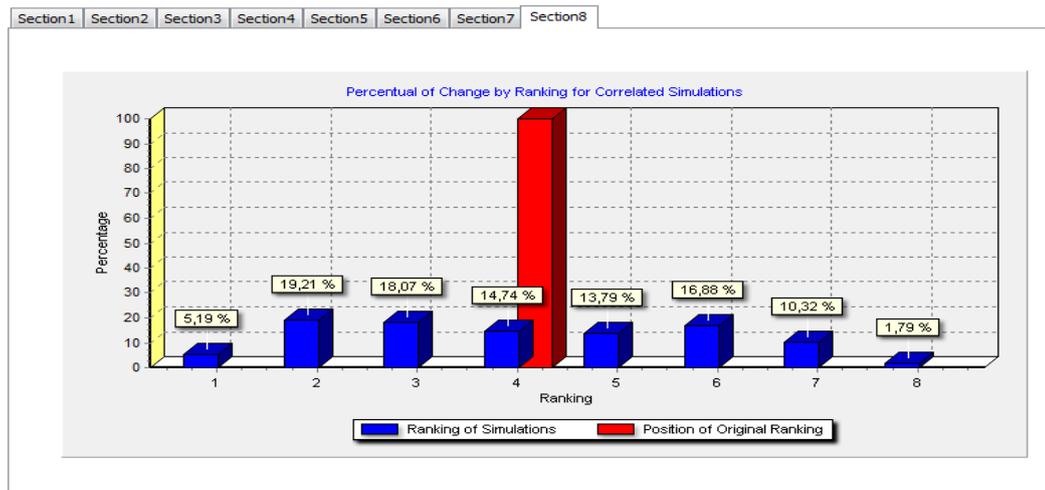


Figura 4.5 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1

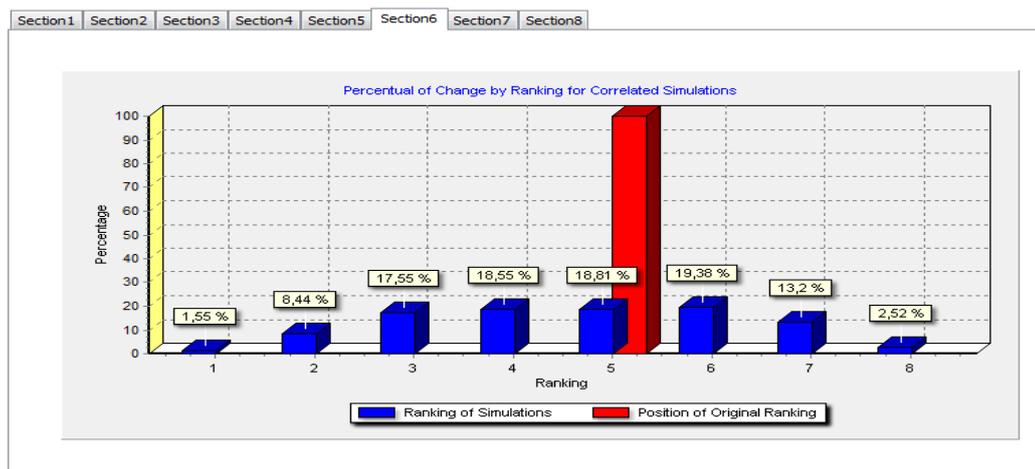


Figura 4.6 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1

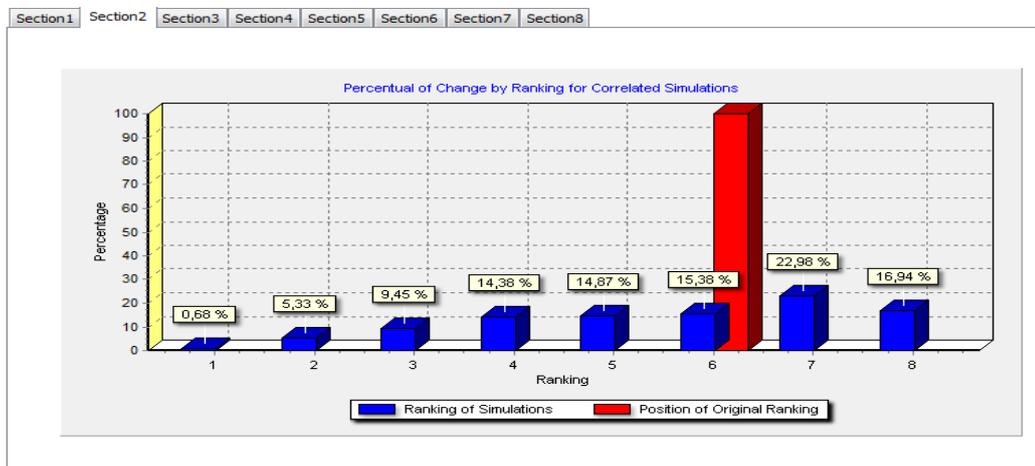


Figura 4.7 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1

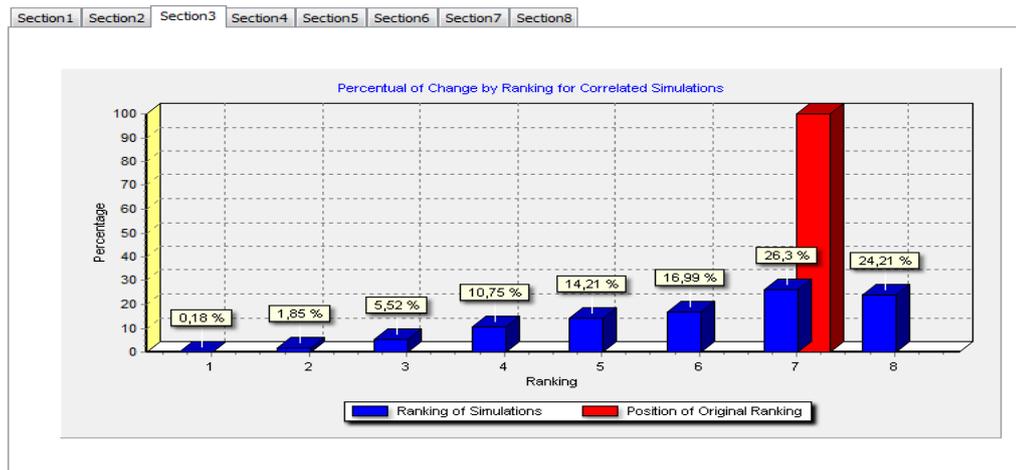
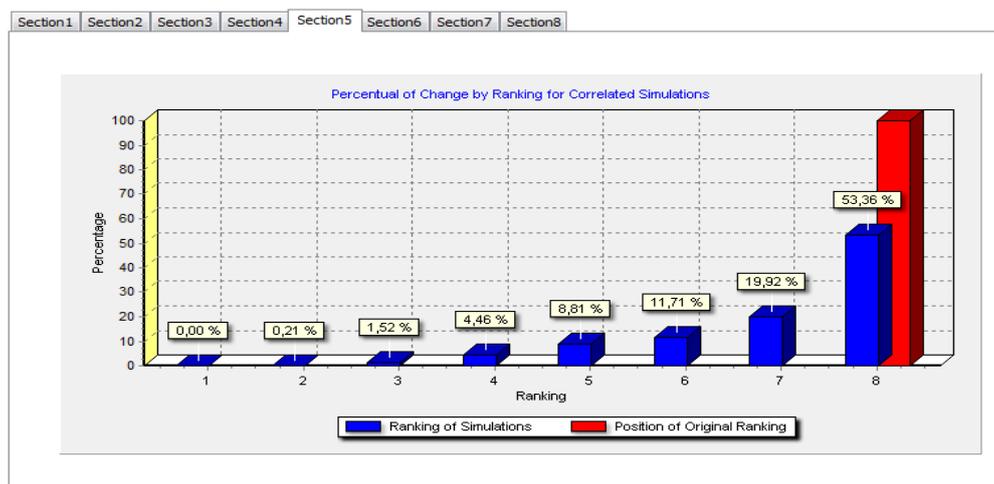


Figura 4.8 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 1



No *Pattern 2* foram avaliadas os parâmetros que variam por seção, obtendo rejeição para α igual a 0,05 mediante variação de 10% nos valores originais dos parâmetros. A robustez também foi observada para Intervalo igual a 15%, obtendo-se um grau de confiança de 90%. Para Intervalo de 20% mostrou-se sensível para α igual a 0,15. Para Intervalo de 10% não foi observada mudanças na seção 1 (Figura 4.9). A seção 4 manteve-se 41,35% na posição original 2 e mediante esta avaliação, a seção tende a ocupar regiões mais centrais e parece não passar a ser a mais crítica (Figura 4.10). As seções 7, 8 e 6 ocupam regiões centrais e não podem ser consideradas mais críticas nem ocupam posições finais (Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 respectivamente). As seções 3 e 5 tendem a ocupar, na maioria, as duas últimas posições, alternando entre si (Figura 4.14 e Figura 4.15).

Figura 4.9 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2

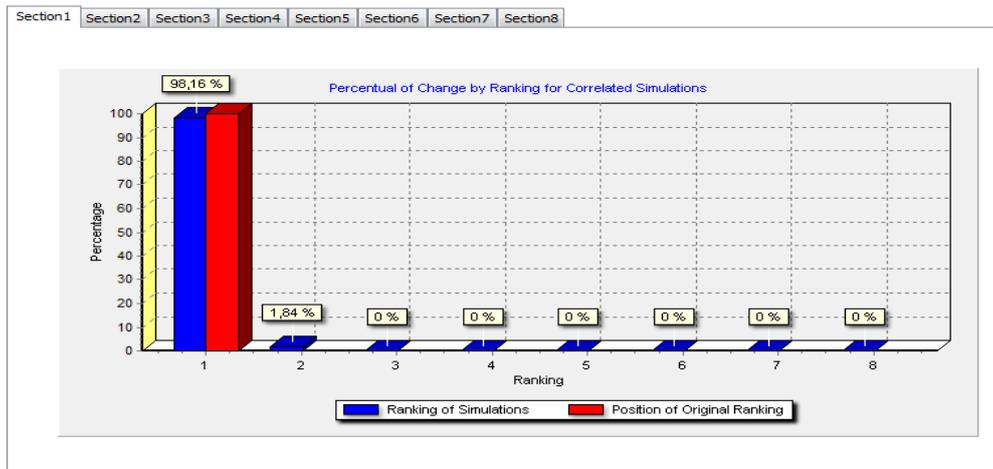


Figura 4.10 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2

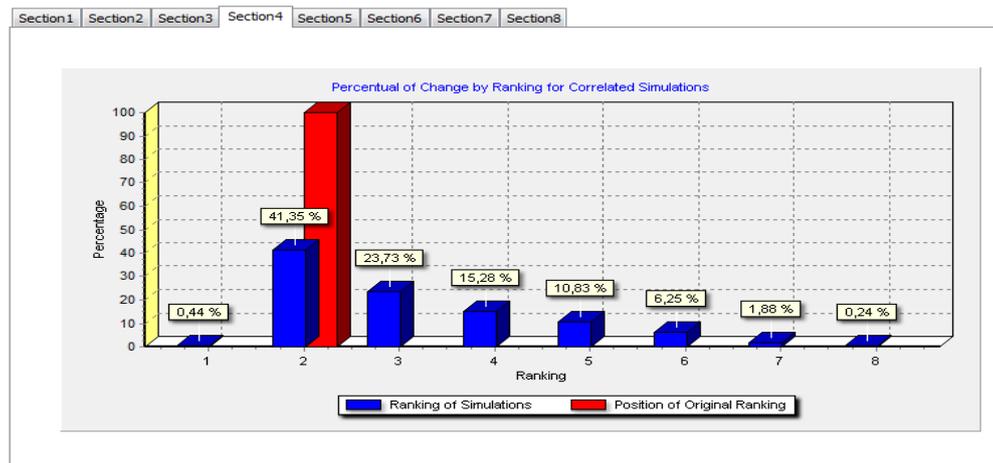


Figura 4.11 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2

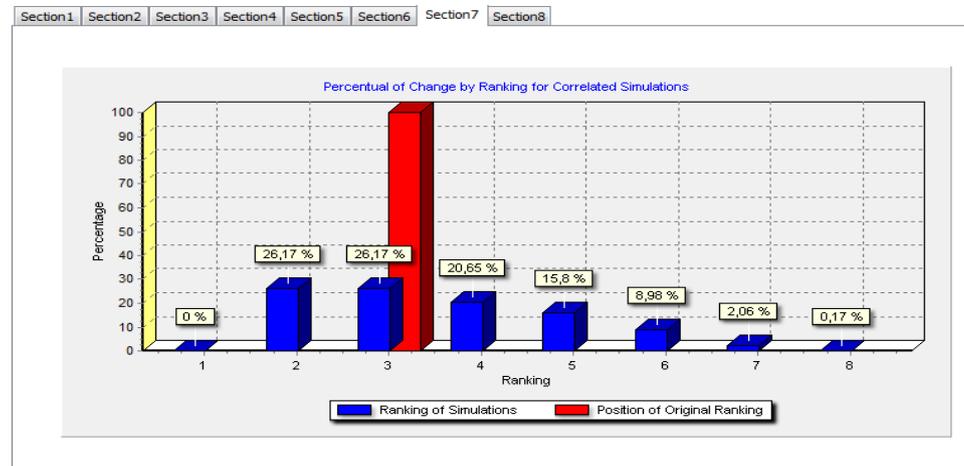


Figura 4.12 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2

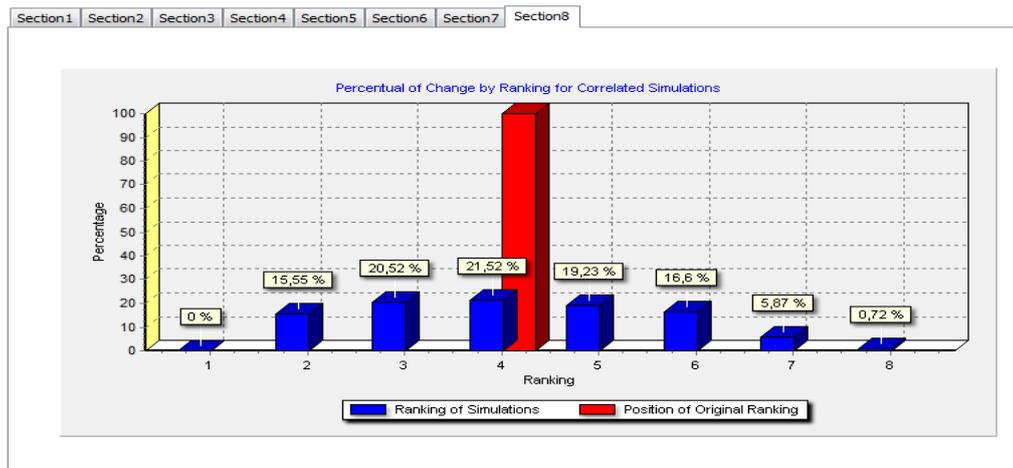


Figura 4.13 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2

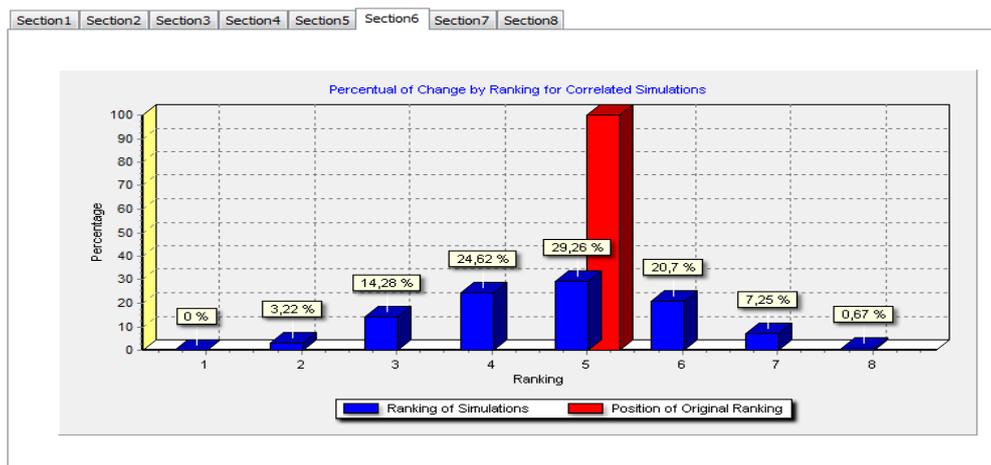


Figura 4.14 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2

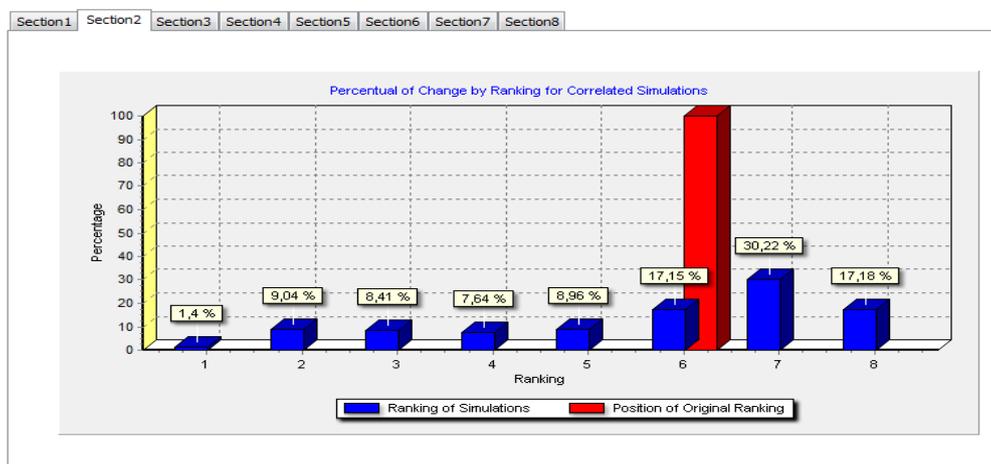


Figura 4.15 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2

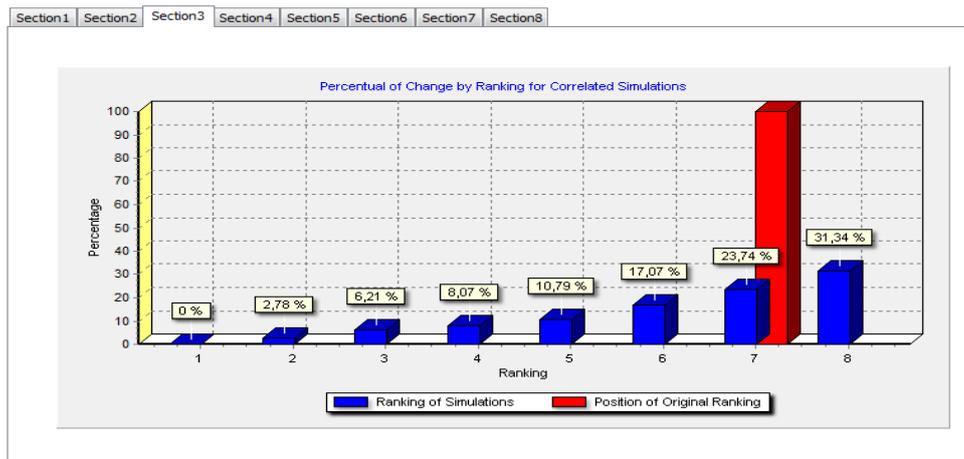
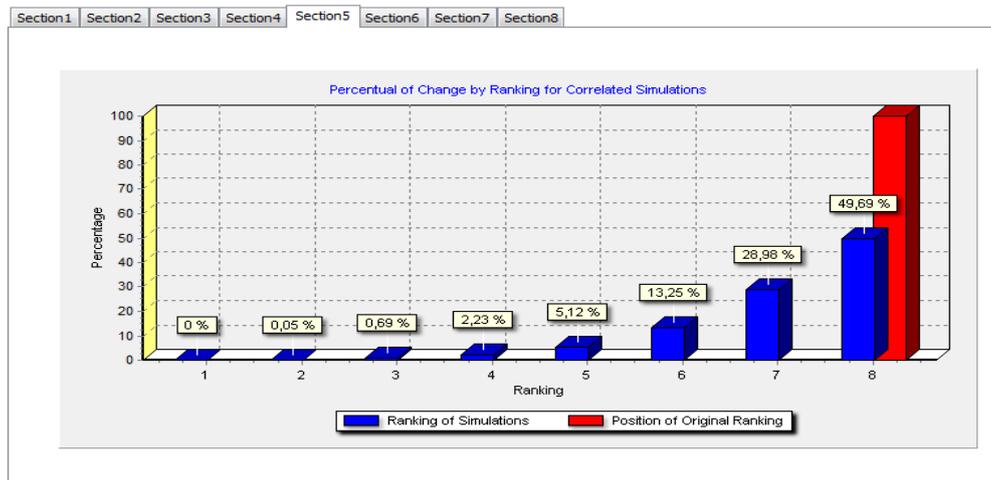


Figura 4.16 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 2



No *Pattern 3* foram avaliadas as variações dos parâmetros do fluxo de calor. A seção 1 se mostrou robusta neste estudo, no qual praticamente não variou (Figura 4.17). A seção 4 tende a permanecer na posição 2 na maioria das vezes, mas pode alternar entre a terceira e quarta posições (Figura 4.18). As seções 7, 8 e 6 ocupam regiões centrais (Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21), enquanto as seções 2 e 3 tendem a permanecer nas últimas posições embora também apareçam na primeira metade da ordenação (Figura 4.22 e Figura 4.23). Por fim, a seção 5 tende a permanecer na última posição (Figura 4.24).

Figura 4.17 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3

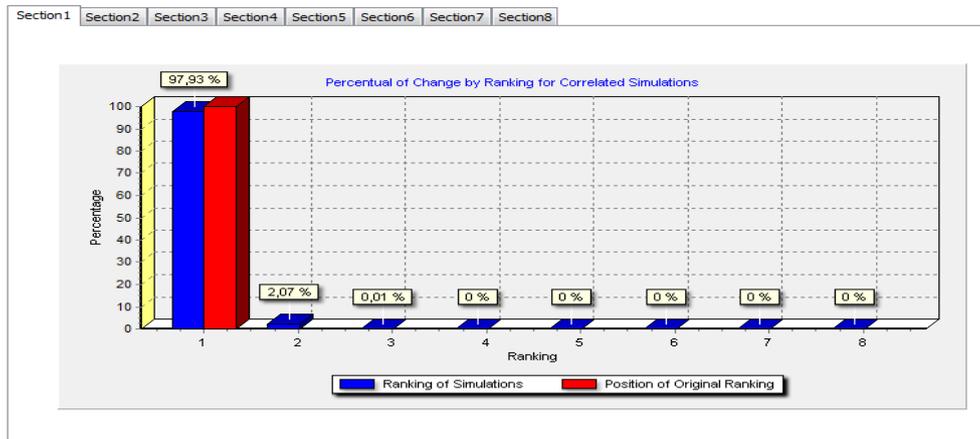


Figura 4.18 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3

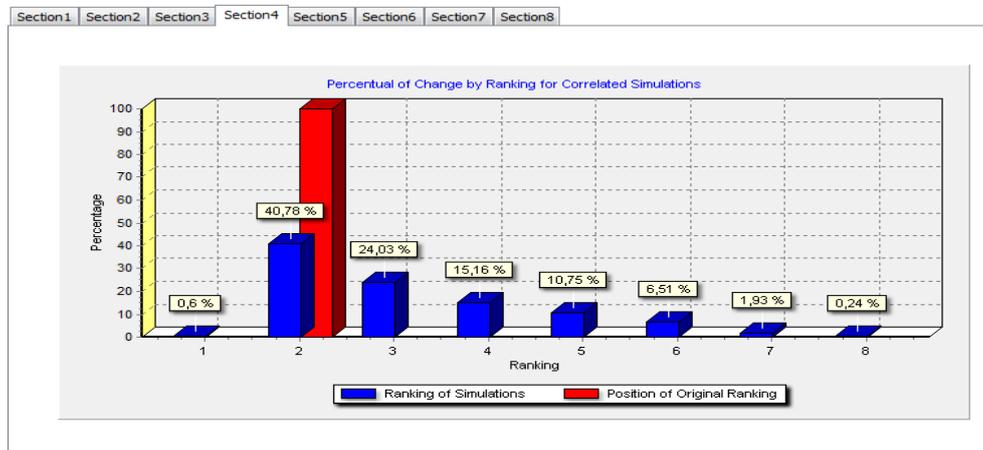


Figura 4.19 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3

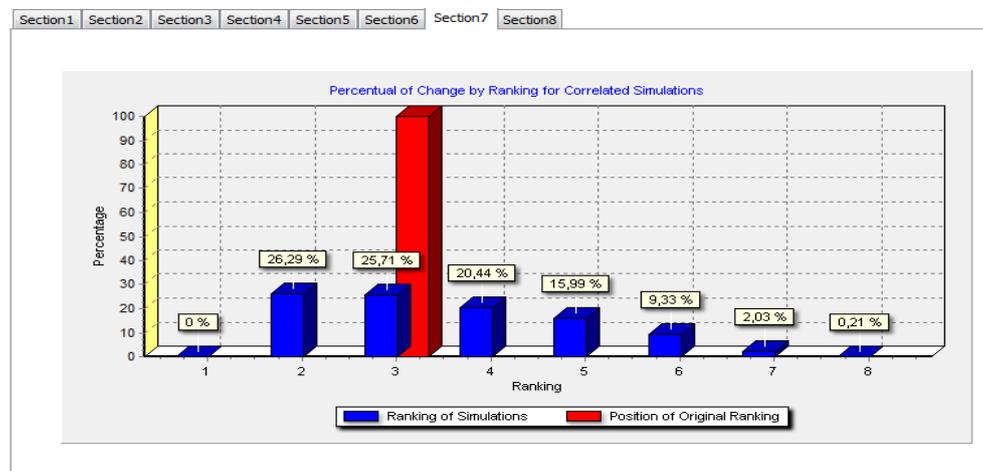


Figura 4.20 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3

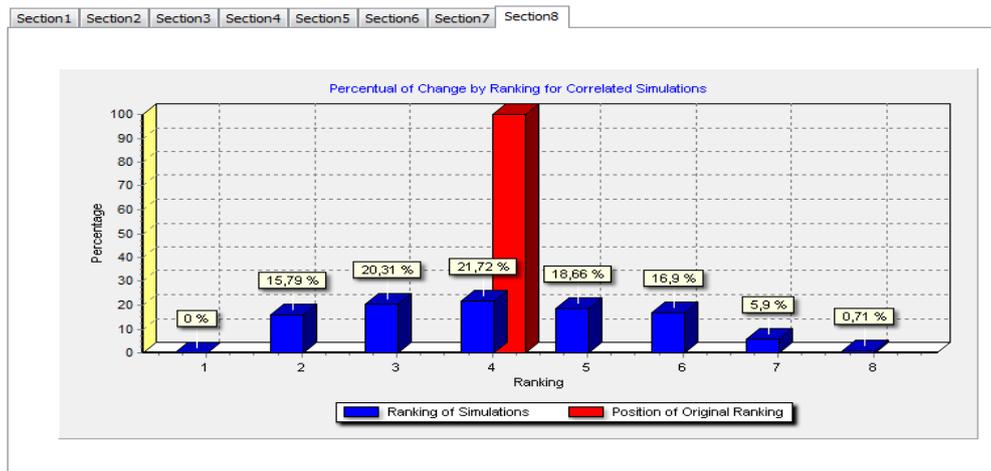


Figura 4.21 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3

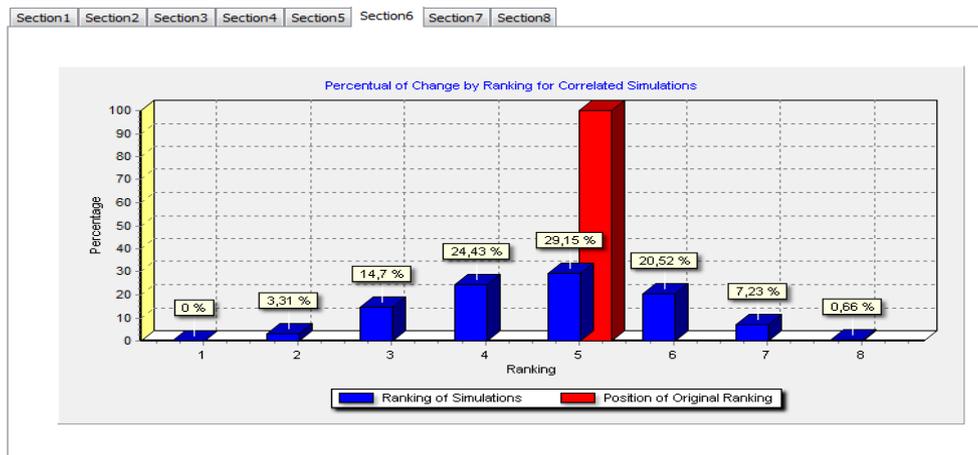


Figura 4.22 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3

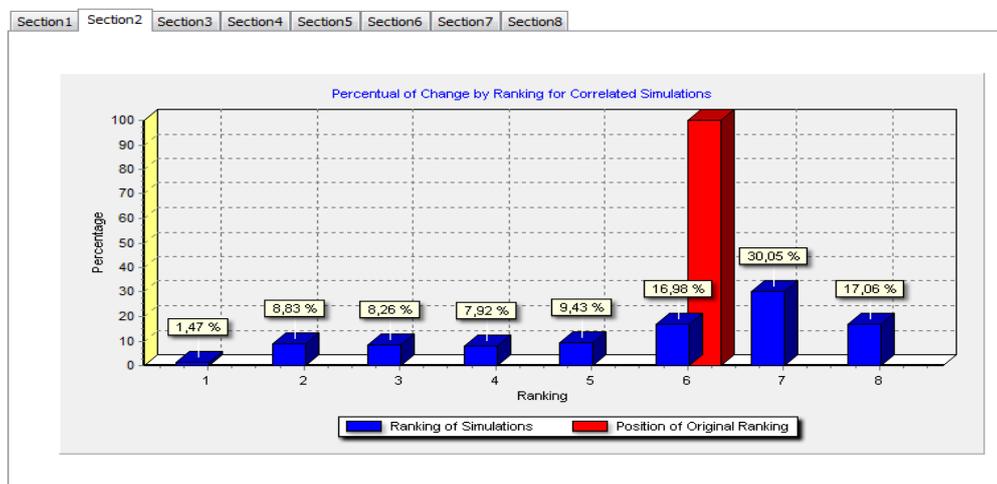


Figura 4.23 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3

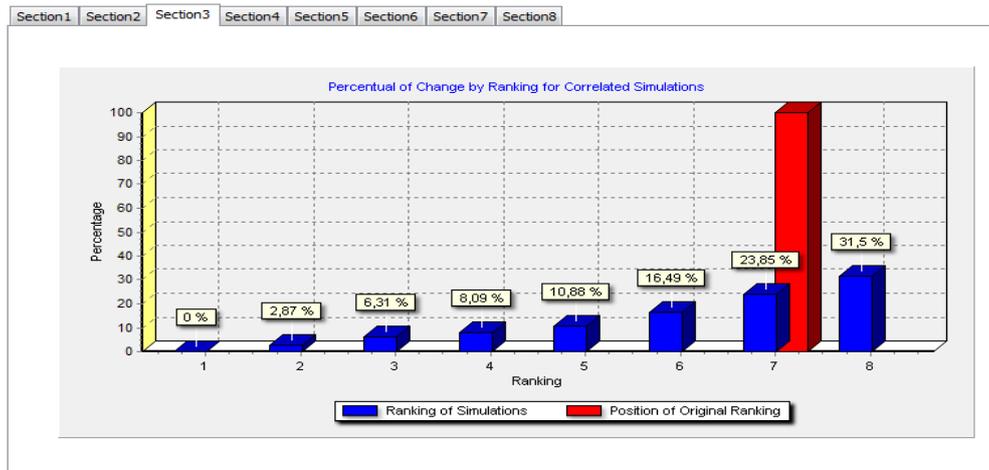
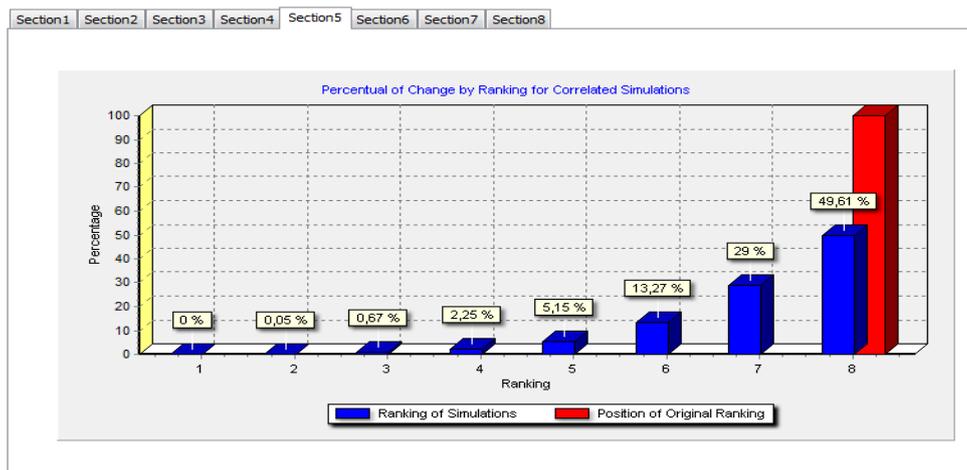


Figura 4.24 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 3



O *Pattern 4* avalia o comportamento da saída quando submetido a variações dos parâmetros por seção. O grau de significância de 95% é atingido para uma variação de 10% dos valores originais dos parâmetros relacionados ao fluxo de calor. Mais uma vez a seção 1 mostra-se a mais robusta (Figura 4.25). A seção 4 segue a tendência de permanecer em seu ranking original e por vezes alternar da 2ª a 4ª posições (Figura 4.26). A seção 7 (Figura 4.27) preenche as posições de 2 a 4 de maneira mais distribuída do que a seção 4, enquanto a seção 8 mantém uma amplitude maior de deslocamento distribuído entre as posições 2 e 6 (Figura 4.28). A seção 6 apresenta distribuição mais acentuada entre as posições 3 e 6 (Figura 4.29). As seções 2, 3 e 5 ocupam as 3 últimas posições em sua maioria (Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32).

Figura 4.25 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4

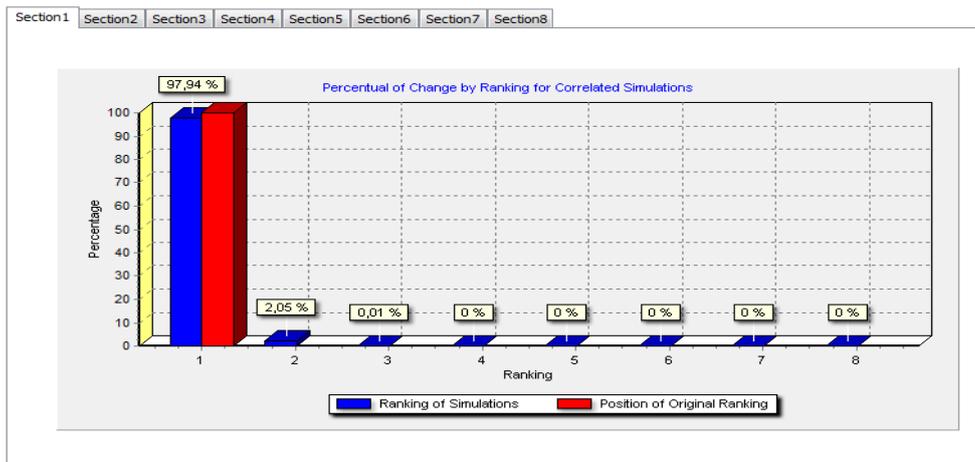


Figura 4.26 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4

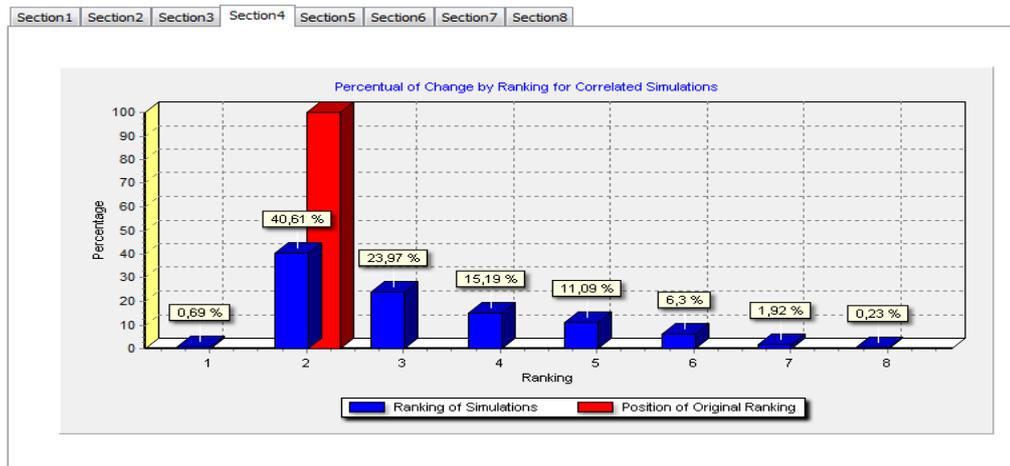


Figura 4.27 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4

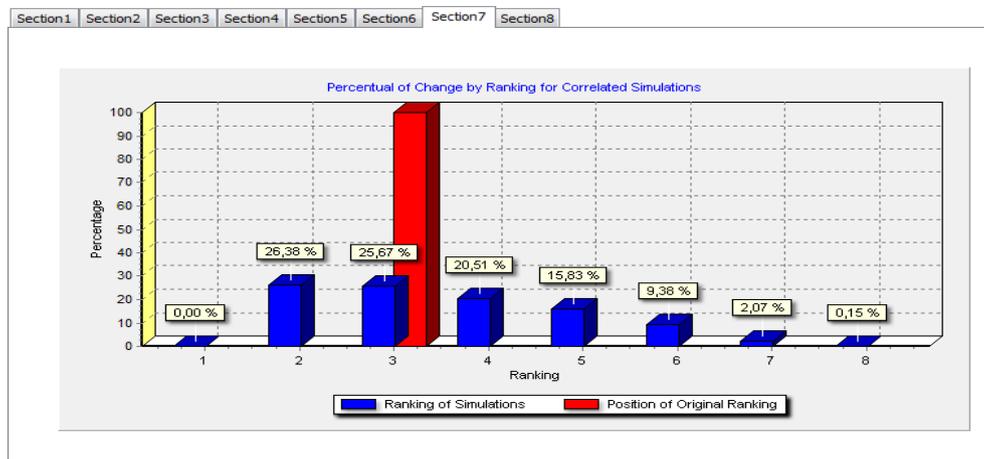


Figura 4.28 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4

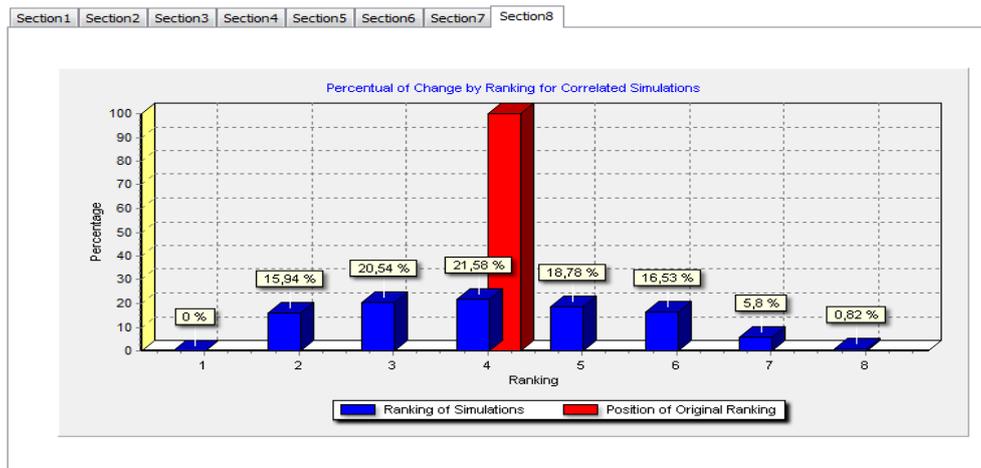


Figura 4.29 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4

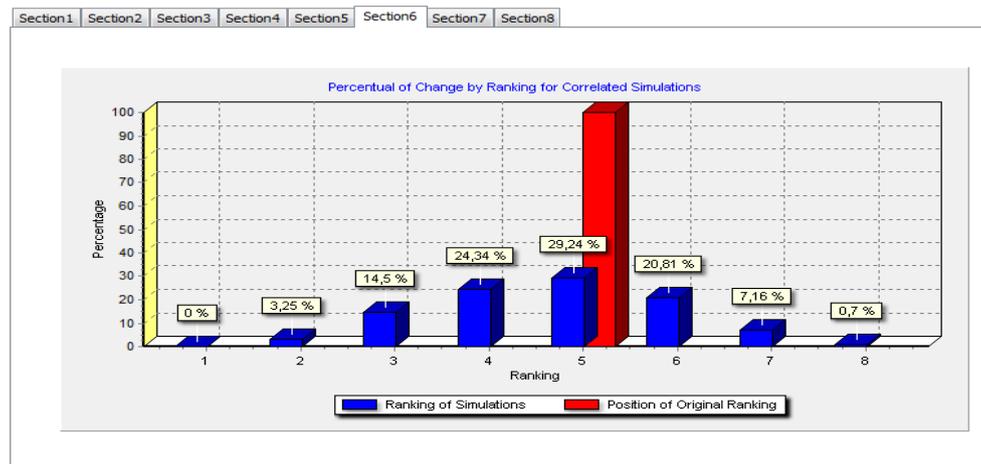


Figura 4.30 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4

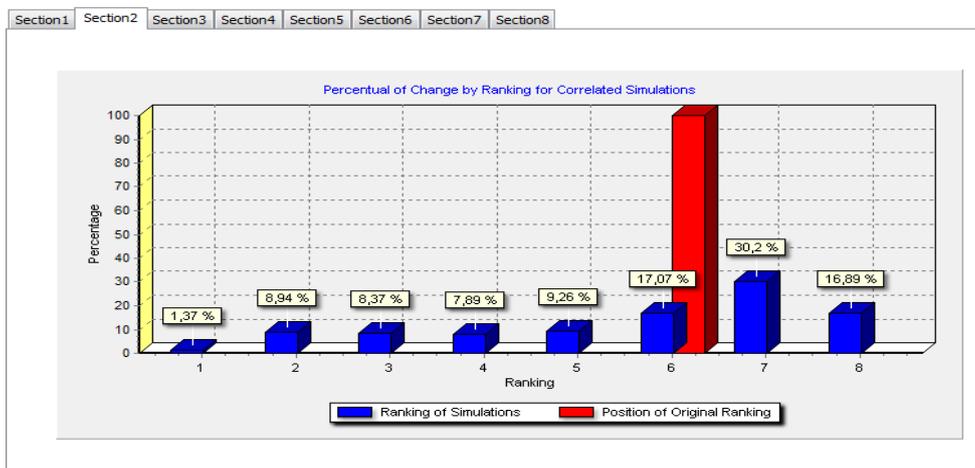


Figura 4.31 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4

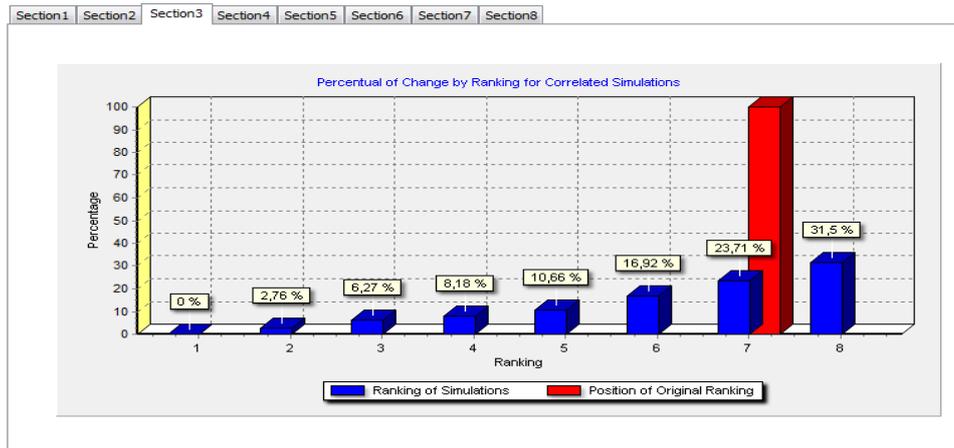
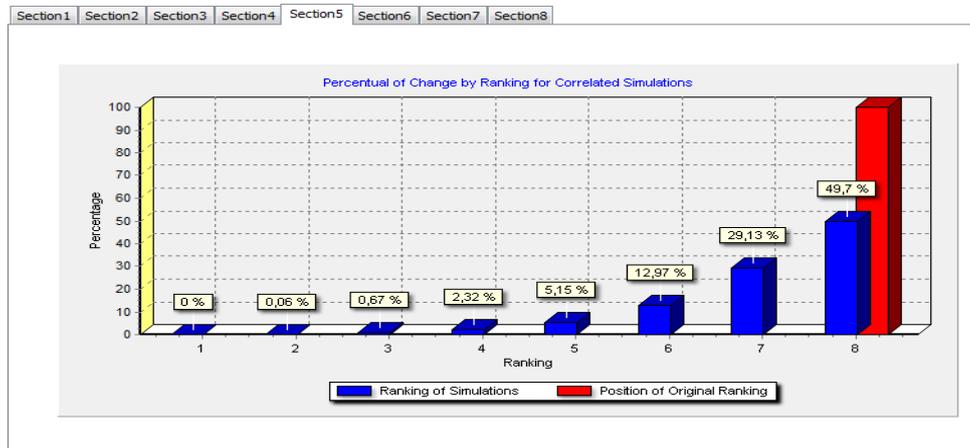


Figura 4.32 -Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 10% da distribuição triangular do Pattern 4



No *Pattern 5* foi abordada a variação dos parâmetros que variam por seção e cenário atingindo o grau de significância de 90% para o Intervalo de 5%. Isso demonstra que esta configuração é mais sensível, por exemplo, do que o *Pattern 4*, no qual foi avaliada a variação por seção.

Quando comparado ao *Pattern* anterior, a primeira seção mudou significativamente a permanência original, reduzindo de 97,94% quando variado 10% (*Pattern 4*) para 63,95% quando variado 5% (*Pattern 5* como mostrado na Figura 4.33). O objetivo desta comparação é apenas mostrar que um Intervalo maior por seção influencia menos na ordenação final do que um Intervalo menor por seção e cenário. Esta avaliação é baseada também no valor de τ médio que é igual a 0,5035 no primeiro caso e igual a 0,4633 no segundo (menor para todos os Intervalos simulados).

Nesta configuração há também alteração da seção 4 da posição 2 para 1 (Figura 4.34), diferentemente dos *Patterns* 2, 3 e 4 que não há esta inversão. As seções 7 e 8 também tendem a ocupar as posições ascendentes a elas originalmente (Figura 4.35 e Figura 4.36). A seção 6 é distribuída nas posições centrais (Figura 4.37), enquanto as ultimas posições referentes as seções 2, 3 e 5 são permutadas entre si (Figura 4.38, Figura 4.39 e Figura 4.40).

Figura 4.33 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5

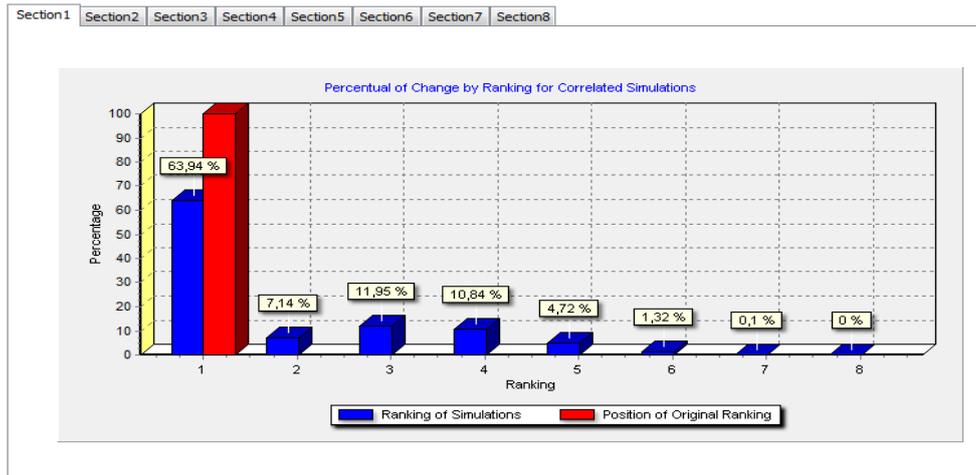


Figura 4.34 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5

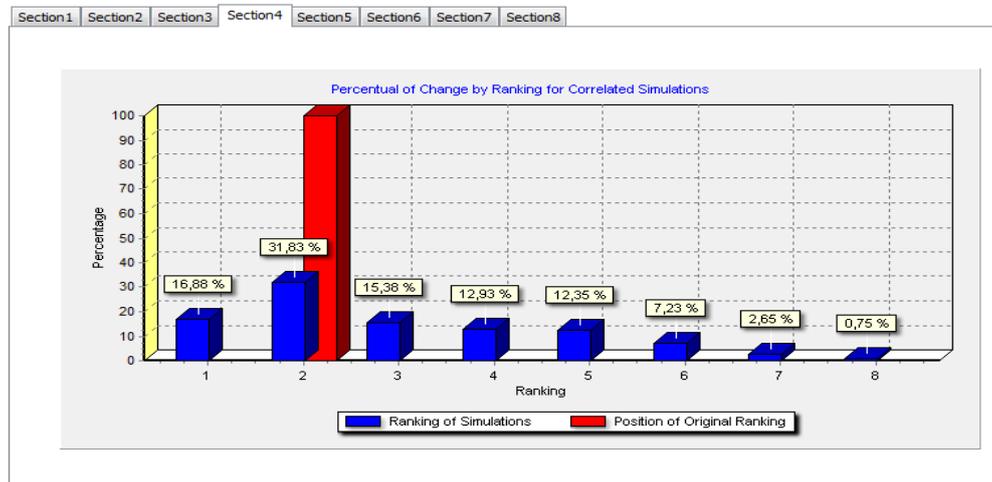


Figura 4.35 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5

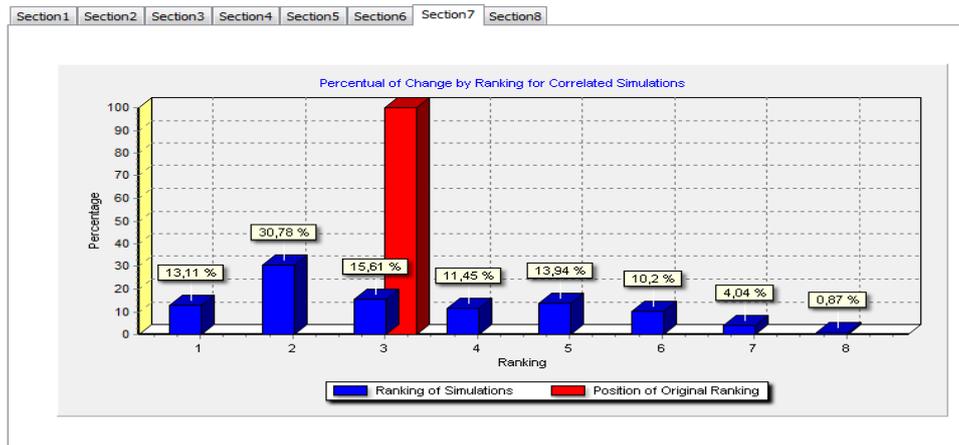


Figura 4.36 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5

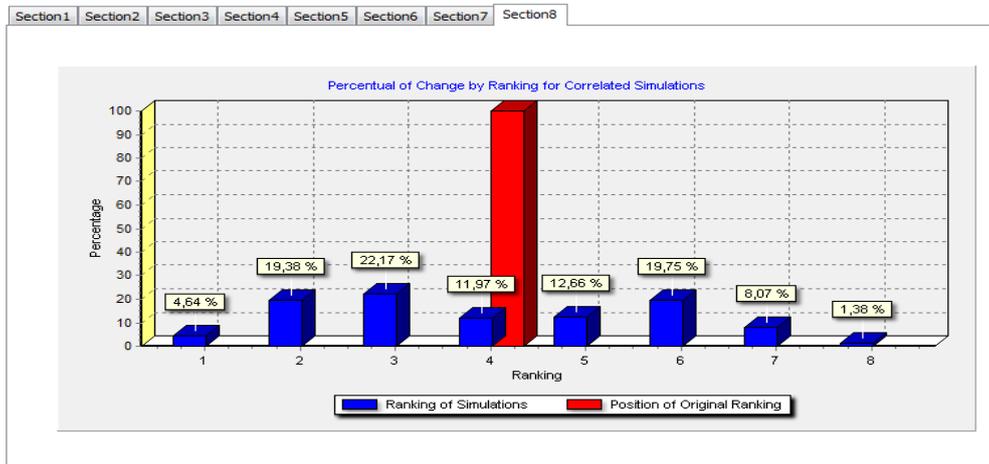


Figura 4.37 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5

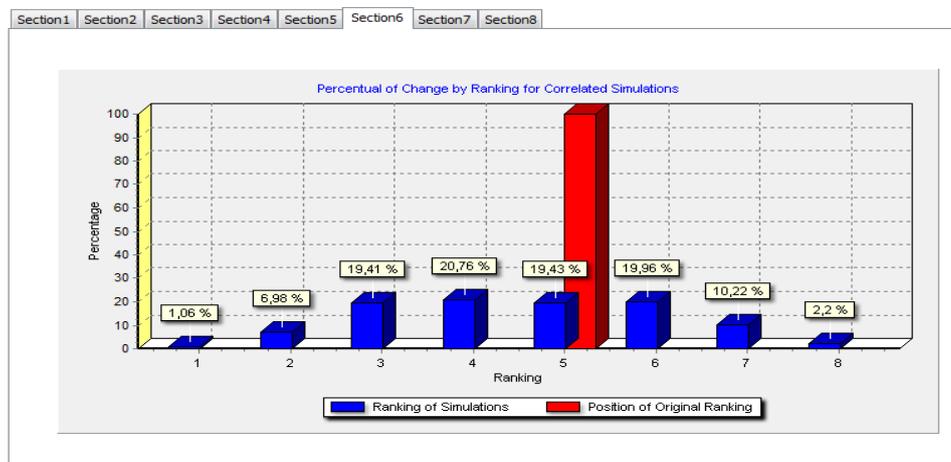


Figura 4.38 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5

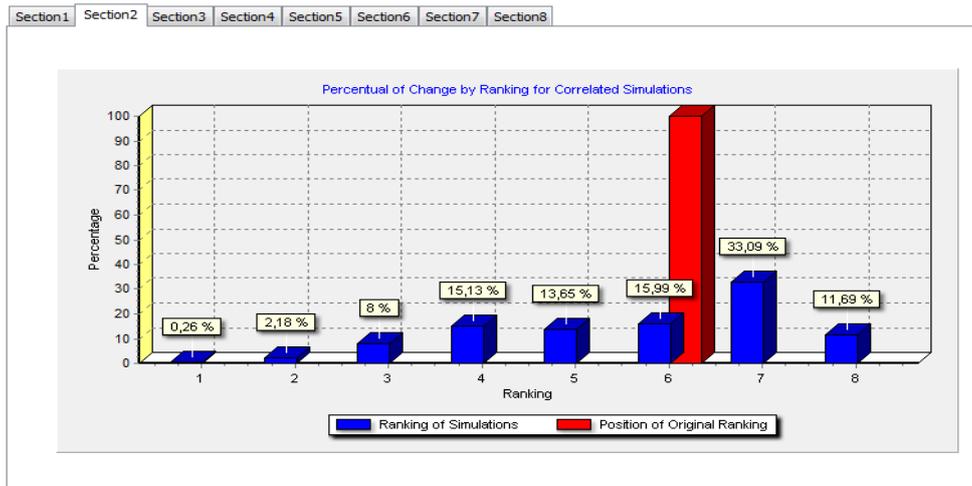


Figura 4.39 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5

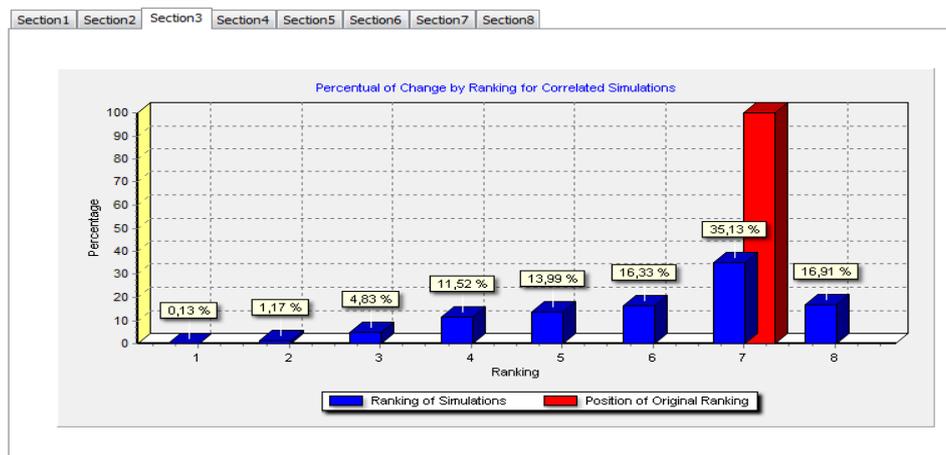
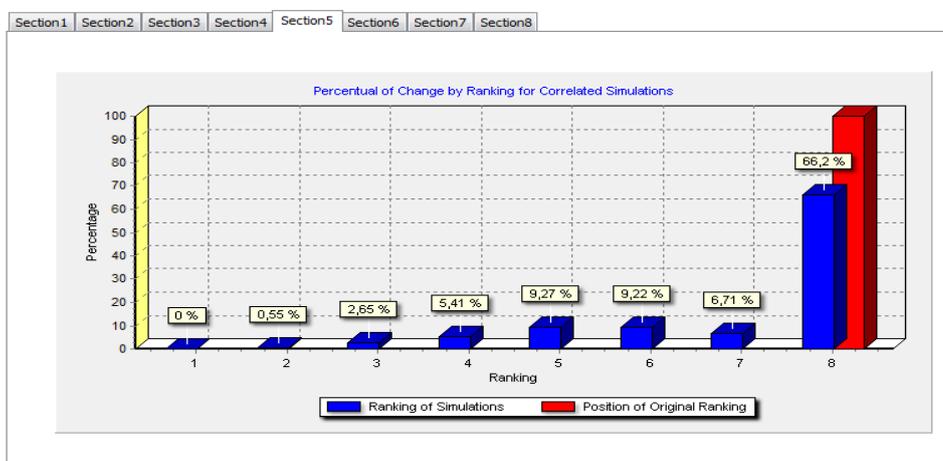


Figura 4.40 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 para variação de 5% da distribuição triangular do Pattern 5



O *Pattern 6* variou de maneira diferenciada os parâmetros a fim de identificar uma influência na saída proveniente das dimensões de risco.

Neste estudo foi seguida a estrutura de preferências do decisor de maneira que o maior Intervalo fosse referente a dimensão mais preferível, o 2º maior Intervalo correspondesse a segunda dimensão mais preferível, o 3º Intervalo a dimensão de menor preferência e o menor Intervalo aos parâmetros comuns as três dimensões.

Esta configuração indicou baixa influência na saída visto que um valor alto de τ médio foi obtido (0,6399) com baixo desvio padrão quando comparado com os outros *Patterns* (0,1780) com grau de confiança de 95%. Isso indica que poucas permutações entre as seções foram observadas, como mostrado na Figura 4.41, onde não houve alteração de posição da seção 1 para nenhuma das interações. Para as seções que apresentaram permutas, foram predominantemente entre as posições mais próximas as suas originais como observado nas seções 4, 7 e 6 (Figura 4.42, Figura 4.43 e Figura 4.45).

A Seção 6 apresentou amplitude mais significativa em comparação com as seções mencionadas, passando da posição 5 para ocupar a ordenação de 3 a 6 (Figura 4.44).

Já as seções 2, 3 e 5 tendem a permanecer nas últimas posições (Figura 4.46, Figura 4.47 e Figura 4.48).

Figura 4.41 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 1 da distribuição triangular do *Pattern 6*

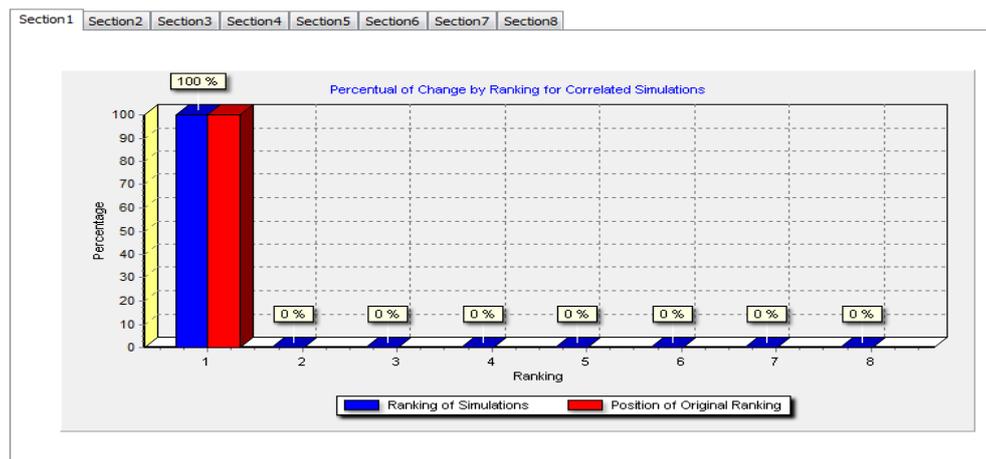


Figura 4.42 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 4 da distribuição triangular do Pattern 6

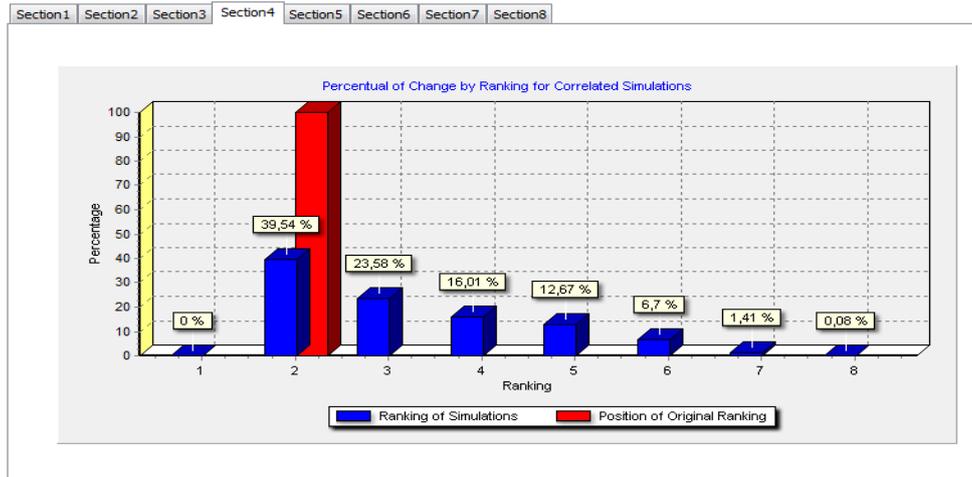


Figura 4.43 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 7 da distribuição triangular do Pattern 6

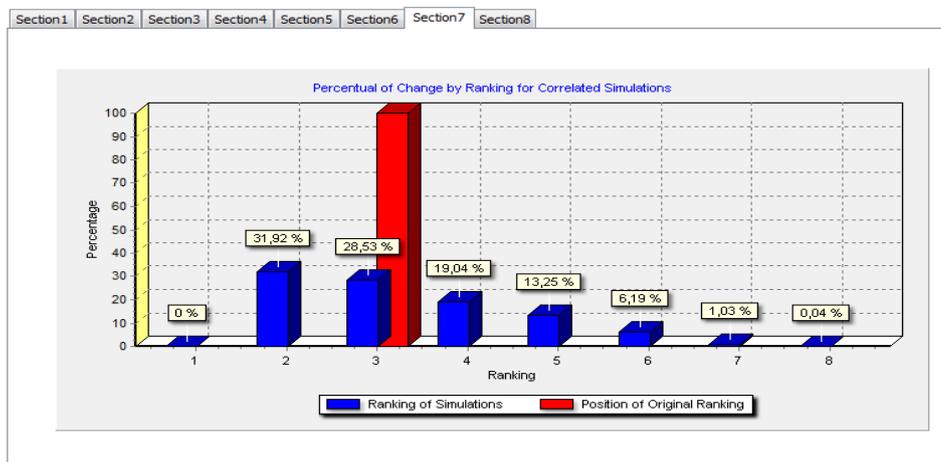


Figura 4.44 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 8 da distribuição triangular do Pattern 6

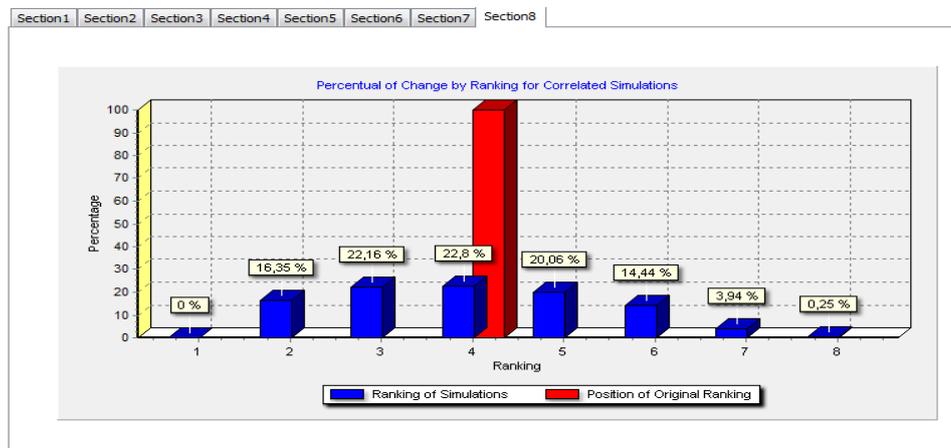


Figura 4.45 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 6 da distribuição triangular do Pattern 6

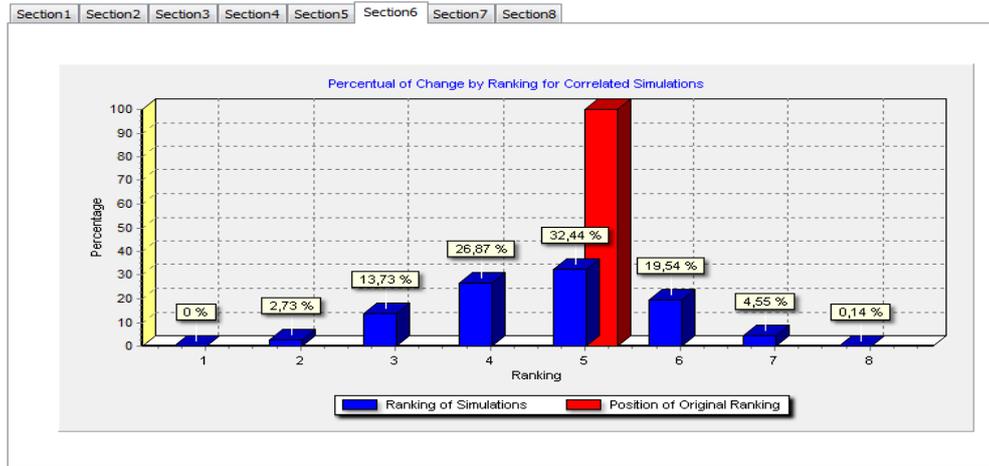


Figura 4.46 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 2 da distribuição triangular do Pattern 6

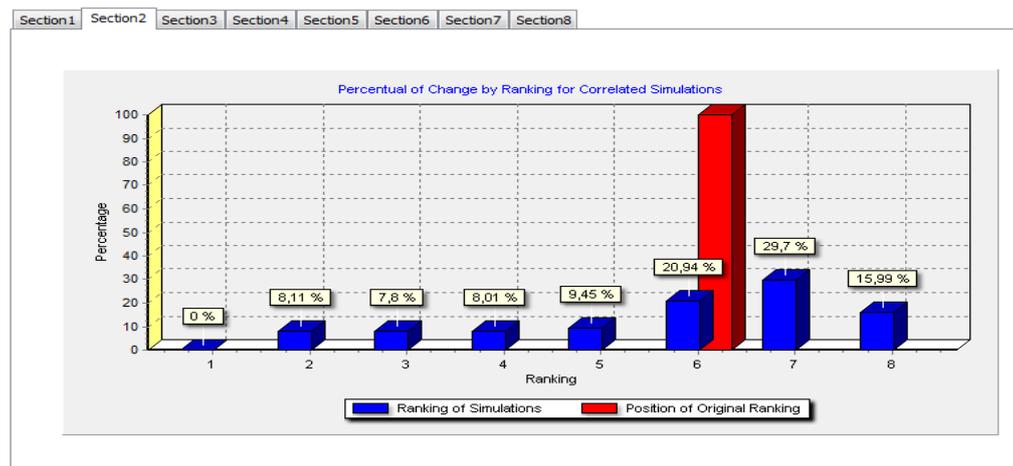


Figura 4.47 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 3 da distribuição triangular do Pattern 6

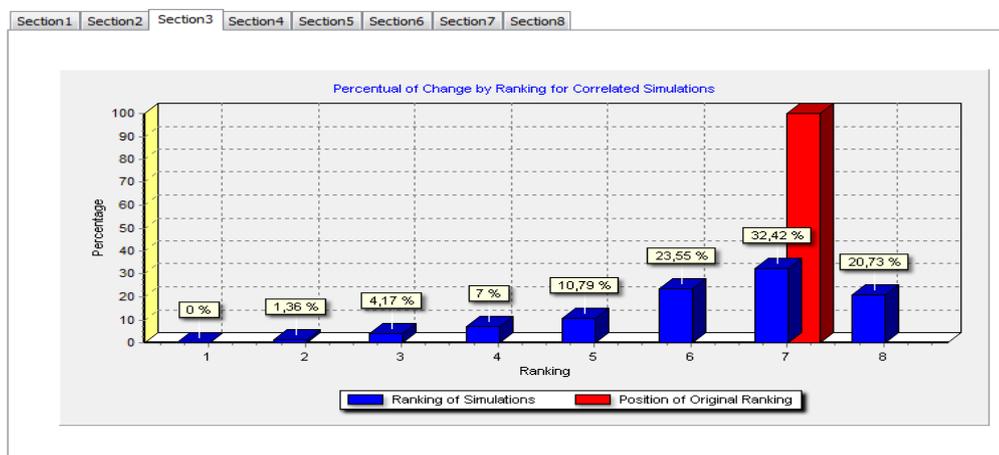
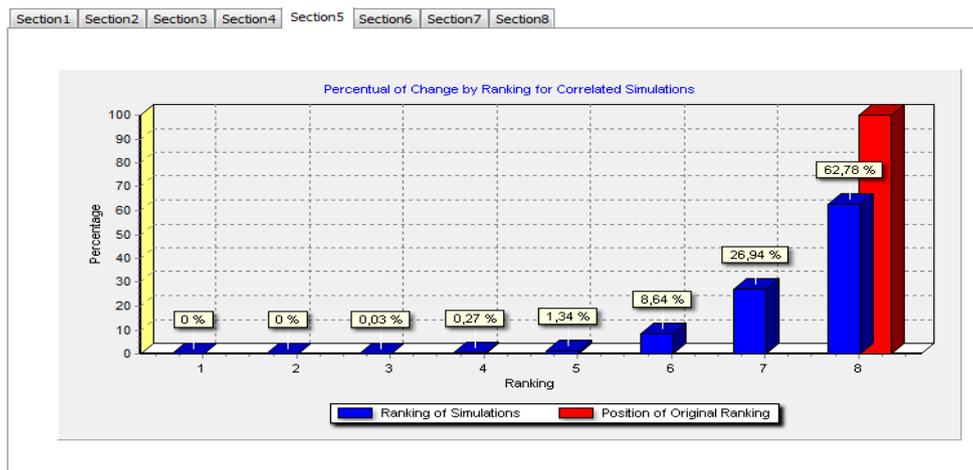


Figura 4.48 - Análise de sensibilidade da Ordenação da Seção 5 da distribuição triangular do Pattern 6



5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Neste trabalho foram avaliados diversos cenários de ocorrência de falhas de gasodutos, podendo quantificar para cada seção, o risco a ele relacionado. Foi visto que o modelo depende de muitos parâmetros de entrada, sendo difícil obtê-los com precisão devido a falta de dados históricos. Além disso, diversos parâmetros dependem do conhecimento a priori de especialistas e estes requerem relevante cuidado em sua determinação.

Apesar de raros, os acidentes em gasodutos são responsáveis pela morte ou ferimento de muitas pessoas, bem como perda de parte de vegetação e principalmente de perdas financeiras. Diante disso, o modelo analisado mostrou-se eficaz para análise de risco podendo sugerir ao decisor uma priorização de recursos, tais como investimento em melhorias, manutenção, inspeção periódica, entre outros benefícios. Uma vez que o modelo matemático é capaz de propor o ordenamento das alternativas, a escala utilizada de avaliação permite também avaliar quanto mais se ganha ao passar de uma alternativa para outra (escala intervalar).

A análise de sensibilidade contribui neste contexto para identificar os parâmetros mais sensíveis do modelo, fazendo com que haja um maior cuidado na coleta destes dados, podendo fazer refinamentos sucessivos no modelo, melhorando cada vez mais a precisão de avaliação do risco. Por outro lado, parâmetros que podem assumir percentuais maiores de variação sem mudar significativamente o ranking das seções do gasoduto podem ser estimados sem tanta precisão, reduzindo assim esforços para a obtenção do modelo.

O Sistema de Apoio a Decisão Desenvolvido permitiu calcular o risco associado a cada seção e priorizá-las, além de permitir um número elevado de simulações com base nos dados originais. Possibilitou também a armazenagem de dados, além de disponibilizar informação e consequentemente uma recomendação adequada ao decisor.

A avaliação conjunta dos parâmetros permite obter, para um determinado grau de confiança, a variação da seção ao longo do ranking, sendo possível também mostrar ao decisor as variações de posição das seções e assim, sugerir a priorização de um conjunto de seções, pois pode ser identificada que determinada seção esteja em uma posição acima ou abaixo do seu ranking original, interferindo na priorização das seções e consequentemente dos recursos a ele alocados.

A distribuição triangular foi utilizada de maneira satisfatória na geração de números aleatórios, permitindo a análise dos dados, visto que não são conhecidos o comportamento

original dos parâmetros de entrada. Quando comparada com a distribuição uniforme, foi verificado que a distribuição triangular produziu maior desordenamento nos resultados e permitiu portanto, analisar de maneira mais conservadora os resultados obtidos.

As variações das constantes de escala para um Intervalo de 20% não mudou significativamente o resultado, apresentando valores de τ muito próximos a 1 e baixo desvio padrão para todos os critérios.

A variação conjunta dos parâmetros se mostrou robusta ao grau de confiança de 90% para o Intervalo de 5%, sendo que as variações de 10% e 15% se mostraram sensíveis, reduzindo o grau de confiança da correlação. Mostrou-se também que variações de 20% nos dados de entrada acarretam na não correlação das simulações com base no valor médio de τ . Esta análise foi importante pois o analista irá indicar a solução ao decisor de maneira que se os dados forem variados (para esta análise) em até 5%, não haverá mudanças significativas na ordenação.

Não foi comprovada influência da variação das constantes de escala e dos parâmetros do gás simultaneamente, obtendo o mesmo grau de significância de rejeição da hipótese nula para as três dimensões.

Os parâmetros relacionados ao cálculo do raio máximo de perigo e do fluxo de calor apresentaram robustez na alteração de até 15% de variação ao grau de confiança mínimo de 90%.

Com relação ao Intervalo diferenciado, não se pode afirmar que outras configurações obterão grau de confiança tão elevado quanto o obtido no *Pattern 7*. Para tanto, outras variações devem ser analisadas.

A variação dos parâmetros por seção e cenário apresentaram maior influência na mudança de ordem das seções do que a variação dos parâmetros por seção, indicando que as probabilidades de ocorrência e os demais parâmetros relacionados aos cenários acidentais devem ser estimados e/ou coletados com mais precisão, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos.

A partir destas análises decorrentes da Simulação Monte Carlo é possível indicar ao decisor as seções que devem ser priorizadas em relação ao risco, ao passo que há incertezas relacionadas a coleta de dados e estimação das probabilidades de ocorrência, indicando para cada conjunto de variações, o grau de correlação para os resultados obtidos.

Por fim, ressalta-se que as análises descritas correspondem ao problema estudado, não podendo portanto generalizar os resultados obtidos para outros problemas, pois depende da característica particular de cada planta industrial ou de transporte. No entanto, os *Patterns*

analisados podem ser replicados a outros problemas como uma metodologia inicial na busca de identificar a precisão da recomendação dada ao decisor. Em acréscimo, pode-se julgar necessário a inclusão e/ou exclusão de *Patterns* a serem analisados, conforme verificação de prioridade versus tempo para recomendação de ordenação das seções em riscos multidimensionais para gasodutos de gás natural.

5.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros sugere-se estudar distribuições de probabilidade dos parâmetros de entrada e não apenas distribuição triangular e uniforme, no entanto, este trabalho deve ser minucioso visto que não há base de dados nacionais significativas para avaliação. Além disso, quando este modelo é aplicado, características intrínsecas a companhia de gás (da planta de produção e transporte) devem ser consideradas.

Para o SAD, recomenda-se incluir opção de entrada manual dos dados e elicitação das probabilidades de ocorrência dos cenários mediante diferentes distribuições de probabilidade.

Para avaliação das constantes de escala sugere-se fazer análise de diferentes percentuais de maneira aleatória dentro de distribuições teóricas de probabilidade pré-definidas.

Visto que este trabalho contribui favoravelmente para o entendimento comportamental das variáveis de entrada do modelo, avaliação similar poderá ser realizada para o modelo de análise de risco para transporte de hidrogênio proposto por Alencar & Almeida (2010). Para tal análise um novo sistema de apoio a decisão deve ser desenvolvido, considerando as particularidades do gás, no entanto a análise preliminar de sensibilidade pode ser replicada inicialmente.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, M. H., ALMEIDA AT. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010;35:3610e9.
- ALMEIDA, A.T. de; (2013) Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério, 1a Edição. São Paulo: Editora Atlas.
- ALMEIDA, A. T.; SOUZA, F. C. M. org. Gestão da manutenção na direção da Competitividade. Recife, Editora Universitária, 2001.
- ALMEIDA, A. T. DE; RAMOS, F.S., org. (2002) Gestão da Informação na competitividade das organizações. Editora Universitária UFPE, 2 ed.,
- ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C.A.V.; FERREIRA, R.J.P.; ALMEIDA FILHO, A.T.; ALENCAR, M.H.; GARCEZ, T.V. (2015) Risk, Reliability, and Maintenance Decision Analysis Using Multicriteria and Multiobjective Models. *International Series in Operations Research & Management Science*. New York: Springer, 2015.
- ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. M.COSTA, A. P. C. S., ALENCAR, L. H., DAHER, S. F. D. (2012) Decisão em Grupo e Negociação: Métodos e Aplicações. Editora Atlas.
- ALVAREZ-GUERRA, M (2010). Prioritization of sediment management alternatives using stochastic multicriteria acceptability analysis. *Science of the total environment* [0048-9697] vol:408 iss:20 pg:4354 -4367.
- ALZBUTAS, R.; IEŠMANTAS, T.; POVILAITIS, M.; VITKUTĖ, J. (2014). Risk and uncertainty analysis of gas pipeline failure and gas combustion consequence Fonte: *Stochastic environmental research and risk assessment* [1436-3240] vol:28 iss:6 pg:1431 -1446
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim Mensal do gás Natural. Numero 30, 45 p. junho 2011. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=59925&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1392328590459>. Acesso em: 13/09/2014.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=68644>. Acesso em 13/09/2014.
- Aven, T.; Zio, H. (2014) Foundational Issues in Risk Assessment and Risk Management. *Risk analysis* [0272-4332] vol:34 iss:7 pg:1164 -1172
- BEN. Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012/ Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 55 p. 2013. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf. Acesso em 13/09/2014.

- BONVICINI, S.; LEONELLI, P.; SPADONI, G. (1998). Risk analysis of hazardous materials transportation: evaluating uncertainty by means of fuzzy logic . *Journal of hazardous materials* [0304-3894 vol:62 iss:1 pg:59 -74.
- BRITO, A. J.; ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipeline. *Reliab Eng System Safety*, v.94, p.187-198, 2009.
- Brito AJ, Almeida AT, Mota CMM. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating utility theory. *European Journal of Operation Research*, 2010;200:812e21.
- BROWN, S.; BECK, J.; MAHGEREFTEH, H.; FRAGA, E. S. (2013). Global sensitivity analysis of the impact of impurities on CO₂ pipeline failure
Fonte: *Reliability engineering & systems safety* [0951-8320] vol:115 pg:43 -54
- CHAN, K. P. S.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S. (1999). A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output
Fonte: *Technometrics* [0040-1706] vol:41 iss:1 pg:39 -56
- DAHER, S. F. D.; ALMEIDA, A. T. The use of ranking veto concept to mitigate the compensatory effects of additive aggregation in group decisions on a water utility automation investment. *Group Decision and Negotiation*, v. 21, n. 2, p. 185-204, 2012.
- DAVIS, C. B. & OLSON M. H. *Management Informations Systems: Conceptual Foundations, Sturcture and Development*, McGraw-Hill, 1985.
- DEVORE, J. L. *Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências*. Ed. Thomson, 2006.
- FISHMAN, G. S. *Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications*. Springer, 1995.
- FLAGE, R; AVEN, T; ZIO, H.; BARALD, P. (2014). Concerns, Challenges, and Directions of Development for the Issue of Representing Uncertainty in Risk Assessment . *Risk analysis* [0272-4332] vol:34 iss:7 pg:1196 -1207.
- FRANK, MV. (1995). Choosing Among Safety Improvement Strategies - A Discussion With Example Of Risk Assessment And Multicriteria Decision Approaches For Nasa. *Reliability engineering & systems safety* [0951-8320] vol:49 iss:3 pg:311 -324.
- FREITAS FILHO, Paulo José de. *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena*. 2. ed. Florianópolis: Visual Books Ltda., 2008.
- GARCEZ, T. V.; ALENCAR, M. H.; SILVA, B. F. A; LINS, P. H. C. L; ALMEIDA, A. T. A. Estimação Da Taxa De Vazamento Acidental Em Gasodutos De Gás Natural Através Da Elicitação Do Conhecimento A Priori De Especialistas. *Anais do XXX ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, São Carlos, 2010.
- GHARABAGH, M. J.; ASILIAN, H; MORTASAVI, S. B.; MOGADDAM, A. Z.; HAJIZADEH, E.; KHAVANIN, A. (2009). Comprehensive risk assessment and management of petrochemical feed and product transportation pipelines
Fonte: *Journal of loss prevention in the process industries* [0950-4230] Gharabagh, MJ yr:2009 vol:22 iss:4 pg:533 -539

- GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A.T. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2009, 3a Edição.
- Helton, J.C., Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal. *Reliability Engineering and System Safety*, 42 (1993) 327-367.
- HERVA, M (2013). Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of cleaner production* [0959-6526] vol:39 pg:355 -371.
- Homma, T., Saltelli, A. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering and System Safety* 52 (1996) 1 17.
- JAIN, R., *The Art of Computer Systems Performance Analysis – Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*, Wiley, 1991.
- JO, Y. D.; AHN, B. J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.15, p179-186, 2002.
- JO, Y.D.; CROWL, D. A. Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, V 21, Issue 6, November 2008, Pages 589-595, ISSN 0950-4230, DOI: 10.1016/j.jlp.2008.04.006.
- KEENEY, R. L; RAIFFA, H. *Decision with multiples objectives: preferences and tradeoffs*. New York: Wiley; 1976.
- KHAN, F. I .; HADDARA, M. R. (2004).Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities. *Journal of hazardous materials* [0304-3894] vol:108 iss:3 pg:147 -159
- KOORNNEEF, J; SPRUIJT, M; MOLAG, M.; RAMÍREZ, A; TURKENBURG, W.; FAALJ, A. (2010).Quantitative risk assessment of CO2 transport by pipelines-A review of uncertainties and their impacts .*Journal of hazardous materials* [0304-3894] vol:177 iss:1-3 pg:12 -27.
- Krym, E. M.; ALNECAR, M. H.;ALMEIDA, A. T. Aplicação de modelagem multicritério para análise de riscos multidimensionais em gasodutos de gás natural. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, Rio de Janeiro , 2012.
- KUCHERENKO, S., RODRIGUEZ-FERNADEZ , M., PANTELIDES, C., SHAH, N., Monte Carlo evaluation of derivative-based global sensitivity measures. *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 1135-1148.
- LAUDON, Kenneth C.; LAUDON, Jane Price. *Sistemas de informação gerenciais*. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- L'ECUYER, P. Uniform Random Number Generation, *Annals of Operations Research*, v. 53, p. 77-120, 1994.
- L'ECUYER, P. Random Numbers, *Int. Encyc. Social and Behavioral Sciences*, p. 1-9, 2001.
- LINS, P. H., ALMEIDA, A. T (2012). Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 pp. I3545-I3554.

- MAZZOLA, A (1999) Thermal interaction analysis in pipeline systems - A case study. Journal of loss prevention in the process industries [0950-4230] vol:12 iss:6 pg:495 -505.
- MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G, C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. Riode Janeiro: LTC 2009, 4ª edição.
- O'BRIEN, James A. Sistemas de informação e as decisões gerenciais na era da internet. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2010
- PETROBRAS, Relatório de Sustentabilidade, 2012. 192 p. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/sociedade-e-meio-ambiente/relatorio-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 10/09/2014.
- REGOS, G (2013). Comparison of power plants' risks with multi criteria decision models Central. European journal of operations research [1435-246X] vol:21 iss:4 pg:845 -865.
- REZENDE, D. A; ABREU, A. F. Tecnologia da informação aplicada a sistemas de informações empresariais: o papel estratégico da informação e dos sistemas de informação nas empresas .9. ed., rev. e ampl. São Paulo: Atlas, 2013
- Saltelli, A., S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto (2004). Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models. John Wiley and Sons.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. Tarantola, S. Global Sensitivity Analysis. Wiley, 2008.
- SANTOSH, A.; VINO, G.; SHRIVASTAVA, O. P.; SARAF, R. K.; GHOSH, A. K.; KUSHWAHA, H. S. (2006) Reliability analysis of pipelines carrying H₂S for risk based inspection of heavy water plants. Reliability engineering & systems safety [0951-8320] vol:91 iss:2 pg:163 -170
- SIEGEL, S. Estatística não paramétrica (para ciências do comportamento). Ed. McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1977.
- Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. Mathematics and computers in simulation [0378-4754] vol:55 iss:1-3 pg:271 -280
- Sobol, I. M.; Kucherenko, S. A new derivative based importance criterion for groups of variables and its link with the global sensitivity indices. Computer Physics Communications 181 (2010) 1212-1217.
- Sobol, I. M.; Levitan, Yu. L. On the use of variance reducing multipliers in Monte Carlo computations of a global sensitivity index. Computer Physics Communications 117 (1999) 52-61.
- SRA. Society of Risk Analysis. Risk Analysis Glossary. Disponível em: <http://sra.org/sites/default/files/docs/SRA_Glossary.pdf>. Acessado em 06/10/2014.
- TERVONEN, T (2009) A stochastic method for robustness analysis in sorting problems. European journal of operational research [0377-2217], vol:192 iss:1 pg:236 -242.

THOMOPOULOS, N. T. Essentials of Monte Carlo Simulation: Statistical Methods for Building Simulation Models. Springer, 2013.

TSAO, C. K.; PERRY, W. W. Modifications to the vulnerability model: A simulation system for assessing damages resulting from marine spills. ADA 075 231. US Coast Guard NTIS Report No. CG-D-38-79, 1979.

ANEXO 1

Este Anexo apresenta os Parâmetros necessários para Estimação das Funções Consequências do problema de avaliação de risco em gasoduto de Gás Natural descrito em Krym et al (2012).

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

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

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

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

Tabela AI. 3-Parâmetros que varim por Seção e Cenário para modo de falha Furo

Seção	I (J/m ² .s)	Ω	R(m ³ /s)	a _i
S1	3306,687583	669603915	1,35	0,00363
S2	4017,915324	19255616124	1,24	0,00363
S3	4620,806364	927799586,3	1,17	0,00363
S4	4845,85947	347895844,5	1,03	0,00363
S5	5030,943143	163506349,9	0,94	0,00363
S6	5150,398979	115645653,8	0,87	0,00363
S7	5162,656335	98056107,22	0,8	0,00363
S8	5225,818796	77290563,69	0,72	0,00363

Tabela AI. 4 - Parâmetros que varim por Seção e Cenário para modo de falha Ruptura

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

Tabela AI. 5 - Valores de $\lambda_{\theta_{jk},a_i}$ (m²/J) para modo de falha Furo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tabela A1. 11 -Parâmetros relacionados às seções do gasoduto

Seção	L_i (m)	d (m)	Q (m ³ /s)	v (\$/m ³ /s)	w_{a_i} (\$/s)	P_0 (kgf/cm ³)	L_0 (m)	P_w (N/m ²)	RH (%)
S1	2900	0,2032	2,44	1,2	7	35	2400	3086	65
S2	3500	0,2032	2,26	1,3	13	35	4700	3086	65
S3	4000	0,2032	2,16	0,78	22	35	9200	3086	65
S4	3300	0,2032	1,9	1	14	35	12500	3086	65
S5	2900	0,2032	1,37	1,25	7,5	35	16750	3086	65
S6	3500	0,2032	0,98	0,9	2	35	20800	3086	65
S7	1900	0,2032	0,85	1,15	4	35	21300	3086	65
S8	4680	0,2032	0,8	1,3	8	35	24200	3086	65

Tabela A1. 12 -Parâmetros relacionados aos danos no gasoduto

Seção	Veg(%)	β (\$/J)	n_{a_i}	α_{a_i}	CDR (m)
S1	0,044	0,0014	15	0,03	54,6007
S2	0,04	0,0018	25	0,04	46,1558
S3	0,04	0,0014	10	0,06	39,0215
S4	0,04	0,0016	10	0,04	36,1429
S5	0,04	0,0016	20	0,045	33,5929
S6	0,07	0,0003	5	0,04	31,8225
S7	0,06	0,0016	10	0,04	31,6341
S8	0,04	0,0018	10	0,05	30,6406

ANEXO 2

Este Anexo apresenta as principais telas do Sistema de Apoio a Decisão Desenvolvido para este trabalho no CDSID (Centro de Desenvolvimento de Sistemas de Informação e Decisão).

Figura A2. 1 -Cálculo dos Riscos e Hierarquização em prioridade de risco

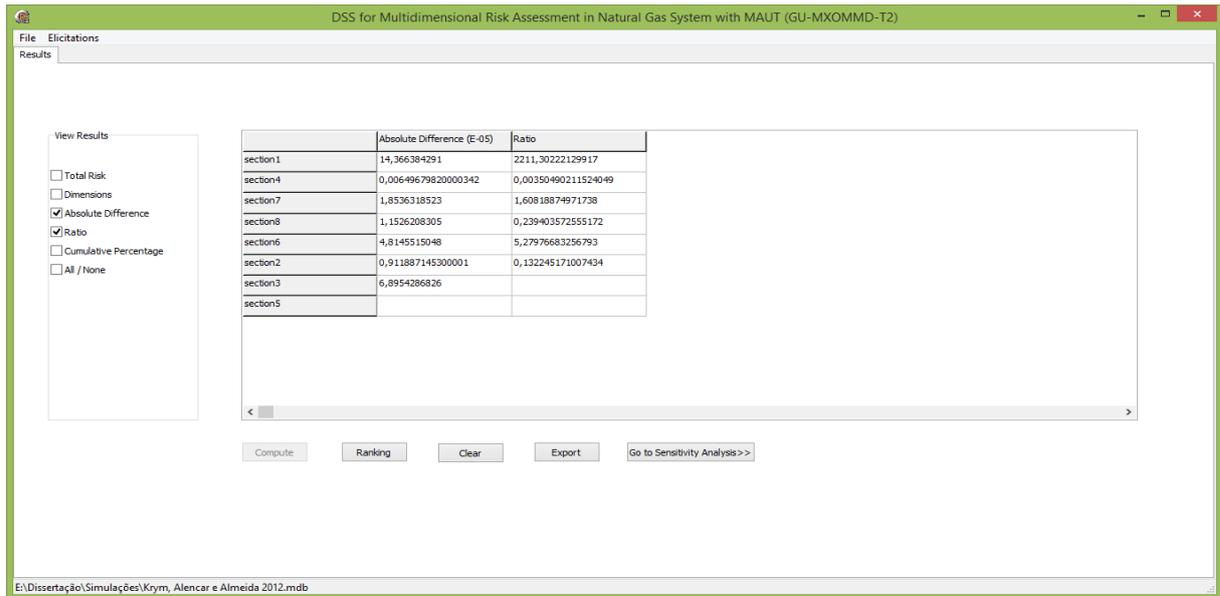


Figura A2. 2 -Configurações da Simulação Monte Carlo

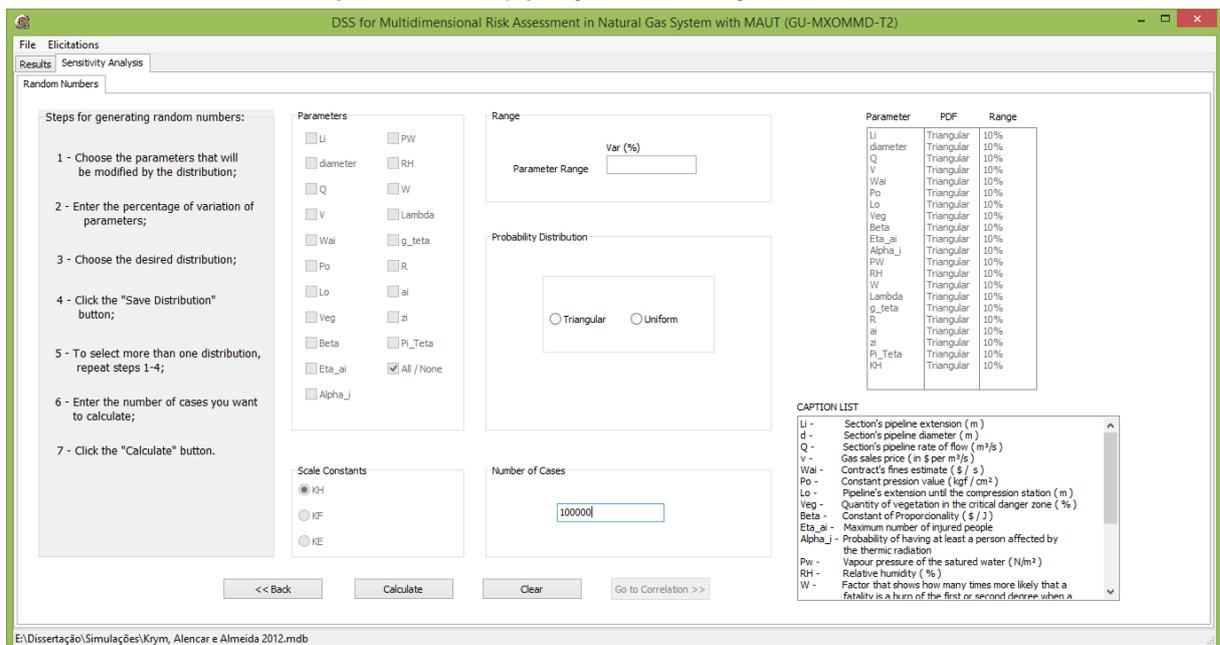


Figura A2. 3 -Análise da Correlação

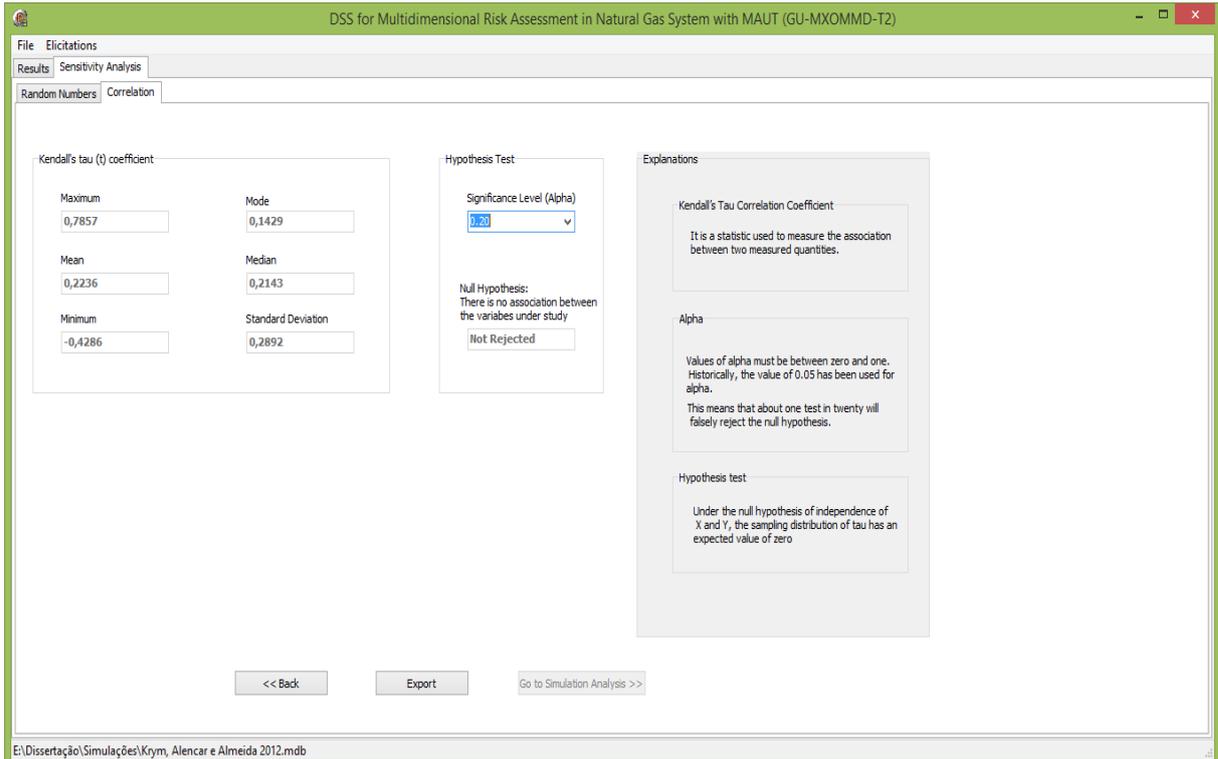


Figura A2. 4 -Análise da Ordenação

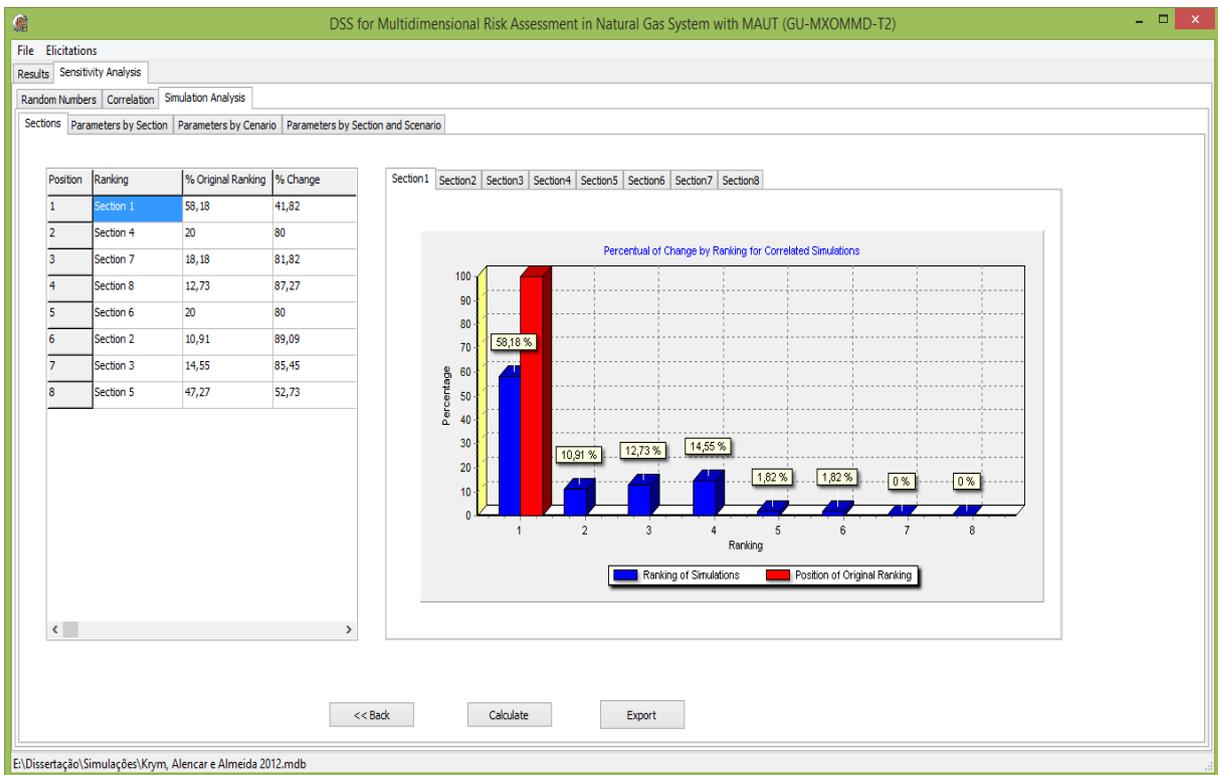


Figura A2. 5 -Análise dos Parâmetros que variam por seção

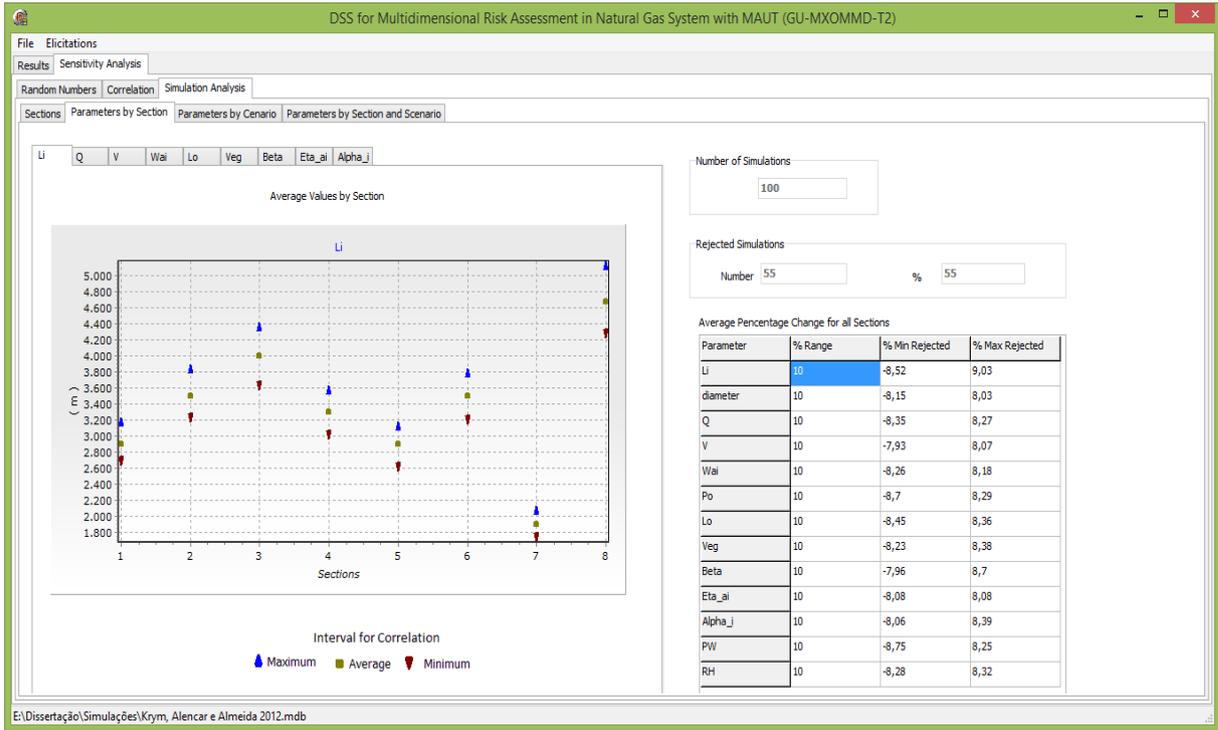


Figura A2. 6 -Análise dos parâmetros que variam por Cenário

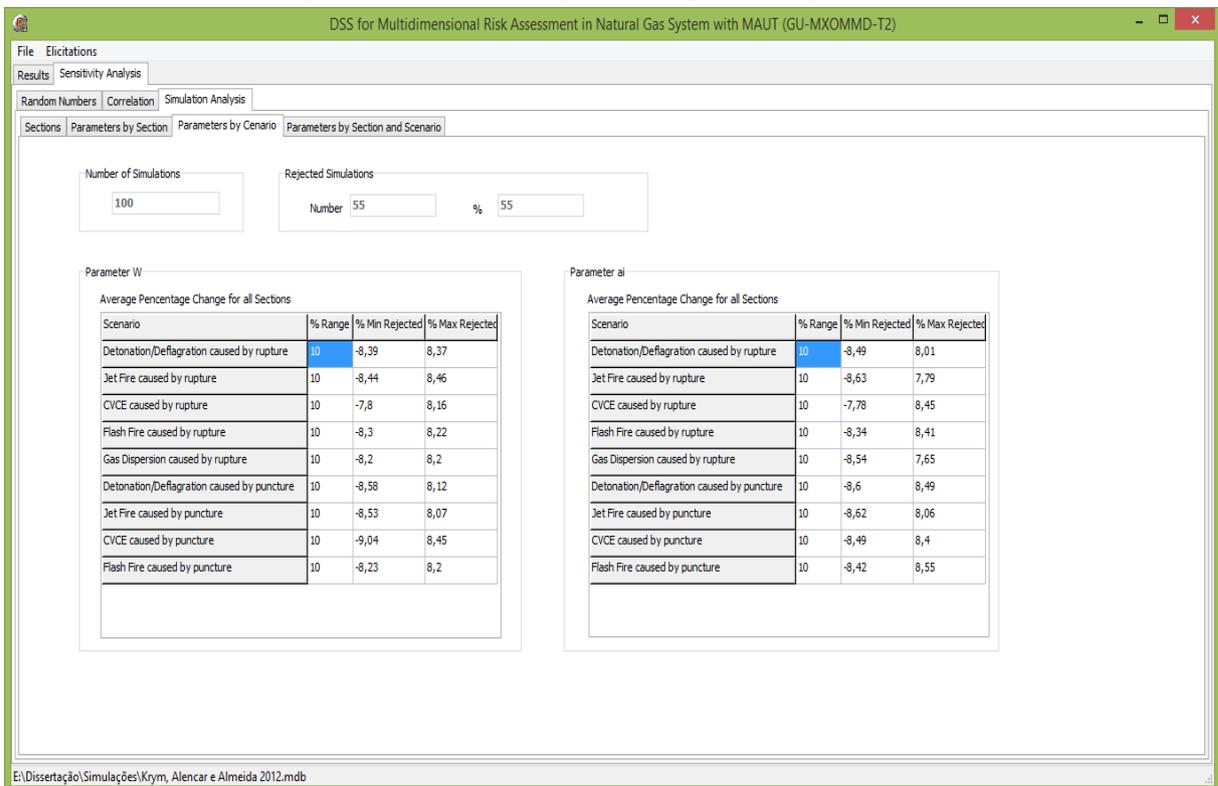


Figura A2. 7 - Análise dos Parâmetros que variam por seção e Cenário

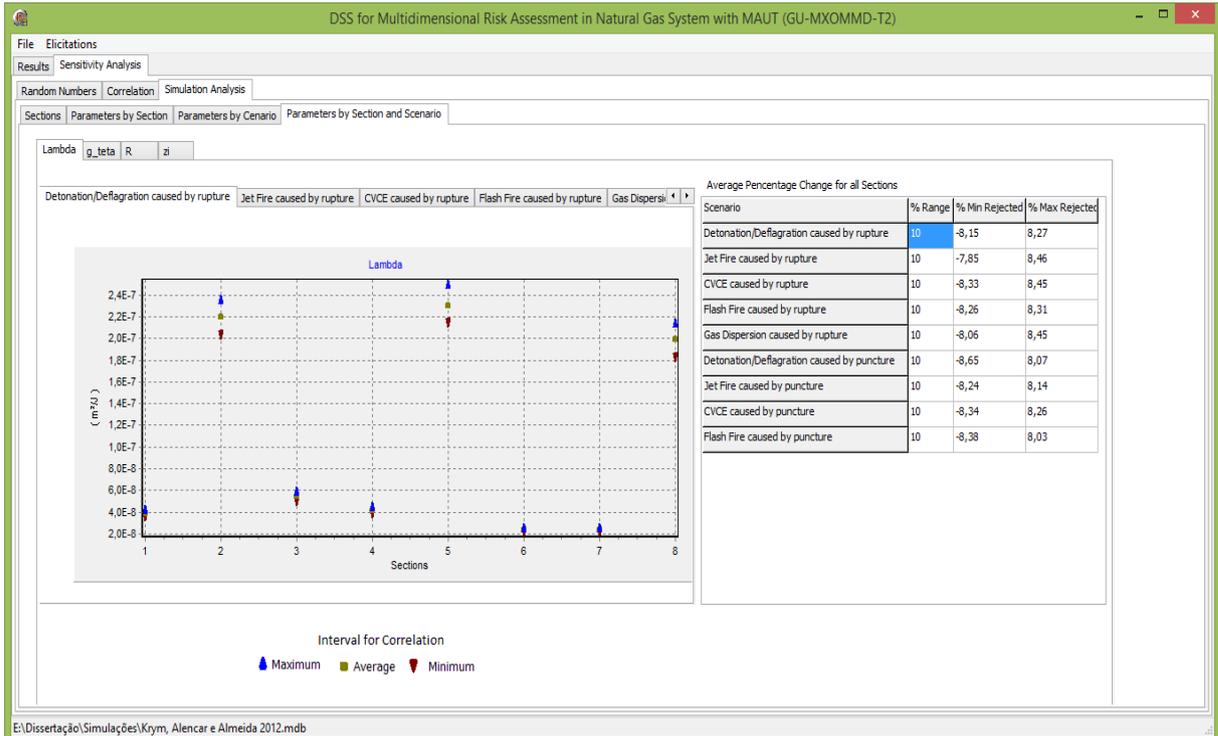


Figura A2. 8 -Elicitação da Utilidade Humana

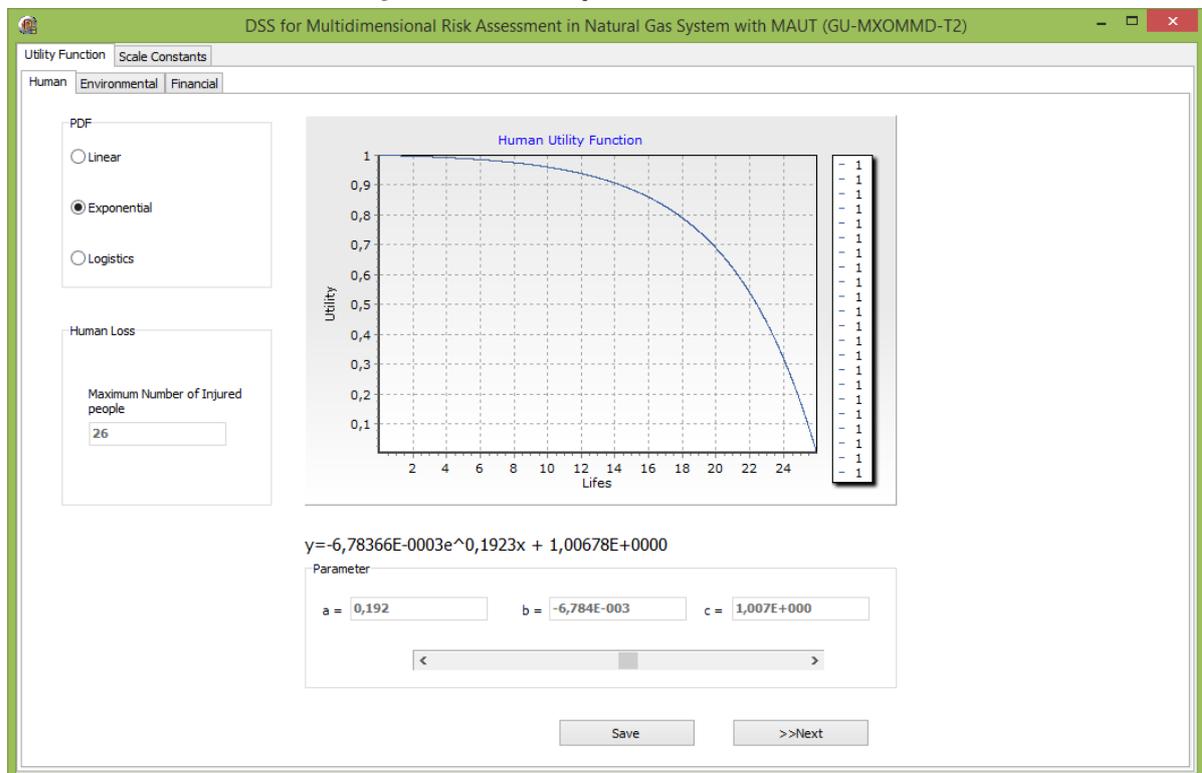


Figura A2. 9 - Elicitação das constantes de escala (parte 1)

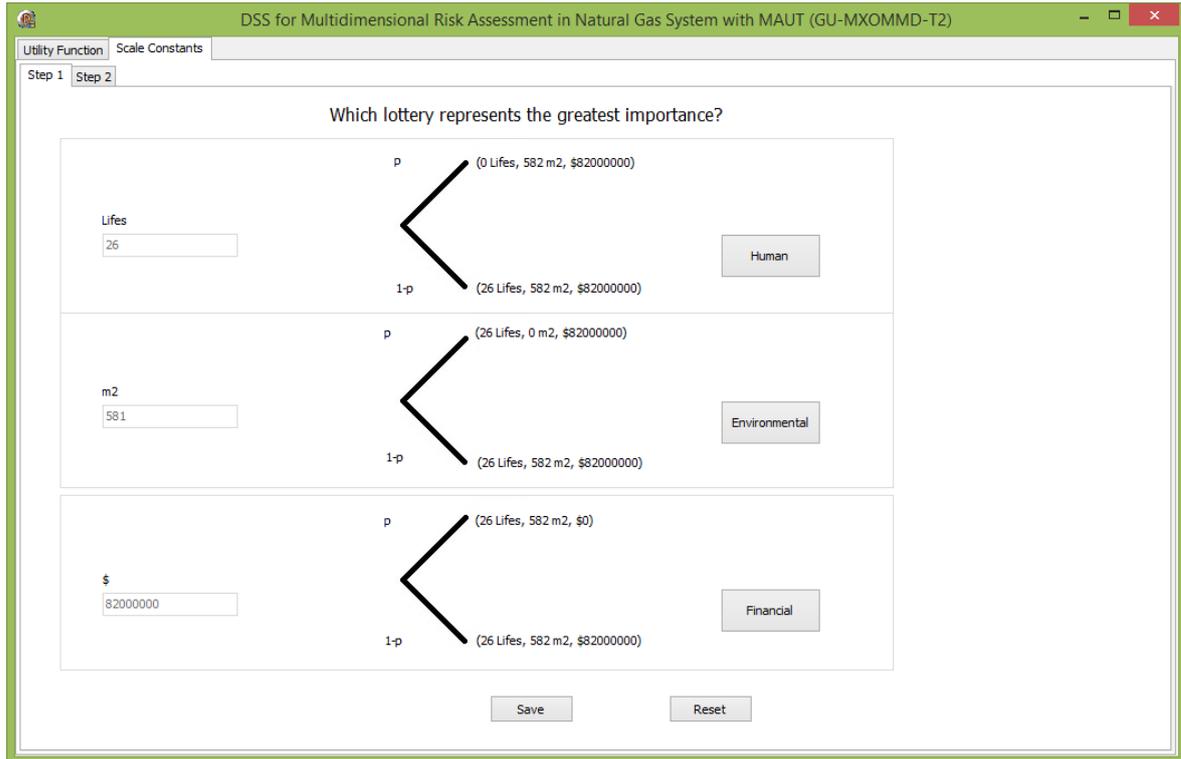


Figura A2. 10 - Elicitação das constantes de escala (parte 2)

