

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

**SISTEMA DE APOIO A DECISÃO MULTICRITÉRIO NO
GERENCIAMENTO DE RISCOS EM INSTALAÇÕES DE
GASODUTOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

YURI GAMA LOPES

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida, PhD

RECIFE, DEZEMBRO DE 2008

M864s Lopes, Yuri Gama

Sistema de apoio a decisão multicritério no gerenciamento de riscos em instalações de gasodutos / Yuri Gama Lopes. - Recife: O Autor, 2008.

viii, 98 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2008.

Inclui Referências bibliográficas e Anexos.

1. Engenharia de produção. 2. Sistema de apoio a decisão. 3. Decisão multicritério. 4. Análise de risco. I. Título.

658.5 CDD (22.ed.)

UFPE/BCTG/2009-032



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

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

YURI GAMA LOPES

**“SISTEMA DE APOIO A DECISÃO MULTICRITÉRIO NO GERENCIAMENTO DE
RISCOS EM INSTALAÇÕES DE GASODUTOS”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato YURI GAMA LOPES **APROVADO COM DISTINÇÃO**.

Recife, 19 de fevereiro de 2009.

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

Prof. RUI FRANCISCO MARTINS MARÇAL, Doutor (UTFPR)

AGRADECIMENTOS

Assim como escrevi na seção de Agradecimentos em meu projeto final do curso de graduação em Engenharia de Produção, devo agradecer, primeiramente, aos meus pais, pelo incansável empenho na educação e de seus filhos. Reafirmo que esse foi o alicerce para construção de minhas atividades acadêmicas, desde a graduação e, nesse momento, finalizando Mestrado Acadêmico em Engenharia de Produção. Em nome deles, agradeço todos meus familiares. Obrigado.

Antecipadamente, peço desculpas àqueles que não forem citados; são tantas pessoas que seria praticamente impossível deixar de cometer injustiças. Inúmeras pessoas estiveram ao meu lado, seja na área acadêmicas ou seja nas horas de lazer e descanso, diretamente ou indiretamente contribuindo nesta minha caminhada. Agradeço:

- Ao Prof. Adiel, por sua orientação neste trabalho e por todo convívio ao longo destes anos, sempre contribuindo para minha formação pessoal e profissional;
- À Profa. Ana Paula Cabral, por sua orientação durante a iniciação científica, por suas intervenções sempre pertinentes e pelo nosso ótimo convívio ao longo destes anos;
- Aos integrantes do GPSID, pelas amizades e experiências vividas, pelo ótimo convívio e pelo apoio nos momentos de dificuldade. Em especial, agradeço à Prof. Luciana Hazin, ao Prof. Adiel Filho, ao Prof. Rodrigo Ferreira e ao Prof. Cristiano Cavalcante;
- Aos demais professores e funcionários do DEP e da UFPE, que me ajudaram durante essa caminhada;
- A Lúcio, Thalles, Catarina, Marcelo, Isis, Augusto e demais alunos do PPGEP/UFPE pelo ótimo convívio e aprendizado constante;
- A TODOS amigos e amigas, que estiveram ao meu lado durante esse período, contribuindo de todas as formas. Especialmente a Lúcio e Gugu, por sua ajuda nas questões burocráticas de entrega da dissertação.

RESUMO

Este trabalho tem como foco a proposta, descrição e desenho de um sistema de apoio a decisão para análise de risco em gasodutos, riscos estes caracterizados pelo caráter probabilístico da ocorrência de cenários acidentais e os diferentes tipos de consequências resultantes destes. O trabalho discute criticamente as etapas do modelo de decisão abordado, assim como os procedimentos de aplicação do modelo. Com base nessa discussão é feita a proposta do SAD, tomando por base aquilo que envolve o processo de desenho e desenvolvimento do sistema, alimentados pela discussão prévia acerca do modelo. São estabelecidos os respectivos módulos do sistema e descritos os aspectos que envolvem o desenho e construção destes módulos do SAD. O objetivo do sistema proposto, então, é apoiar o processo decisório relacionado à análise de riscos em gasodutos, sendo considerados aspectos técnicos como a natureza estocástica do tema e a variedade das consequências envolvidas, assim como fatores relacionados ao processo de tomada de decisão na análise de risco, tais como a avaliação dos *tradeoffs* ligados à natureza multidimensional das situações contemporâneas de riscos e a inclusão dos *stakeholders* envolvidos.

Palavras-chave: sistemas de apoio a decisão, decisão multicritério, análise de risco

ABSTRACT

This work focuses on the proposal, description and design of a Decision Support System (DSS) for risk analysis in pipeline installations, risks which are characterized by the probabilistic nature of the occurrence of accidental scenarios and different types of consequences resulting from them. The work critically discusses the stages of the decision model adopted and the procedures for applying the model. The proposed DSS is based on what the process involves the design and development of the system, fed by the previous discussion about the model. The modules of the system are established and the issues involving the design and construction of these modules are described. The objective of the proposed system, then, is to support decision making related to risk analysis in pipelines, regarding the technical aspects stochastic nature of the subject and the variety of consequences involved, as well as factors related to decision-making in risk analysis, such as the evaluation of tradeoffs related to the multidimensional nature of contemporary situations of risk and the inclusion of involved stakeholders.

Key words: decision support systems, multicriteria decision, risk analysis

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
SUMÁRIO	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	5
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	5
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO	8
2.2 MÉTODOS DE APOIO MULTICRITÉRIO A DECISÃO.....	11
2.3 TEORIA DA UTILIDADE MULTIATRIBUTO.....	14
2.3.1 <i>Teoria da Utilidade</i>	15
2.3.2 <i>Risco de Bayes</i>	17
2.3.3 <i>Teoria da Utilidade Multiatributo</i>	18
2.3.3.1 Independência em utilidade	19
2.3.3.2 Independência aditiva	19
2.4 MODELOS PROBABILÍSTICOS DE ELICITAÇÃO DE CONHECIMENTO A <i>PRIORI</i>	20
2.4.1 <i>Método dos intervalos equiprováveis de probabilidade</i>	21
2.4.2 <i>Método de Martz e Waller para seleção de distribuição Gamma a priori</i>	22
2.5 ANÁLISE DE RISCO	24
3 MODELO DE DECISÃO	27
3.1 OUTRAS OPORTUNIDADES DE APLICAÇÃO E ADAPTAÇÃO DO MODELO.....	27
3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO.....	29
3.2.1 <i>Identificação do decisor</i>	30
3.2.2 <i>Divisão do gasoduto em trechos</i>	32
3.2.3 <i>Identificação de cenários de perigo</i>	32
3.2.4 <i>Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais</i>	33
3.2.5 <i>Análise de exposição dos objetos de impacto</i>	34

3.2.6	<i>Estimação do conjunto de payoffs (H,M,N)</i>	34
3.2.7	<i>Elicitação da função utilidade multiatributo.....</i>	36
3.2.8	<i>Cálculo das probabilidades das conseqüências $p(h, m, n \theta, a_i)$</i>	36
3.2.9	<i>Estimação dos riscos $r(a_i)$.....</i>	37
3.2.10	<i>Ordenação dos trechos de gasodutos em medida de risco.....</i>	38
3.3	PROCEDIMENTO PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO.....	38
3.3.1	<i>Identificação de cenários de perigo</i>	39
3.3.2	<i>Divisão do gasoduto em trechos.....</i>	40
3.3.3	<i>Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais.....</i>	41
3.3.4	<i>Análise de exposição dos objetos de impacto.....</i>	42
3.3.5	<i>Estimação do conjunto de payoffs (H,M,N)</i>	43
3.3.6	<i>Elicitação da função utilidade multiatributo.....</i>	45
3.3.7	<i>Cálculo das probabilidades das conseqüências $p(h, m, n \theta, a_i)$</i>	48
3.3.8	<i>Estimação dos riscos $r(a_i)$.....</i>	49
3.3.9	<i>Ordenação dos trechos de gasodutos em medida de risco.....</i>	51
4	ESTRUTURA E DESENHO DO SISTEMA DE APOIO A DECISÃO - SAD.....	53
4.1	ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA UTILIZANDO ABORDAGEM ADAPTATIVA - EVOLUTIVA	53
4.1.1	<i>Módulo de cadastro das seções e cenários de perigo (θ, a_i).....</i>	57
4.1.2	<i>Módulo de cálculo numérico.....</i>	58
4.1.3	<i>Módulo de análise de conseqüências</i>	58
4.1.4	<i>Módulo de elicitación de conhecimento a priori.....</i>	59
4.1.5	<i>Módulo de elicitación da função utilidade</i>	60
4.1.6	<i>Módulo de estimación de riscos, determinación do ranking das seções e análise dos resultados</i>	60
4.1.7	<i>Relações entre os módulos</i>	61
4.2	DESENHO DA BASE DE DADOS.....	63
4.2.1	<i>Descrição dos dados do sistema.....</i>	67
4.2.1.1	<i>Dados característicos das seções.....</i>	67
4.2.1.2	<i>Dados característicos dos cenários acidentais.....</i>	68
4.2.1.3	<i>Dados característicos das seções e dos cenários acidentais.....</i>	69
4.2.1.4	<i>Dados característicos dos procedimentos de elicitación.....</i>	70
4.2.1.5	<i>Dados das Análises de Resultados</i>	70
4.3	DESENHO DA BASE DE MODELOS	71
4.4	DESCRIÇÃO DA COMPONENTE DIÁLOGO E INTERFACE.....	74
4.4.1	<i>Diálogo dos módulos de entrada de dados</i>	75
4.4.2	<i>Diálogo dos módulos de elicitación</i>	75
4.4.3	<i>Diálogo dos módulos de cálculo</i>	76
4.4.4	<i>Diálogo do módulo de estimación de riscos, ranking das seções e análise dos resultados</i>	

5	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
	ANEXO 1	88
	ANEXO 2	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Malha dutoviária brasileira (Fonte: ABEGAS, 2008).....	4
Figura 2.1 Arquitetura de SAD (Fonte: Adaptado de Bigdoli, 1989)	9
Figura 2.2 Representação da loteria	17
Figura 2.3 Exemplos de atributos para Análise de Risco	18
Figura 2.4 Independência em Utilidade.....	19
Figura 2.5 Loterias que representam a Independência Aditiva	20
Figura 3.1 Estrutura do modelo de decisão (Fonte: Brito & Almeida, 2009)	30
Figura 3.2 Cenários de perigo considerados no modelo (Fonte: Brito & Almeida, 2009).....	33
Figura 3.3 Proposta de adaptação do modelo (Fonte: o Autor).....	39
Figura 3.4 Hierarquia de Atributos.....	45
Figura 3.5 Decomposição da função utilidade multiatributo	47
Figura 4.1 Módulos do SAD e suas relações com as etapas do modelo.....	62
Figura 4.2 Relacionamento funcional dos módulos do sistema	63
Figura 4.3 Exemplo de flexibilidade da análise no SAD	66
Figura 4.4 Fluxo de dados entre o Módulo de cálculo numérico e demais módulos	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Balanço da demanda de abastecimento de gás no Nordeste do Brasil (milhares de m ³ /dia).....	3
Tabela 2.1 Sistema básico de preferências ao comparar duas ações/alternativas	14
Tabela 2.2 Categorias de perdas ligadas ao risco	24
Tabela 4.1 Dados característicos das seções e dos cenários acidentais.....	70

1 INTRODUÇÃO

Riscos são, por natureza, subjetivos, e conseqüentemente, complexos. O significado do termo *risco* é encontrado comumente em dicionários da língua portuguesa como uma possibilidade de perigo, incerto, mas previsível, que ameaça de dano a pessoa ou a coisa. Possui, portanto, um caráter pessimista ao associar riscos a perigos ou perdas. Tal definição, porém não engloba aspectos relativos às possibilidades de conseqüências decorrentes de um perigo, tanto em relação à natureza da conseqüência como à importância ou utilidade de tais perdas.

Atualmente, há um enorme dinamismo e entusiasmo em diversas áreas da indústria e da sociedade para implementar a gestão de riscos nas organizações (AVEN *et al*, 2007). Contudo, a definição de risco é bastante discutida na literatura especializada de várias comunidades científicas e difere, sobretudo quanto à área de pesquisa: tecnológica, ecológica, financeira, dentre outras. No contexto tecnológico e ambiental, lidar com risco está intrinsecamente ligado à ocorrência ou não do evento indesejado (HOKSTAD & STEIRO, 2006) e às possíveis conseqüências advindas deste evento. Desse modo, o caráter probabilístico da ocorrência de cenários acidentais e os diferentes tipos de conseqüências resultantes destes cenários caracterizam os riscos em múltiplas dimensões, por muitas vezes de caráter conflitante.

Segundo Fayerweather *et al* (1999), caracterizar e quantificar a incerteza pode ajudar os gestores a tomar decisões mais instruídas quando deparados com algumas ações para mitigação de riscos. Keeney (1992) afirma que a identificação dos valores afetados por uma determinada decisão deve ser o ponto inicial para o desenvolvimento de uma criteriosa tomada de decisão sobre riscos. Tais valores são usados para criar objetivos e medidas de performance para àquela decisão, no intuito de definir aspectos técnicos necessários para comparar ou ajudar na criação de alternativas mais estruturadas e servir de base para avaliações qualitativas e quantitativas (KEENEY, 1992; McDANIELS *et al*, 2006).

Conforme McDaniels *et al* (2006), existem algumas etapas na estruturação de problemas para tratar múltiplas dimensões em decisões de gerenciamento de risco. A primeira etapa é deixar claras as decisões regulatórias necessárias em todos os níveis da legislação. Em seguida, os objetivos fundamentais das partes envolvidas no processo de decisão devem ser determinados e como esses objetivos influenciam quando tal decisão é analisada em

diferentes aspectos, e, por conseguinte, medidas de performance que permitam distinguir o que é relevante para que os decisores entendam decisão.

O gás natural (GN) é uma fonte energética fóssil, encontrado geralmente em reservas subterrâneas em diversos lugares do planeta, tanto em terra como no fundo do mar, sendo composto basicamente pelos hidrocarbonetos metano e propano. A utilização do GN vem aumentando significativamente nas últimas décadas, impulsionada por questões ecológicas, tecnologias e financeiras. Devido às suas características relativas à localização de reservas e ao crescimento de mercado consumidor, faz-se necessária uma infra-estrutura eficaz para o abastecimento, transporte e distribuição de gás natural às unidades consumidoras.

Atualmente, o cenário do gás natural no Brasil apresenta dois aspectos perversos: a falta de infra-estrutura para abastecimento e distribuição do gás e a indisponibilidade de reservas no país. A região Nordeste do Brasil, por exemplo, possui um *déficit* na infra-estrutura de transporte e no abastecimento de gás natural, sobretudo devido à alta demanda causada pelas termoelétricas instaladas no passado recente. A Tabela 1.1 apresenta alguns dados que retratam esta situação.

Gasoduto é um duto ou tubulação para conduzir o gás natural, que nele é introduzido sob pressão, por meio de compressores (CTGAS^a, 2008). É considerado um dos meios mais seguros e econômicos para o transporte de substâncias perigosas e em determinados momentos, o único meio de transporte viável para grandes volumes (PAPADAKIS *et al*, 1999). Em contrapartida, como afirma Schafer (2006), quando uma linha de dutos é instalada em uma dada região, é introduzido um perigo que não existia previamente. Fatores externos provenientes da ação humana ou da natureza, falhas de equipamentos e erros de projeto são exemplos de causas potenciais de acidentes em gasodutos.

Omonbude (2007) relata que crescentes descobertas de reservas de GN em regiões de difícil acesso têm influenciado a antecipação de um crescimento do comércio internacional de petróleo e gás via gasodutos. No Brasil, no final da década de 90, a ameaça de um colapso na indústria energética brasileira causada pela falta de investimento na geração de energia e em sistemas de transmissão, trouxe mudanças ao plano inicial de utilização do gás natural importado da Bolívia, basicamente focado nos segmentos de mercado tradicionais: indústria, transporte, comércio e uso residencial (RECHELO NETO & SAUER, 2006). A matriz energética brasileira passou a depender de usinas termoelétricas movidas a gás natural.

Mesmo dependente de uma grande estrutura de transporte, a utilização do gás natural é bastante ampla, no Brasil e no exterior, principalmente em aplicações industriais e comerciais,

uso residencial, uso automotivo, geração de energia e recuperação secundária de petróleo (CTGAS^b, 2008). No Brasil, o abastecimento, transporte e distribuição de gás natural ocorrem, em sua maioria, por meio da malha de gasodutos; malha esta em inevitável expansão (ver Figura 1.1). Nesse contexto, a transmissão e distribuição de gás natural envolvem diversos cenários de riscos em gasodutos, resultantes dos diversos ambientes onde a cadeia produtiva do GN está inserida.

Tabela 1.1 Balanço da demanda de abastecimento de gás no Nordeste do Brasil (milhares de m³/dia)

Estado	Produção de Gás (A)	Demanda Abastecida (B)		Balanço (C=A-B) Ger. de energia	Demanda Abastecida (D)		Déficit (C-D)
		Geração de energia	Outro ^a		Geração de energia	Outro ^a	
Bahia	5.451	1.180	5.110	(839)	3.600	1.500	(5.939)
Sergipe	1.035	-	1557	(522)	-	-	(522)
Alagoas	2.298	-	385	1913	-	-	1.913
Pernambuco	-	-	787	(787)	2.150	-	(2.937)
Paraíba	-	-	243	(243)	-	-	(243)
Rio Grande do Norte	2.680	-	291	2.389	2.200	-	189
Ceará	102	1.650	363	(1.911)	1.100	1.800	(4.810)
Maranhão/Piuaí	-	-	-	-	-	1900	(1900)
Total	11.566	2.830	8.736	-	9.050	5.200	(14.250)

^aIndústria, transporte, comércio e uso residencial

Fonte: Rechelo Neto & Sauer (2006)

O caráter probabilístico da ocorrência de cenários acidentais e os diferentes tipos de consequências resultantes destes cenários caracterizam os riscos envolvidos no abastecimento, transporte e distribuição de gás natural por meio de dutos. Adiciona-se a este contexto a necessidade de expansão da malha de gasodutos brasileira a fim de satisfazer à crescente e diversificada demanda pelo combustível (ver Figura 1.1). Estas razões elevam a importância de estruturar a análise de risco deste tipo de transporte do gás natural, de tratar a incerteza inerente ao problema e a subjetividade na estimativa e avaliação de diferentes dimensões de risco envolvidas.

Nesse contexto de grande importância no que tange ao gerenciamento e análise de risco envolvidos no transporte de GN via gasodutos, é fundamental o desenvolvimento de uma ferramenta que apóie o processo de análise, tratando tanto das questões técnicas inerentes ao transporte dutoviário do gás como das questões acerca da consideração da estrutura de preferências do decisor. Tal ferramenta deve, primordialmente, ser bastante flexível para viabilizar uma análise eficaz. Isto se deve à característica não estruturada do problema, o que

requer a utilização de vários procedimentos de análise, não necessariamente com uma ordem pré-estabelecida para esses procedimentos, mas de acordo com a interação do decisor com o problema e com a ferramenta. Este conjunto de características está presente em um sistema de apoio a decisão.

Este trabalho propõe, portanto, um Sistema de Apoio à Decisão para Análise de Risco em Gasodutos. Avaliar riscos de acordo com suas várias dimensões é complicado, principalmente na forma de agregar preferências a respeito das perdas conseqüentes de um cenário acidental. O gerenciamento de riscos associados às atividades potencialmente perigosas tem sido alvo, nos últimos anos, de um profundo interesse público e técnico, sobretudo no desenvolvimento das atividades regulatórias (MELCHERS, 2001). Torna-se necessário, então, o desenvolvimento de trabalhos que busquem contribuir para o processo de Análise de Risco, sejam envolvendo questões de caráter técnico relativas à avaliação e mensuração, aspectos do gerenciamento de riscos e a influência do ambiente em situações sob risco.



Figura 1.1 Malha dutoviária brasileira (Fonte: ABEGAS, 2008)

Dessa forma, espera-se contribuir para a literatura das áreas do conhecimento que se dedicam a Análise de Risco, por meio de uma revisão bibliográfica do tema e uma análise

crítica das metodologias já utilizadas. Ademais, o trabalho aborda o estudo do uso da abordagem multicritério de apoio a decisão em problemas de decisão na Análise de Risco, no intuito de utilizar um tratamento sistemático deste processo decisório, a partir do entendimento do problema e dos objetivos da decisão, da análise das múltiplas dimensões envolvidas, da estruturação de preferências dos *stakeholders* e do uso de um procedimento estruturado para agregação de tais preferências.

Este trabalho tem como foco a proposta, descrição e desenho de um sistema de apoio a decisão para análise de risco em gasodutos. Para tal, previamente à discussão direta sobre o SAD que ocorre no capítulo 4, discute criticamente as etapas do modelo de decisão abordado, assim como os procedimentos de aplicação do modelo, no capítulo 3. Com base nessa discussão é feita a proposta do SAD, tomando por base aquilo que envolve o processo de desenho e desenvolvimento do sistema, alimentados pela discussão prévia acerca do modelo e de suas etapas de aplicação. O objetivo do sistema proposto, então, é apoiar o processo decisório relacionado à análise de riscos em gasodutos, sendo considerados aspectos técnicos como a natureza estocástica do tema e a variedade das conseqüências envolvidas, assim como fatores relacionados ao processo de tomada de decisão na análise de risco, tais como a avaliação dos *tradeoffs* ligados à natureza multidimensional das situações contemporâneas de riscos e a inclusão dos *stakeholders* envolvidos.

1.1 Objetivos do trabalho

Nesta seção, são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é estruturar metodologicamente o desenho e a construção de um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) para Análise de Risco em Gasodutos, estabelecer os respectivos módulos do sistema e descrever os aspectos que envolvem o desenho e construção do SAD.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, podem ser destacados, em ordem de apresentação no trabalho:

- Realizar uma revisão bibliográfica a respeito da Análise de Risco, particularmente em gasodutos;

- Estabelecer, a partir de publicações científicas, uma base conceitual para os temas envolvidos no decorrer do trabalho, tais como sistemas de apoio a decisão, modelos probabilísticos, decisão multicritério e análise de risco;
- Descrever e ilustrar a aplicação de modelos de elicitación de conhecimento *a priori* no contexto da atividade de transporte via gasodutos;
- Descrever e estabelecer um procedimento de utilização do modelo de apoio a decisão utilizado como base para a proposta do sistema de apoio a decisão, assim como registrar possíveis mudanças e adaptações deste modelo;
- Propor e descrever o desenho e construção do Sistema de Apoio a Decisão (SAD) que deve dar suporte ao processo decisório que envolve o modelo de decisão para análise de risco em gasodutos

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos:

- O capítulo 1 apresenta uma visão inicial do problema análise de risco, justifica a importância do uso de uma ferramenta que apóie o processo de análise e a tomada de decisão sob condições de incerteza e estabelece os objetivos do trabalho.
- O capítulo 2 estabelece uma base conceitual dos tópicos relacionados ao desenvolvimento do modelo e do sistema de apoio à decisão proposto. Nesse sentido, o capítulo traz a descrição de procedimentos de elicitación de conhecimento *a priori* que serão trabalhados ao longo da dissertação. Ainda no capítulo 2, é revisada a literatura específica sobre o contexto de aplicação do modelo de decisão, risco em gasodutos, assim como sobre o método multicritério utilizado no modelo de decisão e no SAD.
- No capítulo 3, é descrito o modelo de decisão utilizado como base para a proposta do SAD e é estabelecido um procedimento de aplicação do modelo. Nesse sentido são registradas oportunidades de adaptação do modelo, tanto em questões envolvendo os fatores técnicos de cada etapa de implementação, como no escopo de abrangência do modelo em questão;
- O capítulo 4 descreve o desenho e os elementos estruturais necessários à construção de um sistema de apoio a decisão para a análise de risco em gasodutos de gás natural. O capítulo apresenta os módulos do sistema, descreve a metodologia de desenvolvimento a ser utilizada e descreve as características dos módulos estabelecidos em função das partes componentes do SAD: base de dados, base de modelos e diálogo.

- Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, assim como lista sugestões para futuros trabalhos no tema abordado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir a fundamentação teórica e base conceitual para o trabalho. Apresenta-se inicialmente a base conceitual para sistemas de apoio a decisão (SAD), enfatizando-se a arquitetura de SAD e a base de modelos. Para a construção de modelos, em seguida discorre-se sobre métodos de apoio multicritério a decisão, destacando a teoria da utilidade multiatributo.

2.1 Sistemas de Apoio a Decisão

Designa-se sistema de informação todo sistema que recebe, armazena, processa, manipula e gera dados e informações. Esses sistemas estão presentes em inúmeras situações que envolvam materiais, pessoas ou máquinas e constituem uma importante ferramenta de auxílio à gestão, na busca pela eficiência e eficácia dos processos empresariais.

Antes de tratar especificamente dos conceitos relacionados com os sistemas de apoio a decisão é oportuno discutir um aspecto importante para o estudo dos SAD's: o nível de estruturação do problema de decisão. Os problemas de decisão numa organização podem ser classificados de várias formas. Dentre elas, a classificação em função do nível estruturação é bastante relevante no contexto de sistemas de apoio a decisão:

- Decisões estruturadas – presentes em tarefas programadas e bem definidas, quando não é necessária a presença de um decisor para implementação, ou seja, existem procedimentos bem definidos para a tomada de decisão;
- Decisões não estruturadas – são decisões únicas pela sua natureza, fortemente dependentes da intuição do decisor e com menor uso de estrutura computacional. Caracterizam-se pela ausência de uma regra ou procedimento de resolução do problema;
- Decisões semi-estruturadas – não são totalmente definidas por procedimentos padrões, incluindo aspectos estruturados e não estruturados;

Especificamente, um sistema de apoio a decisão (SAD) é um sistema de informação utilizado para dar suporte a um tomador de decisão de qualquer nível, face a problemas semi-estruturados e não estruturados (DAVIS, 1985). O tipo de problema estudado neste trabalho envolve riscos que são, por natureza, subjetivos e, conseqüentemente, complexos. O caráter

probabilístico da ocorrência de cenários acidentais e os diferentes tipos de consequências resultantes destes cenários caracterizam os riscos envolvidos no abastecimento, transporte e distribuição de gás natural por meio de dutos. A análise deste tipo de situação muitas vezes requer uma abordagem muito flexível que permita a comparação de muitas e variadas condições. Pode-se chamar esta forma de abordar esta situação de abordagem de decisão não estruturada.

De acordo com Bigdoli (1989), um SAD é composto de uma base de dados que auxilia o sistema, uma base de modelos que provê a capacidade de análise e o diálogo que provê a interação entre o usuário e o sistema. Tal estrutura está disposta na Figura 2.1.

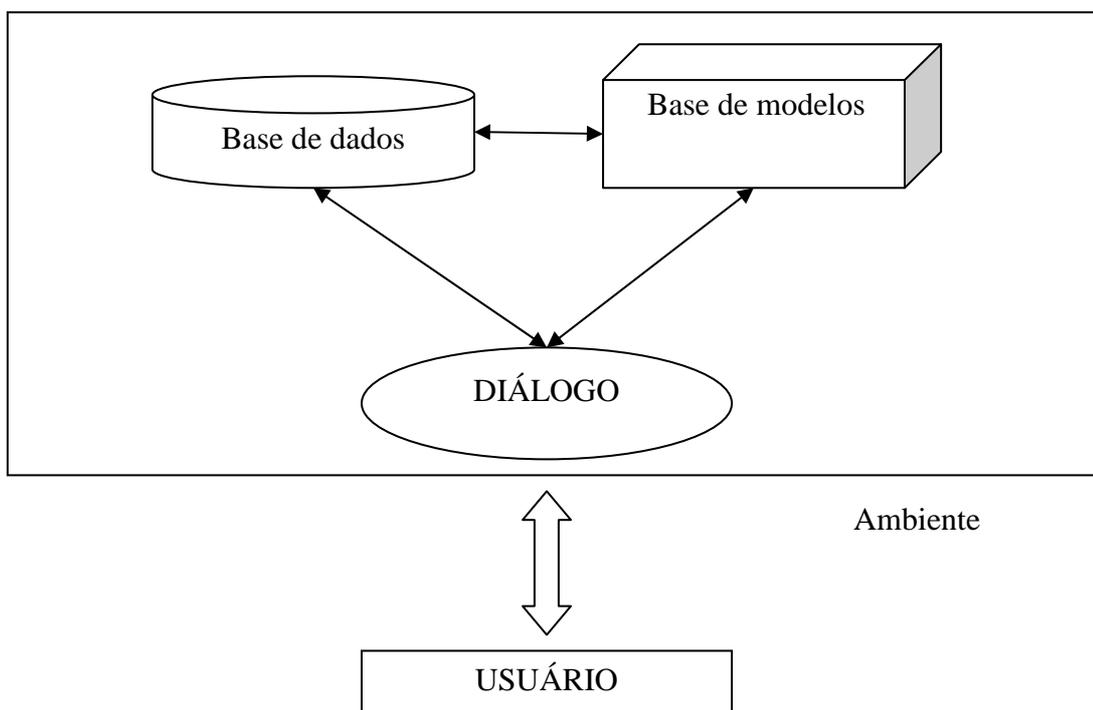


Figura 2.1 Arquitetura de SAD (Fonte: Adaptado de Bigdoli, 1989)

O componente banco de dados é crítico, pois os dados são acessados diretamente pelo usuário e os mesmos apóiam a modelagem e análise de dados executadas por qualquer SAD. De acordo com Sprague & Watson (1989), deve ser tomado certo cuidado no sentido de garantir a disponibilidades dos dados; os autores sugerem que o banco de dados de um SAD deve ser separado do banco de dados de processamento de transações das empresas.

A base de modelos fornece os recursos de análise de um SAD, através de ferramentas matemáticas e estatísticas que busquem apoiar o processo de decisão. Uma infinidade de modelos está disponível para serem utilizados em sistemas de decisão, porém é importante ressaltar que apenas o uso de um modelo pode não ser suficiente para prover uma solução do

problema, sendo necessário o apoio de especialistas (pesquisadores operacionais, matemáticos e estatísticos) capazes de exercerem um papel de analista e ajudar o decisor durante o processo de decisão no que diz respeito ao entendimento do modelo matemático ou estatístico utilizado.

De acordo com Almeida & Ramos (2002), o maior desafio da construção do modelo e dos modelos de análise no ambiente de um SAD é a inclusão dos dados mais apropriados e variáveis do modelo, em particular dados externos. Os autores afirmam que os modelos de um SAD devem ser capazes de gerar e comparar alternativas de decisão, além de incluir análises como busca de metas, análises de sensibilidade e de cenários.

Finalmente, o diálogo é definido como uma combinação de *software*, *hardware* e pessoas, que habilita o usuário a interagir com o SAD. É a interface sistema/usuário (ALMEIDA & RAMOS, 2002). Conforme Sprague & Watson (1989), pode-se obter uma apreciação da importância deste componente reconhecendo que, do ponto de vista do usuário, o diálogo é o sistema, o que acarreta a importância da definição prévia de quem serão os usuários do sistema para que o sistema possa ser utilizado de forma efetiva.

É importantíssimo considerar o estilo cognitivo do usuário, ou seja, a forma sistemática através da qual os dados são observados e analisados. Tal importância se relaciona tanto com a escolha do usuário do sistema, assim como com a avaliação entre simplicidade e flexibilidade do diálogo. Almeida & Ramos (2002) listam algumas aspectos que devem ser considerados na construção de um diálogo:

- Simplicidade: uso amigável, familiaridade com os campos do computador;
- Consistência: diferentes partes do sistema devem utilizar comandos semelhantes para uma tarefa especial, provendo consistência.
- Familiaridade com usuários de todo o mundo: deve estabelecer formatos genéricos, no sentido que são reconhecidos e podem ser utilizados por usuários em todo o mundo;
- Informação/orientação: inclusão de avisos de erros, possivelmente com sua identificação e sugestões para alterações e procedimentos de correção;
- Flexibilidade: para a navegação no sistema e para entrada e saída do sistema.

Por último, é importante registrar o processo de desenvolvimento de SAD, cuja abordagem é bastante particular. Esta abordagem é chamada de abordagem adaptativa e será descrita em maiores detalhes no capítulo 4. Antes disso, é necessária a definição das três

tecnologias básicas quem envolvem um SAD, a saber: SAD específico, Gerador de SAD e Ferramenta SAD.

A Ferramenta SAD é usada para desenvolver um SAD específico ou um Gerador de SAD, tais como linguagens de programação, por exemplo. O Gerador de SAD, de acordo com Almeida & Ramos (2002), usa uma combinação de *hardware* e *software* como um pacote para desenvolver um SAD específico, de forma que provêem mais que a capacidade necessária para um SAD específico. Destacam-se como exemplos de Geradores de SAD, planilhas eletrônicas e algumas ferramentas de pesquisa operacional e estatística. Por sua vez, o SAD específico é o SAD propriamente dito: o sistema, normalmente computacional, que apóia o processo decisório.

2.2 Métodos de Apoio Multicritério a Decisão

O Apoio Multicritério a Decisão (AMD) ou, em inglês, *Multicriteria Decision Aid* (MCDA) consiste num conjunto de métodos e técnicas para auxiliar ou apoiar pessoas e organizações a tomarem decisões, sob a influência de uma multiplicidade de critérios. Tem como princípio buscar o estabelecimento de uma relação de preferências (subjettivas) entre as alternativas que estão sendo avaliadas sob a influência de vários critérios (ALMEIDA & COSTA, 2005). Zeleny (1998) afirma que a tomada de decisão multicritério está firmemente baseada no conceito de otimalidade onde múltiplos critérios caracterizam a noção de “melhor”, com prevalência nas áreas de economia, engenharia, gestão e negócios. Esses são, frequentemente, problemas onde a procura pela solução ótima requer alguma forma de avaliação da compensação (*trade-offs*) entre os critérios.

Recentemente, modelos de decisão multicritério, modelos de decisão em grupo e negociação têm atingido grande desenvolvimento, abordando questões relevantes em vários processos decisórios (CLÍMACO, 2004). Como exemplo do uso da abordagem multicritério nas mais diversas áreas, podem ser citadas a área de energia e meio ambiente, sistemas de informação, engenharia de manutenção, gestão de projetos, logística e, inclusive, análise de riscos (ZAMBON *et al*, 2005; HAASTRUP *et al*, 1998; RENKEMA & BERGHOUT, 1997; WEI *et al*, 2005; ALBADVI, 2004; CALVACANTE & ALMEIDA, 2007; MAVROTAS *et al*, 2006; WU & LIN, 2003; KHAN *et al*, 2004). Como abordado anteriormente, os problemas contemporâneos de risco caracterizam-se pelo seu caráter multidimensional no que diz respeito aos objetivos ou atributos a serem considerados na análise. Desta forma, é importante relatar, mesmo que sucintamente, os principais fatores relacionados com este ramo da

Pesquisa Operacional, também conhecida, mais contemporaneamente, como Ciência da Gestão.

O AMD envolve outros aspectos afora o tratamento adequado a problemas que envolvam uma multiplicidade de critérios. De acordo com Roy (1996), apoio a decisão é a atividade de uma pessoa que, pelo uso explícito, mas não necessariamente completo de modelos formalizados, ajuda a obter elementos que respondam a questões colocadas por *stakeholders* no processo de decisão. Esses elementos ajudam a tornar a decisão mais clara e para recomendar, ou simplesmente favorecer, um comportamento que irá aumentar a consistência entre a evolução do processo e objetivos dos *stakeholders* e valores do sistema.

Um fator de suma importância para um apoio eficaz ao processo decisório é a definição da problemática do problema ou situação que se está analisando, ou seja, estabelecer aquilo que se deseja ou pretende numa situação de decisão. Roy (1996) identifica seis problemáticas ou categorias de problemas, para as quais o Apoio Multicritério a Decisão pode ser útil:

- Problemática de escolha ($P\alpha$) – tem como objetivo esclarecer a decisão pela escolha de um subconjunto do espaço de ações;
- Problemática de classificação ($P\beta$) – tem o objetivo de alocar ou classificar ações em categorias, cujo perfil deve ser previamente definido a partir de normas aplicáveis ao conjunto de ações;
- Problemática de ordenação ($P\gamma$) – tem o objetivo de colocar as ações em certa forma de ordem de preferência, não necessariamente uma ordem completa;
- Problemática de descrição ($P\delta$) – procura descrever as ações e respectivas conseqüências numa maneira formal e sistemática. Roy (1996) afirma que esta problemática é essencialmente uma problemática de aprendizagem;
- Problemática de design – consiste na procura, identificação ou criação de novas alternativas de decisão, de modo a atingir metas e aspirações reveladas durante o processo decisório;
- Problemática de portfólio – tem o objetivo de escolher um subconjunto de alternativas a partir de um grande conjunto de possibilidades, levando em conta não somente as características individuais das ações, mas também a maneira como elas interagem e as sinergias positivas e negativas.

Um ponto inerente ao uso da abordagem multicritério de apoio à decisão é a escolha do método a ser utilizado, o que depende do problema de decisão abordado, da estrutura de preferências do decisor, da problemática envolvida e do analista de decisão que está

trabalhando no processo de decisão. Tradicionalmente, podem-se dividir os métodos multicritério em três escolas de pensamento:

a) Escola Americana – baseia-se na construção de uma única função de valor ou utilidade ou critério único de síntese. Algumas abordagens desta escola são: *Multi-Attribute Utility Theory* - MAUT (Keeney & Raiffa, 1976), *Simple Multi-Attribute Rating Technique using Swings* – SMARTS e *Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings* – SMARTER (EDWARDS & BARRON, 1994), *Analytic Hierarchy Process* – AHP (SAATY, 1987);

b) Escola Francesa ou Européia – são realizadas comparações par-a-par entre alternativas, buscando evidências de superação de uma alternativa em relação à outra. As abordagens mais conhecidas são a família ELECTRE (ROY, 1996) e a família PROMETHEE (BRANS & VINCKE, 1985);

c) Métodos Interativos – A partir de níveis desejados ou satisfatórios estabelecidos para cada critério, tais métodos procuram por soluções que atinjam ou estejam, de certa forma, próximos a atingir estes objetivos ou aspirações. A modelagem de preferências não é definida *a priori*, mas sim construída de forma interativa com o(s) decisor(es). Como exemplo de metodologia desta família, pode ser citada a Programação Matemática Multiobjetivo (CLÍMACO *et al*, 2003);

Neste trabalho, o modelo de decisão envolvido utiliza a Teoria da Utilidade Multiatributo. O principal motivo para o uso deste tipo de abordagem para o problema de gerenciamento riscos é, além da estrutura axiomática que baseia esta teoria, a abordagem probabilística utilizada pela MAUT quando da utilização dos conceitos da teoria da utilidade. Dessa forma, tal método apresenta-se mais adequado ao caráter estocástico do fenômeno e do contexto de decisão inserido na construção e desenho do SAD proposto: o apoio a decisão na análise de risco de trechos de gasoduto de, estabelecendo um *ranking* entre estas seções de acordo com uma hierarquia de riscos.

Roy (1996) apresenta, para a análise de um decisor diante de duas alternativas, quatro possíveis relações de preferência entre elas, que formam o Sistema Básico de Preferências (BSPR) descritos na Tabela 2.1. Para a Teoria da Utilidade e a Teoria da Utilidade Multiatributo, são definidas apenas duas formas de avaliar a preferência do tomador de decisão entre duas alternativas:

- a) a é preferível a b , aPb ou $a \succ b$;
- b) a é indiferente a b , aIb , ou $a \sim b$;

A Escola Americana do AMD apenas considera como sendo básicas as relações de preferência estrita e indiferença, entendendo que o decisor ou o analista sempre é capaz de comparar alternativas e apontar uma destas relações de preferência.

Tabela 2.1 Sistema básico de preferências ao comparar duas ações/alternativas

Situação	Definição	Relações Binárias (propriedades)
Indiferença	Corresponde à existência de razões claras e positivas que justifiquem a equivalência entre as duas ações.	<i>I</i> : relação reflexiva e simétrica
Preferência Estrita	Corresponde à existência de razões claras e positivas que justifiquem a preferência significativa em favor de uma (identificada) das duas ações.	<i>P</i> : relação assimétrica (não reflexiva)
Preferência Fraca	Corresponde à existência de razões claras e positivas que invalidem a preferência estrita em favor de uma (identificada) dentre as duas ações, mas que são insuficientes para deduzir uma estrita preferência em favor da outra ou a indiferença entre as duas ações, não permitindo diferenciar nenhuma das duas situações supracitadas.	<i>Q</i> : relação assimétrica (não reflexiva)
Incomparabilidade	Corresponde a uma ausência de razões claras e positivas que justifiquem qualquer uma das três relações precedentes.	<i>R</i> : relação simétrica (não reflexiva)

2.3 Teoria da Utilidade Multiatributo

A teoria da utilidade multiatributo, tipicamente referida por MAUT (do inglês, *Multi-Attribute Utility Theory*), é uma derivação da teoria da utilidade de Von Neumann & Morgenstern (1944), a qual incorpora à teoria a questão do tratamento de problemas com múltiplos objetivos (GOMES *et al*, 2006). A MAUT, como colocado na seção anterior, faz parte da escola americana do Apoio Multicritério a Decisão, e corresponde a única abordagem que possui uma estrutura axiomática bem definida, por isso é a única que recebe o nome de teoria. Enquanto que, em alguns métodos de apoio a decisão à luz de múltiplos objetivos o decisor estabelece parâmetros ou condições que influenciam no processo de decisão de forma *ad hoc*, a MAUT possui um processo bem estruturado, o processo de eliciação.

O termo elicitación é um neologismo do inglês *elicitation*, que significa ação de extrair ou fazer surgir. Como a própria definição já permite inferir, o processo de elicitación ajuda a extrair, a fazer surgir o conhecimento de pessoas, tipicamente especialistas, sobre determinado fenômeno, tornando-se bastante útil e primordial em situações de escassez de dados. Este termo vem sendo comumente utilizado há vários anos pela comunidade de Pesquisa Operacional no Brasil, apresentando-se como o mais adequado. Portanto, esse será o termo utilizado ao longo deste trabalho para caracterizar este tipo de processo.

Esta seção tem o objetivo de apresentar alguns conceitos, de teoria da utilidade e da teoria da utilidade multiatributo, mais importantes para o entendimento do modelo de decisão descrito no capítulo 3. Além de descrevê-los, busca-se ilustrar suas implicações no contexto do problema de decisão tratado neste trabalho. Dessa forma, caso seja necessário uma leitura mais profunda acerca do tema, deve-se procurá-la em Keeney & Raiffa (1976), Raiffa (1970) e Gomes *et al* (2006).

Antes disso, é imprescindível definir alguns conceitos relativos à avaliação de preferências entre duas alternativas ou cursos de ação. De acordo com Gomes *et al* (2006), com o objetivo de apoiar o processo decisório, torna-se necessário estabelecer certas condições que possam expressar as preferências do agente de decisão quando da comparação entre duas ações potenciais pertençam ao conjunto A de ações/alternativas. Essas condições são definidas por relações binárias (H), que podem apresentar as seguintes propriedades clássicas:

- reflexividade - $\forall a \in A, aHa$;
- irreflexividade - $\forall a \in A, \text{não } aHa$;
- simetria - $\forall a, b \in A, aHb \Rightarrow bHa$;
- assimetria - $\forall a, b \in A, aHb \Rightarrow \text{não } bHa$;
- transitividade - $\forall a, b, c \in A, [aHb \text{ e } bHc] \Rightarrow aHc$.

2.3.1 Teoria da Utilidade

Uma função utilidade pode ser definida como uma função u que associa um número real $u(x)$ para cada x no espaço de avaliação, que representa a estrutura de preferências do tomador de decisões, tal que $a \sim b \Leftrightarrow u(a) = u(b)$ e $a \succ b \Leftrightarrow u(a) \geq u(b)$. Sendo u uma função utilidade que reflita as preferências do decisor, considerando uma problemática de ordenação (P_γ), esse problema pode ser colocado no formato de um problema de otimização: achar $a \in A$ que maximize $u(a)$.

Deve-se saber diferenciar entre uma função utilidade e uma função valor. Conforme Gomes *et al* (2006), uma função valor está associada a uma escala ordinal na avaliação de conseqüências, enquanto que uma função utilidade trabalha numa escala cardinal de diferenças, obtida por procedimentos estruturados de elicitação de preferências. Além disso, a função utilidade está adequada ao contexto probabilístico em problemas de decisão, enquanto que o uso da função valor deve ocorrer em situações determinísticas. Dessa forma, ao tratar do contexto de risco, é correto tratar de funções utilidade.

A Teoria da Utilidade apresenta alguns axiomas que norteiam sua aplicação. A seguir estão listados esses axiomas, que podem ser mais profundamente analisados em Keeney & Raiffa (1976), Gomes *et al* (2006) e Campello de Souza (2005):

- a) Axioma da ordenabilidade: dadas as conseqüências a e b , pode-se dizer que a é preferível a b ($a \succ b$), ou a é indiferente a b ($a \sim b$) ou b é preferível a a ($b \succ a$);
- b) Axioma da transitividade: se $a \succ b$ e $b \succ c$, então $a \succ c$. Já se $a \sim b$ e $b \sim c$, então $a \sim c$;
- c) Axioma da continuidade: se $a \succ b \succ c$, então existe uma probabilidade p , $0 < p < 1$, tal que $b \sim [a, p; c, 1-p]$;
- d) Axioma da substitutibilidade: se $a \sim b$, então $[a, p; c, 1-p] \sim [b, p; c, 1-p]$;
- e) Axioma da redutibilidade: $[[a, p; b, 1-p], q; b, 1-q] \sim [a, pq; b, 1-pq]$;

Outro axioma importante da Teoria da Utilidade é o da monotocidade. Tal propriedade diz que caso a preferência em utilidade por uma conseqüência aumente à medida que seu valor aumenta, podemos dizer que a função utilidade é monotonicamente crescente. Já no caso da preferência em utilidade diminuir com o valor da conseqüência, a função é monotonicamente decrescente. Esse é o caso do contexto abordado neste trabalho: as conseqüências tratam de impactos sobre os seres humanos, impactos ambientais e impactos financeiros e, à medida que os valores destes impactos aumentam, a utilidade destas conseqüências diminui.

Para construção e aplicação da Teoria da Utilidade, costuma-se trabalhar com o conceito de loterias. A loteria descrita na Figura 2.2 representa o seguinte raciocínio: o decisor está indiferente entre o valor certo b (que possui probabilidade igual a um de ocorrer) e a loteria cujo *payoff* o valor a com probabilidade p ou o valor c com probabilidade $1-p$. Este tipo de representação será estabelecido, neste trabalho, dessa forma: $a \sim [b, p; c, 1-p]$ e forma análoga, estabelece-se a relação para a relação de preferência estrita.

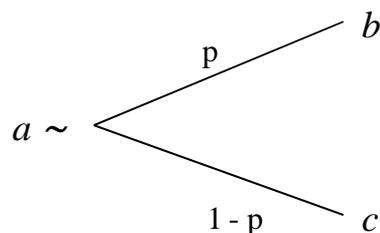


Figura 2.2 Representação da loteria

Outro conceito bastante importante no estudo da Teoria da Utilidade é de equivalente certo. O equivalente certo de uma loteria é definido como uma quantidade \hat{x} para qual o decisor fica indiferente entre essa loteria e a quantidade \hat{x} , que é obtida com certeza. No caso da Figura 2.2, tem-se que “a” é o equivalente certo da loteria $[b;p;c, 1-p]$. Dessa forma, dizemos que $u(a) = p \cdot u(b) + (1 - p) \cdot u(c)$.

Para a construção da função utilidade, faz-se uso, comumente, deste tipo de loteria. Keeney & Raiffa (1976), Raiffa (1970) e Gomes *et al* (2006) apresentam procedimentos de elicitação da função utilidade com base em tais loterias.

A partir do conceito de equivalente certo, podem-se realizar análises quanto ao comportamento do decisor em relação ao risco. Considerando \tilde{x} como o valor esperado de uma loteria, define-se que:

- a) O decisor é averso ao risco se $u(\tilde{x}) > u(\hat{x})$, sendo a função utilidade uma função côncava;
- b) O decisor é propenso ao risco se $u(\tilde{x}) < u(\hat{x})$, sendo a função utilidade uma função convexa;
- c) O decisor é neutro ao risco se $u(\tilde{x}) = u(\hat{x})$, sendo a função utilidade uma função linear.

2.3.2 Risco de Bayes

O conceito de risco a ser abordado neste trabalho é condizente com os conceitos discutidos no capítulo 1, que tratam risco como uma combinação entre frequência ou probabilidade de ocorrência de um evento com a consequência relacionada à ocorrência de tal evento. Nesse sentido, será utilizado o conceito de risco de Bayes (CAMPELLO DE SOUZA, 2005) que considera a probabilidade de ocorrência de um cenário acidental num determinado

trecho do gasoduto combinado com a utilidade da consequência decorrente deste evento. Para cada dimensão de risco analisada (humana, ambiental e financeira) é estabelecida a utilidade da consequência devido ao cenário acidental, e define-se a função perda $L(a) = -u(a)$.

Calcula-se, portanto, o risco $r(a)$ de cada alternativa como a perda esperada para cada alternativa ou trecho de gasoduto com base na probabilidade p_{ij} de ocorrências dos eventos acidentais j no trecho i :

$$r(a_i) = \sum_j L(a) \cdot p_{ij} \quad (2.1)$$

2.3.3 Teoria da Utilidade Multiatributo

Com base na Teoria da Utilidade Esperada, a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) busca estabelecer uma função utilidade $u(\mathbf{x})$, sendo \mathbf{x} um vetor que representa vários atributos considerados relevantes numa determinada análise. Por exemplo, no contexto de análise de risco podemos estabelecer dois atributos ou critérios a serem analisados de forma a embasar uma análise de risco numa planta industrial: número h de pessoas potencialmente atingidas e as despesas financeiras d decorrentes de um cenário de caráter negativo. Nesse caso, \mathbf{x} é um vetor de duas dimensões que representa os dois critérios citados anteriormente, é um ponto no espaço de consequências $h \times d$; genericamente, os n atributos relacionam uma alternativa ou curso de ação a , pertencente a um conjunto A que contém todas as alternativas viáveis, a um ponto no espaço de consequências n -dimensional, sendo $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ um ponto no espaço de consequências. A Figura 2.3 ilustra tal representação.

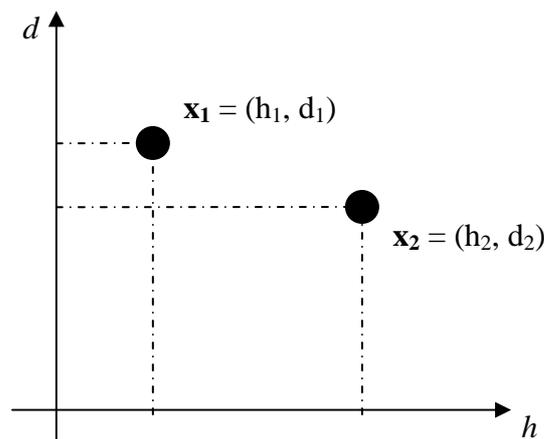


Figura 2.3 Exemplos de atributos para Análise de Risco

Tipicamente, a MAUT é utilizada quando o decisor precisa escolher uma alternativa do conjunto A , cuja performance está relacionada a uma multiplicidade de critérios. Tais atributos assumem diferentes valores para diferentes alternativas de A e, deseja-se, escolher

uma alternativa a que melhor satisfaça o decisor em relação ao conjunto de critérios. Para isto, a MAUT propõe estabelecer uma função utilidade multiatributo $u(\mathbf{x})$, definida sobre o espaço de conseqüências, no intuito de obter o maior desta função para o conjunto de alternativas estabelecido.

Funções utilidade multiatributo podem assumir diversas formas, porém podem ser destacadas algumas formas especiais decorrentes da verificação de importantes propriedades no que diz respeito aos critérios considerados e sua inter-relação. Nesse sentido, serão descritas tais propriedades nas seções 2.3.3.1 e 2.3.3.2, e as funções utilidade multiatributo correspondentes estão explicitadas no capítulo 3 no contexto do problema de decisão a ser tratado.

2.3.3.1 Independência em utilidade

Um atributo Y é independente em utilidade de Z quando preferências condicionais para loterias em Y independem do desempenho no critério Z. Ou seja, para quaisquer valores de z_1 e z_2 na Figura 2.4, as preferências sobre o atributo Y não se alteram e os valores de p se mantêm.

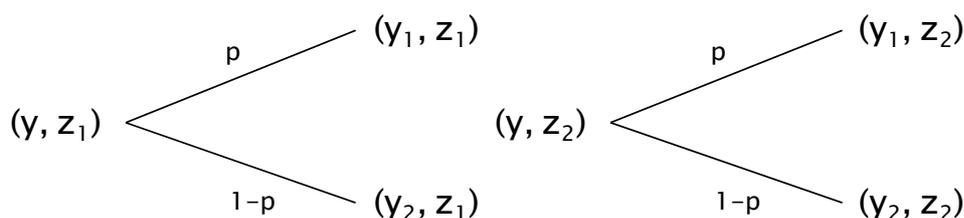


Figura 2.4 Independência em Utilidade

Quando os n atributos considerados são independentes em utilidade entre si, é possível determinar, a partir da estrutura axiomática da MAUT, uma função utilidade característica, chamada de função utilidade multilinear.

2.3.3.2 Independência aditiva

De acordo com Keeney & Raiffa (1976), dois atributos Y e Z são aditivamente independentes se a comparação pareada de quaisquer duas loterias, definidas por duas distribuições de probabilidade conjuntas em $Y \times Z$, depende apenas de suas probabilidades marginais. Em outras palavras, não há interação de preferências entre Y e Z, esses atributos não são complementares nem substitutos. A independência aditiva é comumente definida com base na indiferença entre duas loterias expostas na Figura 2.5, que apenas reafirma o conceito descrito anteriormente.

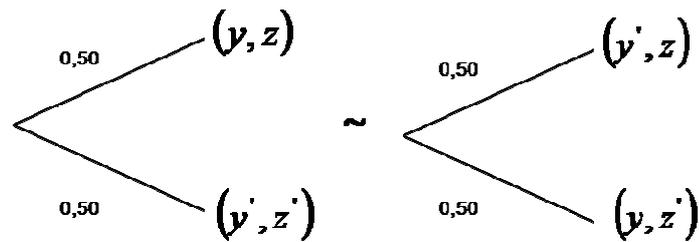


Figura 2.5 Loterias que representam a Independência Aditiva

2.4 Modelos Probabilísticos de elicitación de conhecimento *a priori*

O conceito utilizado neste trabalho para avaliar riscos envolve a avaliação de probabilidades e consequências. Nesta seção serão discutidos alguns aspectos relativos aos modelos probabilísticos trabalhados no modelo de decisão considerado, especificamente os métodos de elicitación de conhecimento *a priori* sobre as probabilidades ou taxas de ocorrência dos cenários acidentais levados em conta na análise de risco.

Probabilidade é um conceito fundamental para o entendimento do modelo descrito no capítulo 3 e, posteriormente, para o uso efetivo do SAD proposto. Quando não há dados disponíveis para análise ou quando eles existem de forma insuficiente, é adequado o uso da abordagem subjetiva da probabilidade a fim de prover meios de tratar a incerteza ligada ao mecanismo probabilístico em destaque. Dentre as possibilidades de abordagem subjetiva da probabilidade, destaca-se a abordagem bayesiana, cuja idéia fundamental é a existência de uma probabilidade *a priori* da ocorrência de um evento e que a partir da experiência de especialistas pode-se fazer estimativas a respeito dessas probabilidades. A diferença essencial que distingue a abordagem bayesiana das demais abordagens utilizadas sob o conceito de probabilidade subjetiva é o forma explícita com que esta utiliza os elementos subjetivos durante a análise (MARTZ & WALLER, 1982).

Neste trabalho, far-se-á uso de procedimentos estruturados que visem à determinação das probabilidades *a priori* de eventos. De acordo com Martz & Waller (1982), a seleção de distribuições *a priori* é um exercício subjetivo, e frequentemente *ad hoc*, que deve ser examinado sob vários pontos de vista. Primeiramente, é importante o entendimento das consequências em selecionar certa distribuição de probabilidade *a priori* de forma que possa ser defendido o uso da análise bayesiana. Precisamos responder as seguintes questões: O que é a distribuição *a priori* a representar? Como pode ser identificada? Quais são as características da distribuição? Como a distribuição *a priori* se comporta na presença de dados experimentais observados? Representatividade é um requerimento básico de qualquer

distribuição *a priori*, de forma que o pesquisador ou engenheiro especialista e tomador de decisão deve trabalhar juntos na determinação e avaliação da distribuição. É um esforço cooperativo entre o especialista e o decisor na quantificação da noção subjetiva ou grau de crença sobre um evento que é alvo de estudo tanto por estatísticos e engenheiros, como por psicólogos estudiosos deste processo cognitivo.

Martz & Waller (1982) dividem esta área de estudo em duas grandes áreas, considerando a presença de um ou vários especialistas. Neste trabalho será dado foco aos procedimentos que envolvem apenas um especialista. Porém, nada impede que seja feitas adaptações no modelo de decisão no intuito de adequar-se a um processo que envolva vários especialistas, definido pelos autores como um problema de consenso, que pode ser abordado sob um enfoque de um processo de decisão em grupo.

A seguir serão descritos em maior detalhe dois procedimentos clássicos para realizar uma elicitación de conhecimento *a priori*: o método dos intervalos equiprováveis de probabilidade (RAIFFA, 1970) e método descrito por Martz & Waller (1982) para elicitación da distribuição de probabilidade *a priori* sobre o parâmetro taxa de falhas (λ) de uma distribuição exponencial ou de uma distribuição de Poisson.

2.4.1 Método dos intervalos equiprováveis de probabilidade

A descrição deste método está baseada nos trabalhos de Raiffa (1970) e de Almeida & Campello de Souza (2001). Este procedimento é denominado método dos intervalos equiprováveis e consiste na avaliação de percentis por meio da subdivisão sucessiva de intervalos equiprováveis, cuja determinação é obtida através de entrevista com o especialista. Maiores detalhes, inclusive sobre formas de estruturar as perguntas a serem dirigidas ao especialista, podem ser vistos em Raiffa (1970).

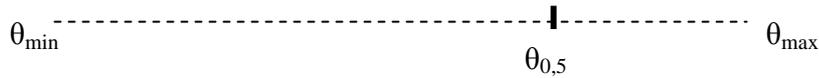
Dado um evento de interesse θ , de cujo valor se pretende obter uma distribuição de probabilidade, tal procedimento pode ser visualizado nas seguintes etapas:

a) Explicação geral do processo ao especialista, tanto dos aspectos procedimentais como dos objetivos relacionados ao método. Deve ficar claro que o objetivo não é encontrar o real valor de θ , mas sim o seu valor mais provável;

b) Deve-se estabelecer o a faixa dos possíveis valores de θ , a partir da definição de um valor mínimo e um valor máximo θ_{\max} .

θ_{\min} ----- θ_{\max}

c) Inicia-se, então, um processo de subdivisão em intervalos equiprováveis, obtendo-se inicialmente o valor de $\theta_{0,5}$ para o qual $F(\theta_{0,5}) = 0,5$.



d) Este processo continua de modo a obter os valores de $\theta_{0,25}$ e $\theta_{0,75}$. Após obter estes valores, é adequado realizar um teste de consistência, com base nos valores determinados para $\theta_{0,25}$ e $\theta_{0,75}$, ao avaliar a seguinte questão: o que é mais provável, θ ocorrer dentro ou fora do intervalo $(\theta_{0,25}, \theta_{0,75})$? O entrevistado pode responder de três formas diferentes: dentro, fora ou indiferente, sendo a terceira opção a resposta correta caso os valores estabelecidos estiverem consistentes. No caso de resposta inconsistente, deve-se reavaliar os valores. Em seguida o procedimento pode ser repetido para que sejam estabelecidos outros pontos, tais como $\theta_{0,125}$, $\theta_{0,375}$, $\theta_{0,625}$ e $\theta_{0,875}$.

e) Ao final, com os valores consistentes elicitados, procede-se uma análise estatística no intuito de se ajustar os pontos a uma distribuição de probabilidade, a qual representará a distribuição de probabilidade *a priori* do parâmetro θ .

2.4.2 Método de Martz e Waller para seleção de distribuição *Gamma a priori*

De acordo com Martz & Waller (1982), assume-se frequentemente que o tempo para uma falha segue uma distribuição exponencial de parâmetro λ . Em seu método, os autores utilizam a família de distribuição de probabilidade *Gamma* para prover modelos conjugados de distribuições *a priori* sobre λ , a serem usadas em análise bayesianas sobre confiabilidade e taxas de falhas. A seleção desta distribuição de probabilidade subjetiva é possível ao determinar valores dos parâmetros de forma (α_0) e de escala (β_0) da distribuição *a priori*, sendo a média e a variância dadas por (α_0/β_0) e (α_0/β_0^2) , respectivamente.

O método requer um especialista para estabelecer valores de percentis máximo e mínimo e, a partir desta informação, uma simples análise gráfica (ou uso de tabelas) em adição procedimentos simples de cálculo, são obtidos os parâmetros α_0 e β_0 .

O especialista deve fornecer dois valores de taxa de falhas ξ , correspondentes ao limite inferior (LI) e ao limite superior (LS) tal que

$$P(\lambda < LI) = P(\lambda > LS) = \frac{1 - p_0}{2} \quad (2.2)$$

onde p_0 deve ser igual a um dos valores 0,95, 0,90 ou 0,80, e $LI < LS$. Portanto, devem ser iguais as probabilidades de a taxa de falhas assumir um valor maior que LS ou menor que LI,

e ainda LS e LI são, respectivamente, os percentis $50(1 - p_0)\%$ e $50(1 + p_0)\%$ da distribuição de probabilidade *a priori* $\text{Gamma}(\alpha_0, \beta_0)$.

Martz & Waller (1982) justificam o procedimento dessa forma: é requerido encontrar α_0 e β_0 que satisfaçam:

$$\int_{LI}^{LS} \frac{\beta_0^{\alpha_0}}{\Gamma(\alpha_0)} x^{\alpha_0-1} \ell^{-\beta_0 x} dx = p_0 \quad (2.3)$$

Onde

$$\int_0^{LI} \frac{\beta_0^{\alpha_0}}{\Gamma(\alpha_0)} x^{\alpha_0-1} \ell^{-\beta_0 x} dx = \int_{LS}^{\infty} \frac{\beta_0^{\alpha_0}}{\Gamma(\alpha_0)} x^{\alpha_0-1} \ell^{-\beta_0 x} dx = \frac{1 - p_0}{2} \quad (2.4)$$

Faz-se $y = x / LI$ e obtém-se:

$$\int_1^{LS/LI} \frac{(\beta_0 LI)^{\alpha_0}}{\Gamma(\alpha_0)} Y^{\alpha_0-1} \ell^{-(\beta_0 LI)Y} dx = p_0 \quad (2.5)$$

Como β_0 é um parâmetro de escala, faz-se $\beta_0 = 1$, e resolve-se (2.3) para o parâmetro de forma α_0 . Então depende apenas do valor LS/LI, ou equivalentemente, do $\log(LS/LI)$. Com α_0 determinado numericamente, a equação (2.5) pode ser resolvida para um valor temporário de β_0 , por exemplo b_0 , correspondendo a um limite inferior temporário de, digamos, 1×10^{-6} f/h. Sabe-se, sendo β_0 é um parâmetro de escala, que

$$\beta_0 LI = b_0 (1 \times 10^{-6}) \quad (2.6)$$

a partir da qual

$$\beta_0 = \frac{b_0 (1 \times 10^{-6} f / h)}{LI} \quad (2.7)$$

Mesmo com a possibilidade de resolução analítica para os valores dos parâmetros α_0 e β_0 , a utilização do SAD permite introduzir à resolução procedimentos numéricos que ajudem no cálculo de expressões menos triviais, como as integrais dispostas anteriormente. Com isso, a abordagem do problema pelo modelo de Martz & Waller (1982) consolida-se como uma opção de grande aplicabilidade, de fácil entendimento e eficaz no que diz respeito ao resultado que se propõe.

2.5 Análise de Risco

De acordo com a *Society of Risk Analysis*, risco é definido como o potencial de realização de conseqüências adversas inesperadas à vida humana, à saúde, às propriedades ou ao meio ambiente, sendo a estimação desse risco geralmente baseada no valor esperado da conseqüência, obtido pela integração da distribuição de probabilidade condicional de um evento vezes os valores das conseqüências deste evento, dado que ele ocorreu (SRA, 2008). Kaplan & Garrick (1981) *apud* Luria & Aspinall (2003) estabelecem uma definição matemática de risco como uma função R dependente de três tipos de variáveis: a descrição do cenário s_i , a probabilidade p_i de ocorrência do cenário e a medida relativa das conseqüências x_i do cenário, $R(s_i, p_i, x_i)$. Estas definições estão próximas da definição clássica de risco da Teoria da Decisão, que envolve a avaliação de probabilidades e utilidades das conseqüências esperadas de determinada ação ou evento (RAIFFA, 1970; KEENEY & RAIFFA, 1976; CAMPELLO DE SOUZA, 2005).

Hokstad & Steiro (2006) tratam risco como a possibilidade de todos os eventos indesejáveis e condições que podem futuramente ocorrer (ver Tabela 2.2), relacionadas com as atividades humanas; ou seja, a possibilidade de uma futura perda de valores humanos, como a própria vida humana, natureza, produção, informação, entre outros. Ao analisar riscos, é de suma importância considerar a probabilidade do evento considerado indesejado, assim como o que irá resultar da ocorrência deste evento. A avaliação, o gerenciamento e a comunicação dos riscos constituem o processo de Análise de Risco (STRUB & FABER, 2002 *apud* KHAN *et al* (2004).

Tabela 2.2 Categorias de perdas ligadas ao risco

Categorias de perdas
Perda de vida em maiores acidentes
Perda de vida em outros acidentes
Ferimentos pessoais críticos
Doença crônica
Qualidade de vida reduzida; funcionalidade reduzida
Poluição crítica no ambiente externo
Poluição contínua no ambiente externo
Danificação de material
Perda de produção (por adiamento ou danificação)
Perda de dados/informação/conhecimento
Perda de reputação

Fonte: Hokstad & Steiro (2006)

MacGill & Siu (2005) afirmam que as características de complexidade, conflito, dinamicidade e incerteza devem ser consideradas fundamentais ao caracterizar a natureza da problemática envolvida nas questões que envolvam risco. De acordo com os autores, a complexidade atribuída à avaliação de riscos deriva em parte da natureza multidimensional das situações contemporâneas de riscos, tipicamente envolvendo dimensões técnicas, econômicas, sociais, de saúde, ecológicas, entre outras. Adiciona-se à imperfeição inerente ao processo de modelagem, a integração de diversos fatores de risco e a consideração de novas formas de incerteza, de tal forma que existe certo *trade-off* entre tornar o modelo mais fidedigno à realidade que se quer estudar e o aumentar da complexidade da análise, e conseqüentemente prejudicar a aplicabilidade do modelo (ASSMUTH, 2008).

Em particular, a avaliação de riscos vem sendo tratada a partir de várias abordagens descritas na literatura, quantitativas ou qualitativas. Na identificação de fatores e subfatores de risco, por exemplo, Dey & Tabucanon (1996) citam a possibilidade de uso de várias técnicas, desde simples entrevistas e aplicação da experiência do analista até o uso da técnica DELPHI. Melchers (2001) discute uma abordagem bastante conhecida denominada ALARP (sigla em inglês para a sentença “tão baixo quanto razoavelmente praticável”), que trabalha com regiões de risco aceitáveis, inaceitáveis, negligenciáveis e razoavelmente praticáveis.

Embora de fácil entendimento, uma abordagem baseada no ALARP pode apresentar-se inapropriada, sobretudo devido à falta de um tratamento mais estruturado quanto à subjetividade na definição das regiões de risco. Khan *et al* (2004) apresentam uma metodologia para avaliação de riscos na inspeção e manutenção de forma agregada, utilizam conceitos de tomada de decisão multiobjetivo e lógica *fuzzy*. Segundo Khan *et al* (2004), instalações reais de engenharia não podem ser projetadas e operadas com suposições de não existência de riscos. Níveis de risco aceitáveis são identificados, considerando que nem toda falha resultará numa conseqüência grave e que incidentes que ocasionem conseqüências muito sérias apenas ocorrem com uma baixa probabilidade.

Ball (2002) considera uma estrutura para Avaliação e Gerenciamento de Riscos ambientais que consiste em 3 processos paralelos, interligados e complementares: avaliação científica do risco incluindo a estimação de probabilidades, conseqüências e incertezas; o envolvimento dos *stakeholders* para entendimento da avaliação científica e definição dos aspectos que devem guiar o processo decisório; e a tomada de decisão quanto ao gerenciamento dos riscos, que se baseia na avaliação de riscos e no diálogo com os

stakeholders de modo a determinar a significância e aceitabilidade dos riscos, além de definir a estratégia de controle.

Fayerweather *et al* (1999) aplicam árvores de decisão para avaliar probabilisticamente as alternativas de risco. A partir do julgamento subjetivo de especialistas são estabelecidas probabilidades para cada evento da árvore de decisão, que indicam o quão plausível é cada alternativa. Ao final, são utilizados dados reais para o problema e realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros estabelecidos.

O gerenciamento de riscos e avaliação de impactos ambientais demonstra-se primordial devido à crescente preocupação mundial com o crescimento sustentável e redução dos impactos provenientes das atividades humanas. Uma grande quantidade de métodos vem sendo desenvolvidos, em vários países, para avaliar impactos ambientais e ajudar no gerenciamento desses riscos. De forma tradicional, podem ser destacadas algumas abordagens, tais como: métodos *ad hoc*, análise custo-benefício, lista de checagem, matriz de interação, redes de interação, simulação de sistemas dinâmicos, dentre outras (BRAGA *et al*, 2002; WESTMAN, 1985; GILPIN, 1995; IBAMA, 1995).

Park *et al* (2004) desenvolvem um modelo de avaliação de riscos baseado na determinação dos cenários de acidentes em gasodutos, das probabilidades de ocorrência destes cenários e mensuração das conseqüências em termos monetários. Zúniga-Gutiérrez *et al* (2002) propõem um modelo para avaliação de riscos de duas possíveis rotas para um gasoduto no México. Os autores estabelecem um índice de risco, considerando o custo do empreendimento, as possibilidades de danificação do gasoduto pela população local, o conjunto de atividades de agricultura e o aspecto topográfico do relevo durante as rotas.

Parte dos acidentes em gasodutos pode ser classificada como eventos extremos. Segundo Bier *et al* (1999), este tipo de evento se caracteriza pela baixa freqüência e pela severidade de suas conseqüências. Os decisores devem, portanto, estar aptos a utilizar as medidas, principalmente ao lidar com eventos extremos, que melhor representem as facetas do risco consideradas na análise (FROHWEIN *et al*, 1999). Na seção 3, será descrito um modelo para avaliação multicritério de riscos no transporte e distribuição de gás natural através de gasodutos, sendo consideradas algumas hipóteses quanto à disposição e características da malha de dutos.

3 Modelo de decisão

O Sistema de Apoio a Decisão proposto neste trabalho baseia-se no modelo proposto por Brito & Almeida (2009) para avaliar e ordenar gasodutos de acordo com uma visão multidimensional de riscos. O bom uso do modelo, inclusive por meio da ferramenta computacional, requer a compreensão de suas hipóteses metodológicas. Dessa forma, a seção 3.2. descreve o modelo de decisão utilizado pelo Sistema de Apoio a Decisão proposto. Já a seção 3.3. estabelece um procedimento, baseado nas etapas propostas no modelo, para utilização desse modelo num contexto real de aplicação da metodologia; em adição, esta sessão apresenta algumas observações ao longo da seção com o objetivo de esclarecer pontos duvidosos e propor alternativas de modelagem àquelas definidas na descrição do modelo.

3.1 Outras oportunidades de aplicação e adaptação do modelo

O modelo descrito neste trabalho é um modelo de decisão para priorização de trechos de gasodutos através da análise dos riscos aos quais tais trechos estão susceptíveis. O contexto do trabalho de Brito & Almeida (2009) possui, como pano de fundo, o contexto de gestão da manutenção, especificamente quanto à definição de ações mitigadoras de risco ao longo do gasoduto. Entretanto, o modelo não é específico ao contexto comentado pelos autores, no sentido em que pode ser adaptado a vários outros problemas relacionados às atividades de transporte de gás natural e, em geral, a diversos problemas que envolvam quaisquer tipos de dutos, tais como dutos de água e petróleo.

Além desse tipo de adaptação originada pela mudança no tipo de material transportado pelo duto, o modelo apresenta-se com considerável adaptabilidade à análises de atividades diversas que envolvam riscos. As etapas constituintes permanecem as mesmas, porém têm seu contexto de risco modificado, o que prediz que elas devem ser em parte repensadas. Por exemplo, caso se deseje avaliar os riscos de determinado número de ações de manutenção preventiva e corretiva, a partir da ocorrência de cenários de perigo (incidentes durante a ação de manutenção) e respectivas probabilidades. Neste caso as alternativas deixam de ser as seções do gasoduto, para serem as diversas ações de manutenção que devem ser realizadas numa organização.

No contexto de transporte de gás natural via gasodutos, o modelo demonstra a possibilidade de ser bastante útil para outros problemas de decisão relativos a este tipo de atividade. Uma classe de problemas que pode utilizar parte da metodologia utilizada no

modelo descrito neste trabalho é a classe de problemas na fase de projeto do gasoduto, o que envolve questões relativas à demanda pelo gás natural, em matéria do volume a ser transportado e os locais a serem atendidos, o que traz a necessidade de determinação da capacidade do duto em função do diâmetro de seu corte seccional, e principalmente, da rota que deve ser seguida pelo duto.

Tomemos como ilustração o problema de determinação da rota de um gasoduto que deve abastecer certo número de pontos de demanda, não necessariamente passando por estes pontos, mas sim sendo possível a construção de ramificações ao longo do trecho a fim de satisfazer a demanda vislumbrada. Alguns critérios devem ser levantados para avaliar as possibilidades de rotas, tais como custos de construção, operação e manutenção das alternativas e o grau de impacto da alternativa de rota sobre o desenvolvimento regional das localidades onde passará o gasoduto. Neste tipo de problema, podem ser criadas restrições tais como a necessidade de satisfazer totalmente a demanda atual e a demanda futura, de acordo com o período de vida do empreendimento, o que necessita de estudos profundos sobre o mercado do gás natural na região.

Além destas questões, existe a questão do risco que pode ser designado a cada alternativa; este risco pode e deve ser tratado segundo duas múltiplas dimensões. Como foi visto no capítulo 2, gasodutos são o meio de transporte mais utilizado para o gás natural, porém não deixa de apresentar riscos à população e ao meio ambiente, além do risco financeiro correspondente a danos materiais decorrentes da ocorrência de cenários acidentais ao longo do trecho. Nesse sentido, o modelo descrito neste capítulo é totalmente possível de ser utilizado no problema de definição de rotas para gasodutos.

É possível ressaltar ainda, a possibilidade de uso do modelo para análise de risco noutros contextos de opções de transporte do gás natural, tal como o transporte de gás natural liquefeito (GNL). Um exemplo direto de oportunidade de aplicação do modelo adaptado estaria relacionado com a análise de risco de unidades de armazenagem de GNL, esteja esta sendo feita de forma isolada ou como parte de questões mais amplas, tal como a determinação de localização destes terminais, tipicamente de grande porte.

Por fim, o potencial de aplicação do modelo, seja na íntegra ou de forma adaptada, é especialmente amplo; tanto pela necessidade de análise e definição de ações mitigadoras de risco como pela flexibilidade de uso da metodologia. Como oportunidades para extensão do uso do modelo em diversas áreas, ainda pode-se destacar, afora as já comentadas nesta seção: avaliação de riscos em unidades de distribuição de GLP – Gás Liquefeito de

Petróleo; Análise de riscos em unidades de exploração e produção de petróleo e gás natural, tais como plataformas marítimas e sondas terrestres; análise de riscos em plantas de produção.

Além das possibilidades de diferentes adaptações, seja na problemática tratada como na estrutura geral do modelo, não devem deixar de serem citadas algumas oportunidades de utilização dos resultados observados quando da efetiva utilização do modelo proposto por Brito & Almeida (2009). Uma dessas opções é, a partir dos valores em cada dimensão de risco avaliada nos trechos do gasoduto, serem desenvolvidas análises sob o enfoque do Apoio Multicritério à Decisão através dos vários modelos descritos na literatura, já destacados no capítulo anterior. É oportuno, antes de realizar este tipo de adaptação, averiguar se a possibilidade de adaptação é metodologicamente viável, pois para avaliar e mensurar cada dimensão de riscos é necessária uma abordagem probabilística, pois o problema tratado é essencialmente estocástico.

Surge como boa opção a possibilidade de dar maior flexibilidade à escolha do procedimento de agregação multiobjetivo que deve ser utilizado para avaliar conjuntamente as dimensões de risco trabalhadas. Ainda mais, pode-se adaptar o modelo em relação à problemática do AMD com a qual ele está relacionado, em função do contexto do problema e identificação clara do tipo de decisão que se espera para a situação.

3.2 Descrição do modelo

Numa realidade de recursos escassos, seja o tempo, o custo ou outras restrições técnicas, torna-se inviável coordenar ações mitigadoras semelhantes nos diversos trechos de gasodutos. Deve existir uma forma estruturada para avaliar os níveis de risco característicos de cada trecho, de forma a destinar uma maior quantidade de recursos àqueles que sejam considerados mais críticos, aos olhos do decisor, com base nas diferentes dimensões de risco.

O modelo de decisão tratado neste trabalho tem como objetivo permitir a ordenação dos trechos de gasodutos numa hierarquia de riscos multidimensionais. O problema é bem definido, no sentido em que tanto já se conhece o contexto do problema de decisão como já foram definidos o propósito e objetivos do modelo, além das dimensões de risco a serem abordadas. Tais dimensões de riscos compreendem riscos humanos, financeiros e ambientais decorrentes da utilização dos trechos ou gasodutos sob análise. Uma hierarquia apresenta-se, portanto, como *insight* ao processo de gerenciamento de riscos em gasodutos e à definição de ações mitigadoras de risco a serem realizadas em função dos riscos associados a cada trecho.

Brito & Almeida (2009) apresentam e discutem o fluxograma da Figura 3.1, contendo as etapas para implementação do modelo. A seguir, serão descritos os conteúdos dessas etapas, em que elas consistem e quais as relações com as demais etapas do modelo.

Esta descrição irá abordar pontos gerais estabelecidos por Brito & Almeida (2009), assim como alguns comentários adicionais relacionados ao modelo e ao SAD proposto neste trabalho. Nesse sentido, ressalta-se a proposta do SAD não deve se restringir e considerar imutáveis as etapas do modelo a serem descritas: a evolução do modelo de decisão deve fazer parte do processo adaptativo de construção do sistema em destaque, de modo que etapas podem ser inseridas ou excluídas do modelo, assim como modificadas em seu conteúdo.

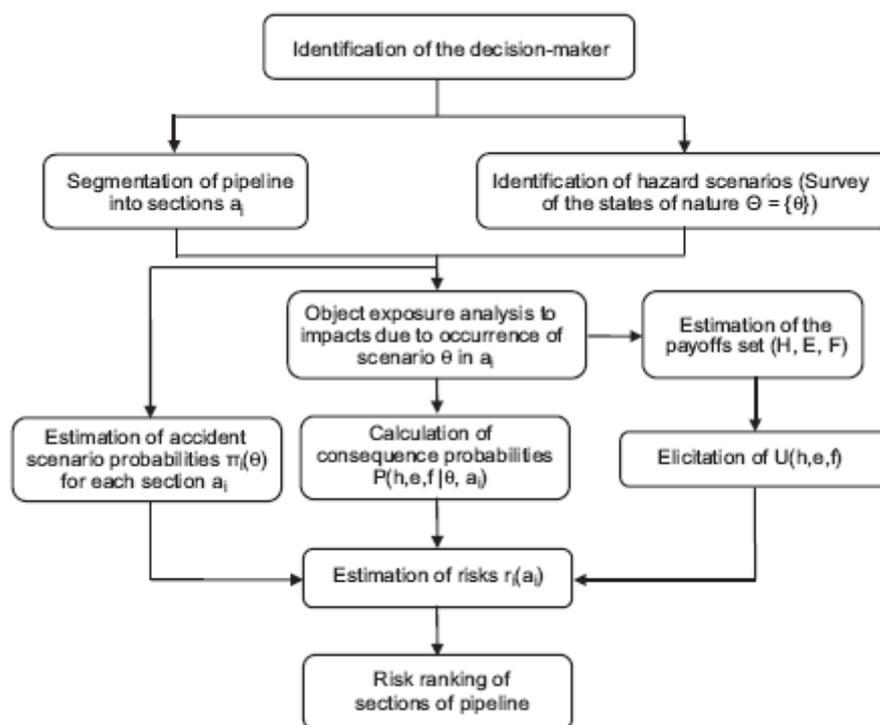


Figura 3.1 Estrutura do modelo de decisão (Fonte: Brito & Almeida, 2009)

3.2.1 Identificação do decisor

Nesta primeira etapa, deve ser estabelecido o decisor, a pessoa que terá o poder de decidir e cuja estrutura de preferências deverá ser adotada. Segundo Campello de Souza (2005) a tomada de decisão deve ser uma consequência lógica daquilo que se quer (preferências), do que se sabe (grandezas envolvidas e as relações entre elas) e daquilo que pode fazer (alternativas de ação). São os julgamentos de valor realizados pelo decisor que serão utilizados no processo elicitação preferências e construção das funções utilidades.

A proposta inicial do modelo é a utilização de apenas um decisor, tipicamente o gestor de operações, manutenção ou segurança do gasoduto. Os julgamentos de valor do decisor são influenciados pelos seus próprios valores e pela incorporação, por parte dele, dos valores de *stakeholders* envolvidos. Como foi afirmado na seção 2.1.1, a influência de vários *stakeholders* é determinante nas decisões em situações contemporâneas de riscos. Existem, entretanto, situações em que se faz necessário a inclusão, de forma mais direta, das preferências de vários outros decisores. Tais situações caracterizam-se como processos de Decisão em Grupo e, particularmente, no contexto de avaliação de riscos em gasodutos podem ser citados três atores possivelmente envolvidos neste processo: representante da empresa de gás natural; representante do governo, possivelmente de algum órgão regulador das atividades relacionadas ao transporte, distribuição e comercialização de gás; representante da comunidade onde estão localizados os trechos de gasodutos identificados.

A escolha ou identificação do decisor deve ser cautelosa, pois tal definição influencia de forma cabal todo o processo decisório subsequente. Desta maneira, em estudos de análise de risco e, principalmente, de análise de risco em atividades de grande impacto social e econômico como o transporte de gás natural via gasodutos, é fundamental a correta definição do decisor. Este deve possuir ampla visão e conhecimento do contexto da decisão e entender as necessidades dos vários *stakeholders* envolvidos. Porém, acima de tudo, devem estar motivados a cooperar no processo decisório, a fim de que possam contribuir não só através da elicitación de preferências, mas também fornecendo e recebendo *insights* durante todo o processo.

Caso o modelo proposto por Brito & Almeida (2009) seja adaptado para um processo de tomada de decisão em grupo, é mister a identificação cuidadosa das partes que possuirão decisores no contexto da decisão em grupo. Isso implica que, além da correta definição do decisores (indivíduo ou entidade) de cada parte interessada representada no grupo de decisão, é imprescindível uma pré-avaliação que culmine na indicação de quais partes interessadas terão seus valores avaliados de forma direta, ou seja, quais serão efetivamente contempladas com a presença de seus representantes como membros do corpo de decisores.

A identificação e definição do decisor ou decisores aos quais uma decisão está sob responsabilidade acontece, tipicamente, antes da aplicação do modelo de decisão. Isso normalmente ocorre por questões naturais do processo de gerenciamento nas empresas de transporte de gás, onde estão bem definidas as atribuições dos funcionários, as atividades sob

sua responsabilidade e nível hierárquico no qual se encontra. Nesse sentido, propõe-se a retirada desta etapa do modelo de decisão apresentado.

A primeira etapa do modelo passa a ser a etapa de identificação de cenários de perigo, seguida da segmentação do gasoduto em seções, diferentemente da proposta de Brito & Almeida (2009) para realização em paralelo destas etapas. A razão para esta mudança envolve a definição prévia de cenários de perigo a serem trabalhados, embora o conjunto destes cenários de perigo possa ser modificado durante o uso do modelo. A separação dos trechos avalia, dentre outros fatores, as situações de risco às quais estão susceptíveis os trechos do duto e, por isso, deve suceder a identificação dos cenários. Mesmo em situações onde o gasoduto já está previamente segmentado pela administração da organização e que, porventura, tenham sido considerados características de risco para tal segmentação, alterações decorrentes do conjunto de cenários formado podem ser introduzidas para uma reavaliação da individualização dos trechos.

3.2.2 Divisão do gasoduto em trechos

A segunda etapa consiste na individualização das seções ou trechos do gasoduto sob estudo. Para definir os segmentos de uma rede, deve-se observar a uniformidade de características em aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais do trecho e, ao final, o modelo prevê a obtenção de um conjunto discreto $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ das seções definidas do duto, consideradas o conjunto de alternativas no modelo de decisão.

A uniformidade dos trechos é requerida de modo a facilitar, numa fase posterior à utilização do modelo, a definição de ações mitigadoras condizentes com a realidade de cada seção individualizada. Ainda assim, o método de cálculo do risco deste modelo pode ser empregado para avaliar trechos de grande extensão, possivelmente heterogêneos de acordo com a natureza das características abordadas. A avaliação de alternativas de rotas de gasodutos, que interliguem o fornecimento do gás entre um ponto de demanda e um ponto de suprimento assim como abasteçam instalações ao longo do trecho, pode considerar o risco total ao longo das alternativas, cada alternativa, por sua vez, formada por vários trechos menores.

3.2.3 Identificação de cenários de perigo

A identificação de cenários de perigo consiste, fundamentalmente, na descrição de todos os possíveis cenários resultantes de vazamentos acidentais durante a operação do duto e do

cenário sem vazamento. Esses diversos 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 .

A ocorrência de cenários resultantes de vazamentos acidentais tem como característica o fato de resultar em perdas, que neste modelo são avaliadas de acordo com múltiplas dimensões de risco consideradas. Os cenários de perigo, portanto, não condizem aos modos de falha operacional ou causas de acidentes, mas sim aos fenômenos ou acidentes associados ao gás natural, decorrentes de vazamentos no gasoduto, ocorrência de falhas operacionais, entre outros. Brito & Almeida (2009) expõem a Figura 3.2, contendo os cenários de perigo resultantes da ocorrência de furos ou rupturas no gasoduto.

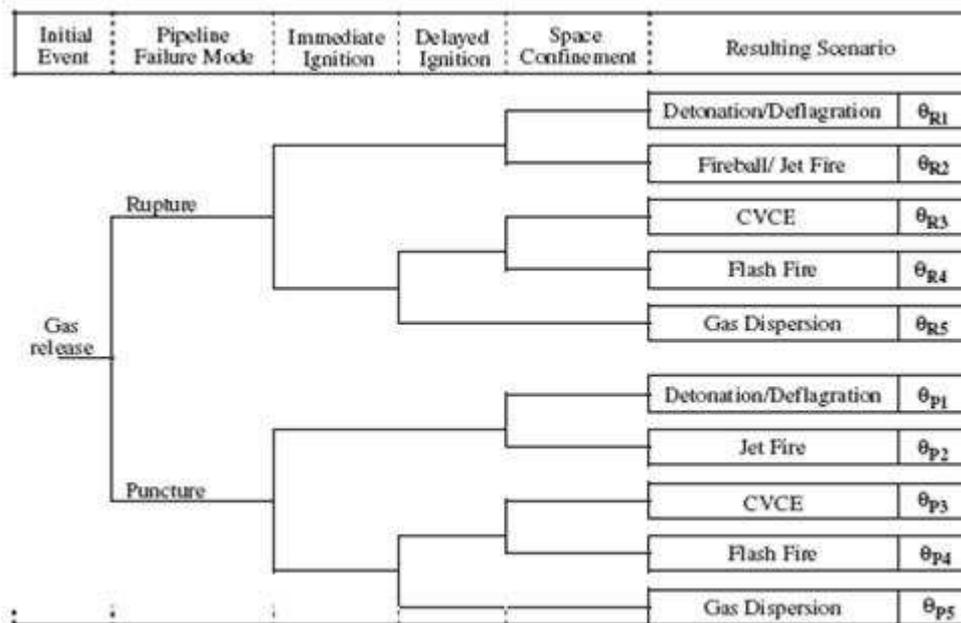


Figura 3.2 Cenários de perigo considerados no modelo (Fonte: Brito & Almeida, 2009)

Existem vários mecanismos probabilísticos influenciadores da ocorrência e da magnitude com que ocorrem estes cenários, tais como o tipo de acidente que deu origem ao cenário, o sistema de controle e as barreiras de proteção presentes no trecho, fatores climáticos, etc. Tais mecanismos interferem na probabilidade de ocorrência destes cenários perigosos e, conseqüentemente, na probabilidade de ocorrência das conseqüências negativas ou perdas associadas às dimensões de risco.

3.2.4 Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais

A estimação das probabilidades de cenários acidentais estipulados na primeira etapa é realizada de modo a obter uma distribuição de probabilidade *a priori*, $\pi_i(\theta)$, para cada trecho

i estabelecido. Isso ocorre devido às particularidades de cada trecho, tanto em relação às características do ambiente e da região onde ele se encontra como às condições técnicas sob as quais a empresa trabalha neste trecho.

3.2.5 Análise de exposição dos objetos de impacto

Esta etapa tem o objetivo de analisar a exposição de objetos a impactos decorrentes dos cenários perigosos previamente identificados, análise esta comumente realizada através do uso de modelos matemáticos e ferramentas computacionais especializadas. É preciso determinar uma área de perigo para cada trecho do gasoduto, em função da relação entre a ocorrência dos cenários de perigo e os possíveis impactos causados nas redondezas do local do acidente, de modo a delimitar a região de impacto dos acidentes e facilitar a estimação das conseqüências humanas, ambientais e financeiras.

Portanto, a definição da área de perigo atrelada a um trecho a_i depende das particularidades do trecho, tais como as características já levantadas quando da delimitação das seções do gasoduto, assim como do ambiente no qual o trecho está inserido. Destaca-se que a definição da área de perigo é de suma importância para avaliação de riscos neste modelo, pois afeta diretamente a magnitude do *range* entre os elementos do conjunto de *payoffs* e, conseqüentemente, na determinação das constantes de escala e elicitação das funções utilidade.

3.2.6 Estimação do conjunto de *payoffs* (H, M, N)

Após o estabelecimento das áreas de perigo para cada seção, parte-se para a definição do conjunto de conseqüências humanas, ambientais e financeiras que serão incluídas na análise do modelo. De acordo com Brito & Almeida (2009), análises de vulnerabilidade são normalmente realizadas no intuito de obter as possíveis conseqüências devido ao calor e à energia emanados do gás superaquecido, chamas, ou explosões. Os autores defendem a adoção de valores relacionados à combinação de fatores mais pessimista em cada dimensão de conseqüência.

A proposta deste modelo procura avaliar riscos considerando três principais dimensões de risco na distribuição e transporte de gás natural via gasodutos: Riscos sobre seres humanos (R_h), Riscos Financeiros (R_m) e Riscos Ambientais (R_n). As razões para considerar estas dimensões como primordiais baseiam-se nos sistemas de valores normalmente encontrados tanto nas organizações produtivas como nas demais organizações ou instituições envolvidas,

traduzidos em princípios de responsabilidade social e ambiental e em aspectos éticos na relação humana, e que devem influenciar as ações da empresa na tentativa de alcançar o aspirado retorno financeiro.

O conjunto de conseqüências humanas, H , é comumente analisado como aspecto crítico na análise de risco e pode envolver aspectos físicos, sociais e psicológicos; seus elementos são essencialmente subjetivos e praticamente impossíveis de serem descritos em termos monetários. Jo & Ahn (2005) descrevem R_h como riscos de ferimentos ou fatalidades que podem ocorrer, em maior ou menor grau, à população residente, transeunte, aos trabalhadores que a realizam a operação ou manutenção do gasoduto, e às demais pessoas que estejam na área circunvizinha ao trecho em que ocorra um incêndio ou explosão decorrente de um vazamento de gás natural. Brito & Almeida (2009), de modo conservador, assumem que as conseqüências associadas a esta dimensão de risco são estimadas pelo número de pessoas atingidas fisicamente devido a um determinado cenário acidental, apresentando ao menos queimaduras de segundo grau, não necessariamente pelo número de fatalidades ocorridas. Considera-se que devem ser evitados quaisquer tipos de danos à população.

A segunda dimensão de conseqüências, M , envolve todos os possíveis danos ao meio ambiente causados pelos possíveis cenários acidentais provenientes de vazamentos em gasodutos (Zúniga-Gutiérrez *et al*, 2002), normalmente limitadas aos incêndios e queimadas em áreas de vegetação. Da mesma forma que os riscos sobre seres humanos, os riscos ambientais são bastante subjetivos e de difícil monetarização; a queima de vegetação afeta a integridade de espécies animais e o desequilíbrio da biodiversidade numa determinada área não pode ser expressa em índices monetários. Ademais, o aumento da rigidez na legislação ambiental contemporânea acarreta uma maior preocupação das organizações quanto aos fatores ambientais ligados à realização de suas atividades. O modelo utiliza como medida para as conseqüências ou *payoffs* ambientais, o tamanho em metros quadrados da área de vegetação destruída, considerado razoavelmente relacionado com a extensão dos impactos ambientais causados por este tipo de acidente.

Por último, tem-se o conjunto N de conseqüências financeiras, constituído pelo desembolso monetário, por parte da companhia de gás, causados pelo cenário acidental. Esta soma é composta pelos desembolsos devido ao faturamento cessante, multas contratuais por interrupções no fornecimento, multas e demais ressarcimentos por ocasionar danos à pessoas, ao meio ambiente ou a organizações e empresas, além dos gastos decorrentes da realização de manutenção do trecho acidentado e volta à normalidade operacional. Restringir as

conseqüências financeiras aos desembolsos realizados pela companhia de gás torna-se possível caso se considere que a companhia está comprometida em assumir toda responsabilidade que lhe é cabida referente à atividade de transporte de gás natural via gasodutos.

É importante destacar que a inclusão de indenizações às pessoas físicas prejudicadas, por ocorrência de ferimentos graves e fatalidades, não é redundante com a estimação dos elementos de H , muito menos é uma tentativa de monitorizar as conseqüências da dimensão humana de risco; esses tipos de conseqüências manifestam-se sob perspectivas diferentes: a mesma conseqüência (por exemplo, uma fatalidade) implica numa perda na dimensão humana mas também implica pagamento de indenizações, podendo trazer complicações ou até a inviabilização financeira da organização, a depender da magnitude do evento acidental.

3.2.7 Elicitação da função utilidade multiatributo

Esta etapa corresponde à elicitação da função utilidade multiatributo $U(h,m,n)$. Considera-se $U(h,m,n)$ uma função utilidade aditiva, tipicamente encontrada inclusive no contexto de problemas de manutenção. A propriedade de independência aditiva de $U(h,m,n)$ implica a existência de independência preferencial entre os conjuntos de *payoffs* H , M , e N . Dessa forma, segue que:

$$U(h, m, n) = k_h U(h) + k_m U(m) + k_n U(n) \quad (3.1)$$

onde $U(h)$, $U(m)$ e $U(n)$ são as utilidades unidimensionais para as dimensões de risco abordadas e as constantes “ k ” são constantes de escala estimadas a partir de um procedimento de elicitação baseado na comparação entre loterias de *payoffs*, e $k_h + k_m + k_n = 1$ (KEENEY & RAIFFA, 1976).

3.2.8 Cálculo das probabilidades das conseqüências $p(h, m, n | \theta, a_i)$

A etapa seguinte do modelo é o cálculo das distribuições de probabilidade das conseqüências de cada par formado por um cenário e um trecho do gasoduto. Conforme Brito & Almeida (2009), já que o raio das áreas de perigo envolvidas em cenários de acidente cobre normalmente dezenas de metros, principalmente pelos dutos de pequeno diâmetro e baixa pressão utilizados, então serão cobertas apenas áreas com uso específico do solo. Em outras palavras, quando avaliamos trechos do duto não há correlação estatística entre danos humanos, ambientais e financeiros; diferentemente, por exemplo, de uma plataforma marítima

de extração de petróleo, cujos danos provenientes de cenários acidentais estão claramente correlacionados.

Com isto, admite-se neste modelo que as conseqüências humanas, ambientais e financeiras ocorrerão numa forma aleatória e independente, com correlação insignificante, ocasionando que as probabilidades $P(h|\theta, a_i)$, $P(m|\theta, a_i)$ e $P(n|\theta, a_i)$ podem ser estimadas separadamente. De modo a fornecer maior liberdade quando da aplicação do modelo em diversas situações, tais probabilidades podem ser representadas pelas respectivas funções de densidades de probabilidade $f(h|\theta, a_i)$, $f(m|\theta, a_i)$ e $f(n|\theta, a_i)$.

A determinação das distribuições de probabilidade das conseqüências está atrelada às considerações feitas durante a etapa de determinação dos objetos expostos aos cenários de perigo. Em ambas as dimensões de risco, os mecanismos probabilísticos das conseqüências envolvem o fluxo de calor, magnitude das chamas e possíveis explosões, eficiência da segurança da empresa de gás e as características do ambiente envolto ao duto, todas elas dependentes das características do trecho acidentado.

Esta etapa, assim como àquela descrita na seção 3.1.5, requer um trabalho computacional árduo de simulação e o envolvimento de especialistas das áreas de conhecimento envolvidas, tais como transmissão de calor, sistemas probabilísticos e engenharia de segurança.

3.2.9 Estimação dos riscos $r(a_i)$

A determinação do risco de cada trecho é desenvolvida a partir da definição de risco da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), exposta na seção 2.3. Dessa maneira, é obtida, primeiramente, a perda L estimada para cada cenário acidental e seção atingida:

$$L(\theta, a_i) = - \int_H \int_M \int_N f(h, m, n | \theta, a_i) U(h, m, n) df dm dn \quad (3.2)$$

Devido às propriedades das funções usadas neste modelo, de independência aditiva da função utilidade multiatributo e de independência em probabilidade das distribuições de probabilidade sobre as conseqüências, define-se, baseado na fórmula 2.1, o risco r para cada trecho:

$$r(a_i) = \sum_{\theta} \pi_i(\theta) \left\{ - \left[\begin{array}{l} \int_H f(h|\theta, a_i) k_h U(h) dh \\ + \int_M f(m|\theta, a_i) k_m U(m) dm \\ + \int_N f(n|\theta, a_i) k_n U(n) dn \end{array} \right] \right\} + (-1) \pi_i(\theta_N) \quad (3.3)$$

onde $\pi_i(\theta_N)$ corresponde à probabilidade do cenário de normalidade operacional θ_N e o valor (-1) multiplicado por $\pi_i(\theta_N)$ é a perda atrelada ao cenário θ_N , ou seja, a perda no cenário de normalidade, sem danos. O valor negativo é resultante da própria definição de perda na Teoria da Utilidade e Teoria da Utilidade Multiatributo. Para maiores detalhes sobre o cálculo da fórmula 3.3, consultar Brito & Almeida (2009).

3.2.10 Ordenação dos trechos de gasodutos em medida de risco

De acordo com os valores do risco $r(a_i)$, obtidos a partir da equação 3.3, os trechos de gasoduto podem ser ordenados de forma descendente tais que forma-se um *ranking* dos trechos analisados. Espera-se, então, que este *ranking* contribua para as atividades de gerenciamento de riscos.

Brito & Almeida (2009) afirmam que, considerando restrições financeiras, técnicas e de mão-de-obra, o *ranking* obtido ajuda a priorização das seções mais críticas do gasoduto de forma a destinar uma maior quantidade de recursos para ações mitigadoras àqueles trechos considerados mais críticos aos olhos do decisor, cujas preferências foram incorporadas ao longo do desenvolvimento do modelo, com base nas diferentes dimensões de risco.

3.3 Procedimento para utilização do modelo

Nesta seção, serão discutidas algumas ações para utilização do modelo de decisão descrito na seção 3.1, no intuito de estruturar um procedimento de aplicação do modelo. O foco do trabalho de Brito & Almeida (2009) está na utilização da estrutura axiomática da MAUT na avaliação multidimensional ou multicritério de riscos. Contudo, várias atividades inclusas nas etapas da Figura 3.1 apresentadas pelos autores, e brevemente comentadas no presente trabalho, necessitam ser enfatizadas de modo a garantir a operacionalização do modelo. A apresentação e a discussão dessas ações, em adição à descrição já feita, fazem-se necessárias para uma aplicação eficaz e eficiente do modelo. Esta está relacionada com o modo com que devem ser realizadas as ações ou atividades durante as etapas do modelo, enquanto que aquela engloba a garantia da realização destas ações, de modo a garantir o cumprimento dos objetivos estipulados para o modelo.

Didaticamente, as atividades relacionadas com as etapas do modelo, serão relatadas utilizando estrutura de tópicos semelhante à da seção 3.2. A adoção de conjunto dessas atividades consiste num Manual Preliminar de procedimentos para utilização do modelo

proposto (LOPES & ALMEIDA, 2008). Tal Manual foi concebido conforme o que será descrito nas próximas seções e está em fase de testes por uma equipe do GPSID – Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão.

3.3.1 Identificação de cenários de perigo

Como proposto na seção 3.1.1 esta etapa deve ser a primeira etapa do modelo. Identificar e definir os cenários de perigo considerados para avaliação do risco influi diretamente na mensuração do risco de cada trecho. Aconselha-se, portanto, aliado ao uso de um eventual banco de dados estruturado na empresa fornecedora de GN, a realização de pesquisas em publicações especializadas e em bancos de dados de grandes instituições envolvidas no contexto de cenários acidentais envolvendo o gás natural. Deve-se, ainda, realizar uma avaliação comparativa entre a estrutura operacional da empresa em questão e a estrutura daquelas com as quais está sendo comparada.

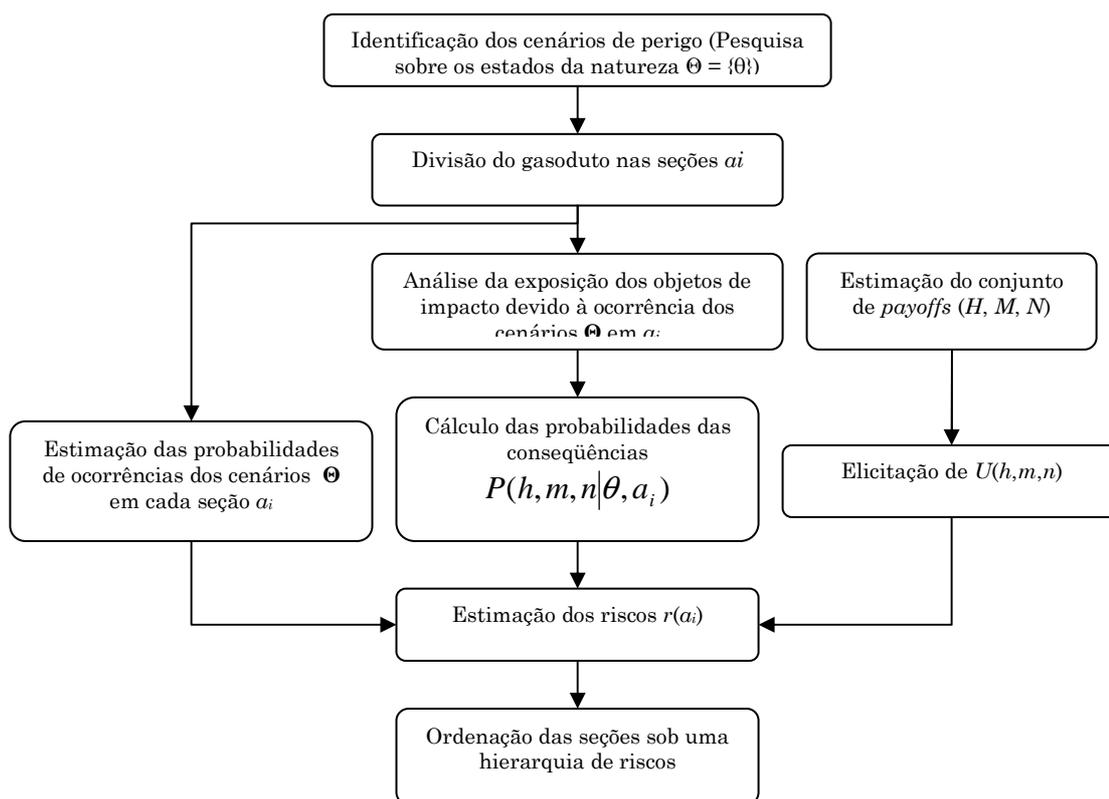


Figura 3.3 Proposta de adaptação do modelo (Fonte: o Autor)

Esta identificação dos cenários de perigo deve exaurir o maior número viável de cenários, pois a natureza destes influenciará o cálculo das perdas e respectivos riscos, sendo responsáveis por grande parte da fidedignidade da aplicação do modelo a determinado contexto. Como sugestão, foi apresentada a Figura 3.2, retirada de publicações especializadas

da área (SKLAVOUNOS & RIGAS, 2006). Caso haja necessidade de serem consideradas situações diferentes das já sugeridas, é possível realizar outras análises, tais como Análise Preliminar de Perigo (APP), *Hazard and Operability Studies* (HAZOP) ou Análise *What-if*. Essas metodologias são comumente abordadas para o estudo e análise de risco, envolvendo desde a caracterização e descrição das instalações e do ambiente até o cálculo de índices e posteriores procedimentos de classificação de risco.

Nesse sentido, a sugestão feita acima se refere ao uso destas metodologias como auxílio às fases qualitativas das etapas no modelo de Brito & Almeida (2009), sobretudo durante a identificação de cenários de perigo, análise de exposição dos objetos de impacto e determinação do conjunto de *payoffs* envolvidos.

Da mesma forma do conjunto de alternativas, o conjunto de estados da natureza propostos por Brito & Almeida (2009) tem natureza discreta, $\Theta = \{\theta_{12}, \theta_{13}, \dots, \theta_{21}, \theta_{22}, \dots, \theta_{jk}\}$, relacionados ao modo de falha j e ao cenário de perigo resultante k . Nesse sentido, acredita-se que não é viável o uso do conjunto Θ de forma que possua elementos de natureza contínua, ou seja, que para cada cenário identificado, suas características tais como magnitude e duração, variassem continuamente ao longo do trecho. Além disso, não está prevista a ocorrência simultânea de dois cenários identificados na árvore de eventos identificada (Figura 3.2).

Ressalta-se, mais uma vez, que os cenários de perigo, não são modos de falha operacional ou causas de acidentes, mas sim fenômenos ou acidentes associados ao gás natural e decorrentes de vazamentos no gasoduto, ocorrência de falhas operacionais, etc. Esta distinção é de grande relevância para correta aplicação do modelo devido a sua relação direta tanto com o estabelecimento dos objetos de exposição como na determinação dos mecanismos probabilísticos envolvidos e estimação das probabilidades relacionadas.

3.3.2 Divisão do gasoduto em trechos

Nesta etapa, é imprescindível avaliar a uniformidade de algumas características durante a definição e individualização dos trechos a serem avaliados, tais como: diâmetro, pressão, idade, área de localização, acessibilidade, capacidade técnica de manutenção ou supervisão, além de outros aspectos considerados relevantes para a companhia de gás; de maneira que, a cada mudança em qualquer um destes fatores, um novo trecho de gasoduto seja individualizado. Esse cuidado na definição dos trechos é imprescindível para que seja obtida uma hierarquia correta de riscos de trechos de gasodutos, e conseqüentemente, que sejam

definidas ações mitigadoras condizentes com a realidade dos trechos analisados em virtude dos riscos envolvidos no transporte do gás natural através desses dutos.

O conjunto de alternativas a ser obtido é um conjunto discreto $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ das seções definidas do duto, consideradas o conjunto de alternativas no modelo de decisão. Outrora, o conjunto A pode ser definido como um conjunto contínuo, onde as alternativas formariam todo o comprimento do gasoduto avaliado. Dessa forma, há a necessidade de definir também continuamente as funções consequência nas dimensões de risco consideradas.

3.3.3 Estimação das probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais

Antes de iniciar a discussão da presente etapa, é considerável atentar para a definição de cenário acidental, ou cenário perigoso, encontrada na descrição da seção 3.2.3. Tal definição dita completamente os esforços na estimação das probabilidades $\pi_i(\theta)$, pois direciona a busca pelos dados condizentes aos eventos de interesse e também as formas de abordagem ao especialista durante uma possível elicitación de conhecimento *a priori* de especialistas. Em outras palavras, é preciso entender do que se deseja estimar probabilidades.

Brito & Almeida (2009) utilizam como ponto de partida dados que diferenciam os cenários acidentais de acordo com o modo de falha que o originou (condizente com os cenários da Figura 3.2) disponibilizados pela EGIG (*European Gas Pipeline Incident Data Group*) e por publicações especializadas (Sklavounos & Rigas, 2006; Dziubnski *et al*, 2006). Inicialmente, os autores assumem uma probabilidade de vazamento de gás de 0,00041/km ano, probabilidade esta ajustada; esta fração representa uma proporção, uma taxa λ de ocorrência de um vazamento num percurso de um quilômetro e em um ano, não como uma medida de probabilidade. Em decorrência da definição de λ , as probabilidades $\pi_i(\theta)$ também possuem caráter de taxas de ocorrência, de modo que a taxa de ocorrência de um cenário acidental θ_{jk} no trecho i durante um ano é λ_{ijk} . Com isto, é necessário reavaliar o uso de dados desta natureza para estimação das probabilidades dos cenários acidentais, ou ainda implementar ajustes no modelo de Brito & Almeida (2009) durante os procedimentos de cálculo posteriores a presente etapa. Mais adiante, na seção 3.2.9, será apresentada uma forma alternativa para o uso dos dados da natureza dos dados da EGIG utilizados.

A estimação das probabilidades $\pi_i(\theta)$ pode ser realizada de formas diferentes: a partir da estatística tradicional (freqüentista), a partir da abordagem *bayesiana* da probabilidade. Esta tem caráter subjetivo e baseia-se num processo estruturado de elicitación do

conhecimento *a priori* de especialistas (RAIFFA, 1970; MARTZ & WALLER, 1982; CAMPELLO DE SOUZA, 2005); já aquela tem como condição *sine qua non* a existência de dados históricos, nem sempre disponíveis, sobre os cenários acidentais considerados (CRAWLEY *et al*, 2003). Desse modo, a estimação destas probabilidades é passível de imperfeições, seja qual for a forma de estimação escolhida. A incerteza externa relativa à estimação das probabilidades provoca uma incerteza interna ao processo de decisão; o decisor pode, então, apresentar hesitações quando questionado sobre suas preferências quanto às medidas de risco, na definição de parâmetros do modelo de decisão para avaliação das alternativas (CAVALCANTE & ALMEIDA, 2007).

As duas visões sobre a estimação das probabilidades $\pi_i(\theta)$ podem ser combinadas, na tentativa de usufruir das vantagens de cada visão, utilizando-as de formas complementares. Esse tipo de abordagem é apropriado para a situação de uso dos dados da EGIG, que podem ser distinguidos por modo de falha que ocasionou o acidente. Tomando por base o valor inicial fornecido, pode-se realizar vários procedimentos de elicitação, no intuito de especificar melhor as probabilidades dos cenários acidentais de acordo com as características que representam os trechos sob análise, respeitando as especificidades de cada caso.

São encontrados na literatura vários procedimentos de elicitação do conhecimento (RAIFFA, 1970; MARTZ & WALLER, 1982; BERGER, 1985). A seguir, será ilustrada a contextualização dos métodos descritos no capítulo 2. Primeiramente, analisemos a aplicação do método das probabilidades equiprováveis (RAIFFA, 1970) para elicitar a distribuição de probabilidade *a priori* sobre o valor da taxa λ de ocorrência de cenários acidentais.

Considere um evento de interesse λ uma taxa de falhas, de cujo valor se pretende obter uma distribuição de probabilidade. Devem ser seguidas as etapas, fielmente, as etapas descritas na seção 2.4.1. Analogamente, caso seja utilizado o método de Martz e Waller (1982, o especialista deve fornecer dois valores de taxa de falhas λ , correspondentes ao limite inferior (LI) e ao limite superior (LS). Os valores exatos são estabelecidos pelo procedimento de cálculo da seção 2.4.2.

3.3.4 Análise de exposição dos objetos de impacto

Basicamente, a análise de exposição dos objetos de impacto consiste da definição da zona ou área de perigo atrelada um trecho, o que depende das magnitudes e severidades dos cenários acidentais considerados. O fator de maior influência nesta definição é o grau de intensidade ou raio de ação de possíveis reações térmicas ligadas aos cenários acidentais, que

dependem das características do gás e do trecho do duto em questão, tais como: velocidade do fluido, área da seção do duto, material do duto, condições ambientais da região onde está localizado o gasoduto, dentre outras. Conservadoramente, pode-se utilizar para cada trecho a maior zona de perigo encontrada, aceitando cenários mais pessimistas de impacto.

Procedimentos detalhados para o cálculo da área ou zona de perigo em cada trecho estão detalhados nos trabalhos de Arnaldos *et al* (1998), Jo & Ahn (2002), Dziubinski *et al* (2006) e Sklavounos & Rigas (2006).

3.3.5 Estimação do conjunto de *payoffs* (H, M, N)

O ponto primordial para estimar o conjunto de *payoffs* nas três dimensões de risco é a avaliação quanto à vulnerabilidade humana, ambiental e financeira das áreas ou zonas de perigo previamente definidas. Então, depois de delimitada a área ou zona de perigo, estima-se os elementos pertencentes aos conjuntos H , M e N , com base na descrição feita em 3.1.6 acerca da natureza dos elementos de cada conjunto de *payoffs*.

Para a dimensão humana, segundo Brito & Almeida (2009), deve ser utilizado o número de pessoas presentes na área de perigo, com base na densidade demográfica da região onde se encontra o trecho. Esse número constitui o número máximo de pessoas que poderiam susceptíveis à ocorrência de qualquer cenário perigoso.

Uma alternativa diferente para determinação do conjunto H é considerar de forma diferenciada a ocorrência de fatalidades e de ferimentos graves. Para isto, pode-se lançar mão de dados históricos ou conhecimento de especialistas a respeito da relação proporcional entre as ocorrências desses dois tipos de conseqüências, quando da ocorrência dos cenários de perigo. Há ainda a possibilidade de avaliar separadamente os danos físicos, que ocasionem ou não fatalidades. O *payoff* h não é mais considerado como o número esperado de pessoas atingidas, mas sim como um vetor (h_1, h_2) , onde h_1 é o número esperado de fatalidades e h_2 é o número esperado de pessoas que sofram danos físicos não fatais, tais como queimaduras e danos à visão. Outra oportunidade, tão interessante como de difícil análise, é incorporar à avaliação de conseqüências ao homem os danos psicológicos provenientes destes cenários de perigo.

Na segunda dimensão de conseqüências, M , o conjunto de bens não é discreto como H , mas sim contínuo. De novo, a partir da zona de perigo, avalia-se a área de vegetação susceptível a danos. Um desenvolvimento do modelo apresentado pode ocorrer com a inclusão de um fator w_{ijk}^m para ponderar a importância da conseqüência ambiental no referido

trecho i decorrente do cenário acidental k causado pelo modo de falha j . Em gasodutos de grandes extensões, a área ambiental circunvizinha aos trechos pode apresentar-se bastante diversificada trecho a trecho, seja na questão fundamentalmente ecológica da diversidade de flora e fauna característica da região como na importância dada pela comunidade a determinadas áreas ecológicas, tais como reservas florestais e *habitats* de espécies em extinção.

É possível, em caráter alternativo, desenvolver o modelo por meio da divisão das conseqüências ambientais em termos de suas magnitudes e de suas severidades. A magnitude está ligada à extensão da área atingida, enquanto que a severidade engloba questões relacionadas à gravidade da conseqüência, como a biodiversidade da área susceptível ao dano. O *payoff* m se transformaria num vetor (m_1, m_2) onde m_1 representaria a magnitude do impacto através da área de vegetação atingida e, por sua vez, m_2 avaliaria a severidade por meio de um índice de diversidade ambiental, como o índice de Margalef (HAMILTON, 2005), para a área ambiental presente na zona perigosa do trecho em questão.

Por fim, tem-se o conjunto N de conseqüências financeiras, onde o *payoff* ou bem n corresponde ao valor da soma de todos os desembolsos monetários, por parte da companhia de gás, causados pelo cenário acidental. Já foram frisadas de forma geral, na seção 3.2.6, algumas parcelas dessa soma, cujos valores são calculados em função do tempo t_a até o apagamento das chamas e do tempo necessário, após o apagamento, para normalizar as operações do trecho.

A atividade de transporte e distribuição de gás natural via gasodutos, especialmente devido ao crescimento nos últimos tempos, pode ser considerada uma atividade pertencente à indústria de serviços, assim como a distribuição de água e energia elétrica. Como prestação de serviço, o transporte de GN tem como aspecto fundamental a manutenção do fornecimento de gás aos seus consumidores. Segundo Almeida (2001), em serviços, os custos decorrentes de eventuais paralisações na prestação do serviço são especialmente críticos: primeiro devido ao fato de que o produto recebido pelo cliente é afetado diretamente pelos distúrbios decorrentes de falhas no sistema de produção, segundo porque o alto grau de contato com o cliente nas atividades de serviço torna bastante complexa a contabilização das perdas destas falhas no sistema, comumente envolvendo aspectos de satisfação do cliente.

Outro ponto que poder abordado na avaliação dos *payoffs* relacionados a custos, é o custo subjetivo à imagem da empresa e, de certa forma, ao meio de transporte e distribuição utilizado ou até ao combustível tratado e à cadeia de suprimento na qual está inserido. Esse

fator é de especial interesse devido ao caráter subjetivo de sua avaliação, sendo inoportuna qualquer tentativa de monetarização.

O ANEXO 1 define uma forma de contabilizar cada parcela que constitui n e faz uso, para isso, de alguns parâmetros e constantes de proporcionalidade aos quais devem ser adicionadas algumas considerações: durante o procedimento de cálculo, deve-se atentar bastante para a definição dos valores assinalados aos parâmetros e constantes; é recomendada a realização de simulações quanto a estes valores, já que atribuí-los erroneamente acarreta possíveis conseqüências graves quando da estimação dos *payoffs*, e em decorrência, atinge a eficácia do modelo descrito neste trabalho. A mesma observação pode ser feita ao cálculo dos *payoffs* relacionados às demais dimensões de risco.

A Figura 3.4 representa uma árvore de atributos para facilitar a compreensão do relacionamento entre os conjuntos de conseqüências detalhados nesta seção.

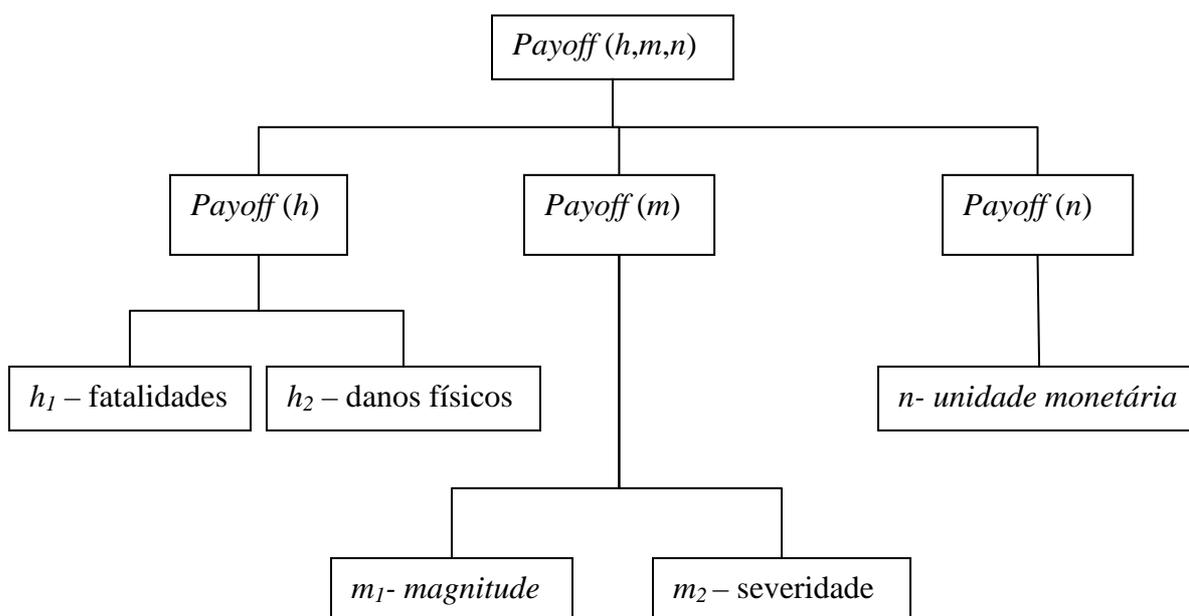


Figura 3.4 Hierarquia de Atributos

3.3.6 Elicitação da função utilidade multiatributo

Em seu modelo, Brito & Almeida (2009) destacam que a função utilidade multiatributo utilizada é uma função aditiva, o que significa considerar que os atributos ou critérios têm independência aditiva. Todavia, a determinação da função utilidade multiatributo aditiva deve acontecer perante a adequação da estrutura de preferências do decisor, mesmo que a função aditiva, como mencionado em 3.1.7, seja tipicamente encontrada inclusive no contexto de

problemas de manutenção. Da mesma forma deve ser tratada a questão de independência em utilidade entre e os atributos.

Adotando, de imediato, a proposta de uso da função aditiva descrita em 3.1.7, resta ao decisor avaliar as questões relacionadas às constantes de escala (k_h, k_m, k_n). Desta maneira, a Teoria da Utilidade Multiatributo é utilizada como método, conforme descrito na seção 2.3.3. As três dimensões de risco são consideradas aditivamente independentes, ou seja, as preferências em utilidade para cada dimensão apenas depende das probabilidades marginais relacionadas de cada conjunto de *payoffs*, em cada das dimensões de risco.

Caso o analista ou o próprio decisor ache necessário, um procedimento de avaliação da função multiatributo pode ser estabelecido, com base na estrutura axiomática da MAUT, descrita na obra de Keeney & Raiffa (1976). Para que o processo de elicitação seja eficaz, é importante o uso de procedimentos claros, de fácil entendimento pelo decisor. Nesse sentido, o uso de Sistemas de Apoio a Decisão que possuam o componente Diálogo bem desenvolvido é importantíssimo durante a fase de elicitação: mesmo não sendo de caráter obrigatório, o uso da ferramenta computacional, quando corretamente realizado, traz ao processo maior clareza, simplicidade e objetividade durante a etapa elicitação de preferências do decisor, além de dar maior flexibilidade quanto à realização de análises de sensibilidade, simulações e uso de cenários.

É recomendável que se avalie atentamente a decisão entre adotar ou não hipótese de uso da função aditiva, ou seja, avaliar o *trade-off* entre simplificar a fase de elicitação e os possíveis erros provenientes. Edwards & Barron (1994) defendem o uso do que eles chamam de “estratégia heróica”: os autores avaliam que os erros cometidos durante o processo de elicitação são maiores e mais graves do que os erros provenientes de simplificações feitas na forma das funções utilidade unidimensionais e na função utilidade multiatributo. Em seu artigo, Edwards & Barron (1994) adotam funções utilidades unidimensionais lineares e uma função utilidade multiatributo aditiva. Ademais, tanto Edwards & Barron (1994) como Keeney (1992), afirmam que quando não é possível utilizar a propriedade de independência aditiva, provavelmente os critérios ou atributos utilizados não foram definidos de maneira totalmente correta.

Como exemplo, tomemos uma função utilidade multilinear, ou seja, cujos atributos são preferencialmente independentes entre si, porém não apresentam independência aditiva. A construção da função utilidade multilinear $U(h, m, n)$ é consideravelmente mais complicada

que a função aditiva, principalmente no que concerne à definição das constantes de escala “ k ”, e pode ser definida como:

$$U(h, m, n) = k_h U(h) + k_m U(m) + k_n U(n) + k_{hm} U(h)U(m) + k_{hn} U(h)U(n) + k_{mn} U(m)U(n) + k_{hmn} U(h)U(m)U(n) \quad (3.4)$$

onde $U(h)$, $U(m)$ e $U(n)$ são as utilidades unidimensionais para as dimensões de risco abordadas e as constantes “ k ” são constantes de escala estimadas a partir de um procedimento de elicitacão baseado na comparao entre loterias de *payoffs*, e $k_h + k_m + k_n + k_{hm} + k_{hn} + k_{mn} + k_{hmn} = 1$ (KEENEY & RAIFFA, 1976). Ressalta-se que o uso da forma multilinear para a funo utilidade multiatributo pressupõe o estudo prévio sobre a interao de preferências entre as dimensões de risco, a respeito da substitutibilidade ou complementaridade das dimensões.

Dispondo agora dos conjuntos de *payoffs* discutidos na seo 3.3.5,  necessária a decomposio da funo utilidade multiatributo, conforme ilustrado na 3.5, a fim facilitar o processo de construo da funo a partir da avaliao quanto às propriedades de independência.

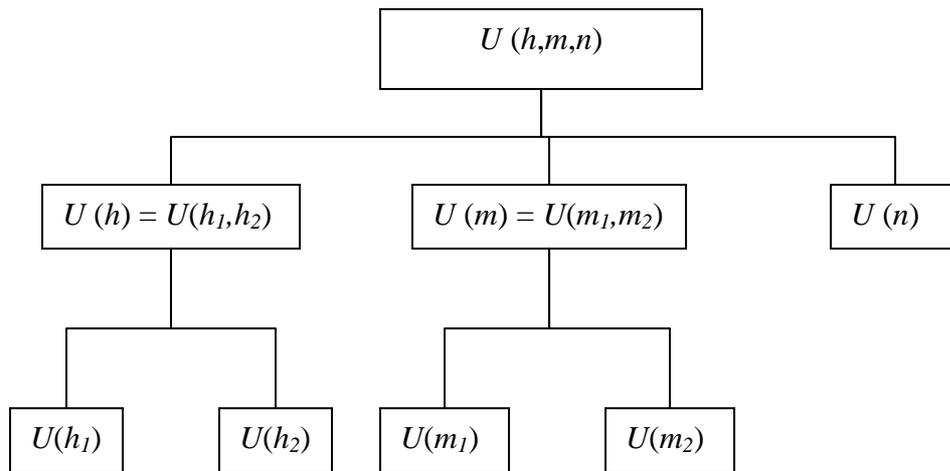


Figura 3.5 Decomposio da funo utilidade multiatributo

Ao trabalhar com a hipótese da forma aditiva para $U(h, m, n) = U(h_1, h_2, m_1, m_2, n)$, ou seja, com a hipótese de independência aditiva entre os atributos considerados,  possível estabelecer uma funo utilidade multiatributo alternativa àquelas dispostas nas Fórmulas 3.1 e 3.4, cuja estrutura baseia-se na decomposio dos atributos h e m , e apresenta-se desta forma:

$$U(h, m, n) = U((h_1, h_2), (m_1, m_2), n) = k_h U(h) + k_m U(m) + k_n U(n) \quad (3.5)$$

$$U(h) = U(h_1, h_2) = k_{h1} U(h_1) + k_{h2} U(h_2) \quad (3.6)$$

$$U(m) = U(m_1, m_2) = k_{m1}U(m_1) + k_{m2}U(m_2) \quad (3.7)$$

onde $U(h)$, $U(m)$ e $U(n)$ são as utilidades para as dimensões de risco abordadas; $U(h)$ e $U(m)$ são bidimensionais enquanto que $U(n)$ é unidimensional, e as constantes “ k ” são constantes de escala estimadas a partir de um procedimento de elicitacão baseado na comparação entre loterias de *payoffs*, satisfazendo $k_h + k_m + k_n = 1; k_{h1} + k_{h2} = 1; k_{m1} + k_{m2} = 1$ (KEENEY & RAIFFA, 1976).

3.3.7 Cálculo das probabilidades das conseqüências $p(h, m, n | \theta, a_i)$

Alguns procedimentos, apresentados por Brito (2007), para determinar os conjuntos H , M e N estão descritos detalhadamente no ANEXO 1. Assim, a seguir, eles serão rapidamente mencionados e algumas propostas alternativas serão ressaltadas para avaliar a probabilidade das conseqüências com base nas formas diferentes de estimacão dos conjuntos de *payoffs*, detalhadas na seção 3.3.5. Nesta seção, maior atencão é dada às questões de implementacão e adaptacão de tais procedimentos, cujos detalhes matemáticos encontram-se no ANEXO 1.

No caso da dimensão humana, é usada por Brito (2007) uma transformacão estatística, a análise *PROBIT*, para determinar a probabilidade de óbito de um indivíduo atingido por um determinado fluxo de calor. Tomando como base esta probabilidade, atribui-se um fator de conversão que retrata quantas vezes mais prováveis são as ocorrências de queimaduras de primeiro e segundo grau devido à exposicão ao fluxo de calor anteriormente estabelecido. O resultado é a probabilidade de ocorrência de danos, não propriamente o óbito, à pessoa exposta; tal probabilidade é então utilizada como parâmetro da distribuiçã de probabilidade binomial para o cálculo do *payoff* ou bem h , número esperado de pessoas atingidas na zona de perigo avaliada, assim como o parâmetro n , número estimado de pessoas na zona de perigo.

Ao invés do uso do fator citado no parágrafo anterior, pode-se estender o uso da *PROBIT* para avaliar a probabilidade de ocorrerem, no máximo, danos de menor gravidade às pessoas expostas na área perigosa, por meio do uso de outros parâmetros de cálculo. Desta forma, é possível determinar ambas as componentes do vetor (h_1, h_2) citado na seção 3.3.5 como alternativa para estimacão do conjunto de *payoffs* na dimensão humana. Pode-se, então trabalhar de forma análoga ao cálculo do bem h , utilizando desta vez os dois valores de probabilidade obtidos através do uso da *PROBIT* tanto para avaliar probabilidades de fatalidades ou de ocorrência de danos de menor gravidade. Desta vez, a distribuiçã mais proposta é a distribuiçã de probabilidade multinomial, com três possíveis eventos: as conseqüências à n -ésima pessoa presente na zona de perigo: fatalidade, danos físicos não

fatais e não ocorrência de danos. No tocante ao número de pessoas consideradas como presentes nas zonas de perigo, pode-se partir para o uso da densidade demográfica da área onde está localizado o trecho.

Para Brito (2007), o bem m , correspondente a área de vegetação atingida, é realizada em função do fluxo de calor liberado e do tempo transcorrido desde o acidente até o completo apagamento das chamas. Por sua vez, a distribuição de probabilidade dessa variável tempo deve ser avaliada a partir da estrutura de segurança da empresa, assim como dos órgãos governamentais envolvidos, como a Defesa Civil e o corpo de Bombeiros. Pode-se, em outro caso, optar por tratar a dimensão ambiental através do vetor (m_1, m_2) , cuja componente m_1 representa a mesma área m de vegetação atingida e a componente m_2 o índice de Margalef para a biodiversidade da área de vegetação do trecho em análise. Já que a segmentação do gasoduto é realizada com base, dentre outras características, no componente ambiental da região do trecho, é aceitável adotar um mesmo índice para toda zona perigosa atingida, independente de quais foram exatamente expostas ao fluxo de calor proveniente do cenário acidental. O mecanismo probabilístico do vetor (m_1, m_2) resume-se ao mecanismo probabilístico da componente m_1 , que é função do tempo, cuja distribuição de probabilidade é dita exponencial, decorrido desde a ocorrência do acidente até o apagamento das chamas.

Igualmente, a função consequência relacionada à dimensão financeira também é apresentada em função do tempo t_a até o apagamento das chamas. Outro tempo de grande importância para estimar a função consequência financeira é o tempo para restaurar o fluxo regular do gás pelo trecho atingido. Como descrito no ANEXO 1, é possível simplificar a estimativa deste tempo por meio de uma constante de proporcionalidade que relaciona o tempo para que as chamas sejam totalmente apagadas com o tempo t_r para restauração do fluxo de gás no trecho. Contudo, a depender da magnitude dos danos financeiros decorrentes da não operação do trecho, pode ser interessante a definição do mecanismo probabilístico do tempo t_r . Isto traz uma característica mais realística ao modelo, ao mesmo tempo em que pode resultar numa maior complexidade matemática para o cálculo das funções consequência.

3.3.8 Estimação dos riscos $r(a_i)$

Durante a seção 3.2.9, foi descrita a forma de cálculo utilizada em Brito & Almeida (2009) para obter os valores de risco para cada trecho do gasoduto estudado. No entanto, devido às observações e proposições que vem sendo feitas ao longo da seção 3.3, é importante

o registro de um modo alternativo de cálculo dos valores de risco, capaz de englobar especificações e considerações adicionais citadas ao longo do texto.

Como exposto na seção 3.2.9, a expressão que calcula o risco de cada trecho é desenvolvida a partir da definição de risco da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) e está detalhada por Brito & Almeida (2009). A perda L estimada para cada seção atingida por um determinado cenário é:

$$L(\theta, a_i) = -\int_H \int_M \int_N f((h_1, h_2), (m_1, m_2), n | \theta, a_i) U((h_1, h_2), (m_1, m_2), n) dh dm dn \quad (3.4)$$

Considerando as hipóteses de independência aditiva e independência em utilidade entre as três dimensões de risco, pode-se calcular o risco $r(a_i)$ do relacionado trecho i de forma semelhante à fórmula 3.2. Todavia, como exposto na seção 3.3.3, o parâmetro $\pi_i(\theta)$ possui significado de taxas de ocorrência de um cenário acidental θ_{jk} no trecho i durante um ano, de modo que uma forma mais plausível de análise é considerar os $\pi_i(\theta_{jk})$ como taxas de ocorrência λ_{ijk} . Considerando λ_{ijk} como o parâmetro de uma distribuição de probabilidade Poisson, define-se risco diferentemente da maneira exposta na seção 3.2.9:

$$r(a_i) = \sum_t \sum_j \sum_k \frac{\lambda_{ijk}^t \ell^{-\lambda_{ijk}}}{t!} \left\{ \begin{array}{l} \int_H f((h_1, h_2) | \theta_{jk}, a_i) k_h U(h_1, h_2) dh \\ + \int_M f(m_1, m_2 | \theta_{jk}, a_i) k_m U(m_1, m_2) dm \\ + \int_N f(n | \theta_{jk}, a_i) k_n U(n) dn \end{array} \right\} + (-1) \sum_j \sum_k \ell^{-\lambda_{ijk}} \quad (3.8)$$

Onde t é o número de vezes em que ocorreu o cenário acidental θ_{jk} no trecho i , $\frac{\lambda_{ijk}^t \ell^{-\lambda}}{t!}$ é a probabilidade do cenário k , resultante da ocorrência do modo de falha j no trecho i do gasoduto, ocorrer t vezes em um ano. Por sua vez, $\ell^{-\lambda_{ijk}}$ corresponde à probabilidade de não ocorrer o cenário k , resultante da ocorrência do modo de falha j no trecho i do duto de uma distribuição, ou seja, o cenário de normalidade operacional θ_N . O valor (-1) multiplicado por $\sum_j \sum_k \ell^{-\lambda_{ijk}}$ é a perda atrelada ao cenário θ_N , ou seja, a perda no cenário de normalidade, sem a ocorrência de nenhum acidente.

Admite-se que os eventos acidentais são independentes tanto em relação aos eventos de natureza diferente quanto aos eventos de mesma natureza. Por exemplo, caso ocorram dois cenários de bola de fogo devido a uma ruptura, admite-se que a ocorrência destes acidentes são independentes entre si. Vale ressaltar que, dada à raridade dos eventos trabalhados, é

sensato determinar um valor específico para o parâmetro t , limitando assim o número de acidentes ocorridos num trecho por ano.

Outra forma de se considerar a equação que determina o risco associado a cada trecho do gasoduto, é abordando a taxa de falhas de maneira probabilística, ou seja, trabalhando com uma distribuição de probabilidade *a priori* sobre o parâmetro λ_{ijk} , a partir do modelo de Martz & Waller (1982), conforme detalhado na seção 2.4. O risco é então calculado considerando a função de densidade de probabilidade sobre o parâmetro λ_{ijk} , denominada $f(\lambda_{ijk})$:

$$r(a_i) = \int_0^{\infty} f(\lambda_{ijk}) \cdot \left\{ \sum_t \sum_j \sum_k \frac{\lambda_{ijk}^t \ell^{-\lambda_{ijk}}}{t!} \cdot \left[\begin{aligned} & \int_H f((h_1, h_2) | \theta_{jk}, a_i) k_h U(h_1, h_2) dh \\ & + \int_M f(m_1, m_2) | \theta_{jk}, a_i) k_m U(m_1, m_2) dm \\ & + \int_N f(n | \theta_{jk}, a_i) k_n U(n) dn \end{aligned} \right] \right. \\ \left. + (-1) \sum_j \sum_k \ell^{-\lambda_{ijk}} \right\} d\lambda_{ijk} \quad (3.9)$$

3.3.9 Ordenação dos trechos de gasodutos em medida de risco

Depois de calculados os valores do risco $r(a_i)$, a partir da Fórmula 3.8, esses valores servem de apoio às atividades de gerenciamento de operação do gasoduto, manutenção de dutos, gerenciamento de riscos, dentre outros.

Brito & Almeida (2009) propõem a aplicação de uma transformação linear sobre os valores calculados de $r(a_i)$, já que no referido trabalho, os valores encontrados foram muito próximos de menos um e, por conseguinte, não são nada intuitivos para alguns gerentes. Através da transformação, é estabelecido um novo índice de risco para cada trecho, sendo mantida a ordem preferencial dos trechos. Os autores exploram, por fim, a propriedade da escala intervalar do risco $r(a_i)$, que oferece uma boa análise a partir das diferenças de desempenho entre os trechos segundo os índices de risco. Esse tipo de avaliação é muito importante para que o modelo possa trazer efetivamente vantagem competitiva, pois mesmo apresentando resultados numéricos embasados em procedimentos de cálculo estruturados, o modelo não tem garantia de sucesso, sobretudo caso o decisor não consiga entender o resultado apresentado pelo modelo.

Nesse intuito, o uso de SAD's que possuam um componente diálogo bem desenvolvido, no sentido do processo de comunicação entre o usuário e a ferramenta, facilita o processo cognitivo na tomada de decisão. Podem ser citados dois exemplos fundamentais. Primeiro a visualização gráfica dos índices de risco por meio de gráficos de caráter intuitivo, por

exemplo, no intuito de que o decisor consiga visualizá-los e interpretá-los facilmente. Outro exemplo é a possibilidade de interação, entre o decisor e o SAD, para análise de cenários, análise de sensibilidade e geração de relatórios.

4 Estrutura e Desenho do Sistema de Apoio a Decisão - SAD

Este capítulo trata do desenho e construção do Sistema de Apoio a Decisão – SAD que deve dar suporte ao processo decisório que envolve o modelo descrito e discutido no capítulo 3. Sendo assim, deve-se registrar que o conhecimento acerca do problema estudado é de fundamental importância para realizar as etapas abordadas nesta seção, especialmente pelas características não estruturada e semi-estruturada dos problemas encontrados no contexto de utilização de SAD's.

Deve ser feita uma consideração ao fato de que a construção do SAD é fruto do processo de planejamento de sistemas de informação da empresa, do qual se espera uma alocação de recursos comprometida com os objetivos estratégicos da organização. Entende-se, dessa forma, que o SAD trabalhado neste capítulo é sim uma ferramenta que agrega valor para a empresa e que seu desenvolvimento já foi anteriormente avaliado.

A seção 4.1 discute a metodologia de desenvolvimento do SAD, assim como estabelece o desenho geral do sistema ao definir os núcleos a serem desenvolvidos. As seções 4.2, 4.3, e 4.4 descrevem, respectivamente, o desenho das componentes do SAD: base de dados, base de e o diálogo.

4.1 Estruturação do Sistema utilizando abordagem adaptativa - evolutiva

Segundo Sprague & Watson (1989), sistemas de suporte a decisão ou sistemas de apoio a decisão caracterizam-se como sistemas computacionais interativos, que ajudam os responsáveis pela tomada de decisões a utilizar dados e modelos para resolver problemas não estruturados. A forte relação entre o SAD e os problemas semi-estruturados ou não estruturados é definitiva quanto ao uso de uma abordagem específica de construção para esse tipo de sistema de informação. Essa abordagem é usualmente chamada de abordagem adaptativa, iterativa ou evolutiva de desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão (SPRAGUE & WATSON, 1989; TURBAN *et al*, 2005).

A abordagem adaptativa baseia-se na combinação das etapas de análise, elaboração, desenvolvimento e implementação de sistemas numa mesma etapa, que é repetida iterativamente. Neste processo, é mister que ocorra uma boa interação entre os três principais componentes durante o processo adaptativo de construção do SAD: o projetista do sistema, o usuário e o sistema em si. Alavi & Napier (1989) descrevem dessa forma tais interações:

- Interação usuário-sistema: destaca-se que o usuário, tipicamente o gerente, é ponto chave para a elaboração e definição de requisitos do sistema, pois a interação entre o usuário e o sistema reflete o efeito das características do usuário na utilização do sistema, o seu aprendizado como resultado do uso do sistema;
- Interação projetista-sistema: ocorre à medida que o projetista acrescenta novos recursos e funções ao sistema, o que depende da flexibilidade da arquitetura do SAD;
- Interação projetista-usuário: envolve a comunicação e a colaboração entre o usuário e o projetista durante o processo de desenvolvimento do SAD, no sentido de cada um conhecer e entender necessidades e capacidades da outra parte.

Turban *et al* (2005) afirmam que esse tipo de metodologia procura construir um SAD a partir de uma série de pequenos passos com o *feedback* imediato dos usuários, para garantir que o desenvolvimento está ocorrendo de forma correta; portanto, os sistemas de apoio a decisão devem ser flexíveis para permitir mudanças de forma rápida e fácil. O que se pretende é que o desenvolvimento do SAD seja um processo flexível, que acompanhe o processo de estruturação da decisão, com grande capacidade de adaptação às mudanças, sejam por questões técnicas do problema ou relativas ao processo decisório que engloba o sistema.

Nesse sentido, é importante diferenciar o conceito da abordagem adaptativa ao conceito de “prototipagem” ou geração de protótipos. Sprague & Watson (1989) relatam que o processo interativo não leva “simplesmente” a uma ampla compreensão das exigências quanto ao desempenho do sistema, que ficam então estacionárias. Segundo os autores, a capacidade de modificação iterativa vai sendo, na verdade, criada internamente no SAD, à medida que ele vai sendo usado. O sistema inicial é real, vivo e usável, e não apenas um teste-piloto.

Pressman (2002) aborda esta questão de forma diferente: o autor caracteriza a prototipagem de *software* como de finalidade fechada ou finalidade aberta. A finalidade fechada trata o protótipo apenas como uma demonstração rústica de requisitos, descartável. Já a finalidade aberta, também chamada prototipagem evolutiva, usa o protótipo como primeira parte de uma atividade de análise que vai ter continuidade no projeto e construção. Neste trabalho, o autor afirma que qualquer aplicação que cria mostradores visuais dinâmicos, interage pesadamente com o usuário ou exige algoritmos, é candidata à prototipagem. É exatamente o caso do SAD trabalhado nesta dissertação.

O problema de Análise de Risco em gasodutos, especialmente ao ser tratado sob um enfoque de Teoria da Decisão, Teoria da Utilidade e Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), requer um Sistema de Apoio a Decisão com um aporte computacional bastante rico em todas suas componentes. Grande atenção deve ser dada ao desenho e à construção da base de dados, base de modelos e do diálogo do SAD, de modo que eles possam apresentar a flexibilidade e os requisitos necessários para uma análise desta criticidade. O Sistema de Apoio à Decisão para Análise de Risco em Gasodutos sob um enfoque da MAUT deve, ao mesmo tempo, possuir substanciais bases de dados e de modelos, que satisfaçam as necessidades da modelagem matemática do problema, além de um componente diálogo bem estruturado para realizar uma comunicação intensa com o decisor.

Observa-se que a análise tradicional de custo-benefício não é adequada a avaliação de um SAD, sobretudo de um SAD nos moldes do proposto neste trabalho. Os benefícios proporcionados por sistemas de informação e, particularmente por SAD's, são de difícil mensuração; transformar melhorias operacionais e eficiência administrativa, por exemplo, numa escala monetária é complicado e, muitas vezes, inviável. A decisão de investir em Sistemas de Informação (SI) e em Tecnologia de Informação tem sido alvo de inúmeras discussões, principalmente pela dificuldade de quantificar os benefícios advindos desse investimento (SOWLATI *et al*, 2005; AGARWAL *et al*, 1994; ALMEIDA & COSTA, 2003; BENROIDER & STIX, 2006; RENKEMA & BERGHOUT, 1997; WU & ONG, 2007). Tal característica é ainda maior ao se tratar de um sistema de informação relacionado a uma análise multicritério ou multidimensional de riscos; o problema abordado já envolve, *a priori*, subjetividade e, por conseguinte, os benefícios advindos do uso de uma ferramenta da natureza do SAD proposto neste trabalho são primordiais para o processo de decisão. Dessa forma, a desenvolvimento de um SAD para o problema descrito no item 3 deste trabalho tem grande potencial para ajudar na implementação do modelo de decisão proposto além de fornecer *insights* ao processo decisório durante sua construção através da abordagem adaptativa.

Turban *et al* (2003) afirmam que a principal vantagem da abordagem adaptativa é acelerar o processo de desenvolvimento. Entretanto, mais do que acelerar o processo, deve-se entender que a principal vantagem da abordagem adaptativa é dar aos usuários a oportunidade de esclarecer seus requisitos de informações à medida que revisam as iterações do novo sistema, o que é crucial no desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão.

Inicialmente, o desenvolvimento do sistema de apoio ao problema descrito no capítulo 3 não utilizou uma abordagem adaptativa. Nesta fase, foram utilizados alguns *softwares*, como o MATHCAD 13.0 e o Microsoft Excel 2003, para aplicações numéricas das etapas do modelo de decisão previamente discutido. Ao longo do processo, foram detectadas várias dificuldades durante a construção do sistema, principalmente no que tange à integração e flexibilidade, a serem oferecidas pelo sistema, para realização de todas as etapas do modelo de decisão. Tais dificuldades evidenciaram a necessidade do uso da abordagem adaptativa para o desenvolvimento efetivo do sistema.

Na fase de trabalho atual, o Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão (GPSID) está desenvolvendo duas versões do *software*, conforme os resultados desta dissertação. As duas versões são construídas em ambientes computacionais diferentes: o Microsoft Excel e o ambiente MATLAB. Isto ocorre devido ao grande porte do sistema, tanto em relação ao tamanho do *software* quanto em relação à complexidade deste. O desenvolvimento inicial dos módulos é realizado na planilha EXCEL devido a sua facilidade e flexibilidade de construção, enquanto que o ambiente MATLAB abriga os módulos quando estes se apresentam com um nível maior de desenvolvimento. Dessa forma, a equipe utiliza a abordagem adaptativa para o desenvolvimento do projeto, unindo a flexibilidade necessária nas primeiras etapas de construção do módulo e a eficiência requerida nas etapas finais de desenvolvimento do SAD. O ANEXO 2 apresenta o início desta fase de desenvolvimento, com várias ilustrações referentes às etapas e módulos diferentes no modelo.

No que abrange à análise de requisitos de informação, Ahituv & Neumann (1983) descrevem diferentes abordagens utilizadas pelas organizações. Relativo ao SAD trabalhado nesta dissertação, a abordagem de análise de requisitos adequada é do tipo evolutiva, na qual os sistemas são desenvolvidos com base nas necessidades operacionais emergentes e a integração entre as aplicações só acontece quando a necessidade surge. Não é propriamente uma abordagem *ad hoc*, pois existe certo planejamento no desenvolvimento do sistema e subsistemas.

Segundo Pressman (2002), sob um conceito de modularidade, o *software* é dividido em componentes nomeados separadamente e endereçáveis, freqüentemente chamados de módulos, que são integrados para satisfazer os requisitos do problema. O autor salienta a importância da definição equilibrada do número de módulos e de seus escopos ao analisar em conjunto com uma análise do custo ou esforço despendido para o desenvolvimento integrado do conjunto de módulos.

A definição de vários módulos é compatível com a definição da abordagem adaptativa de desenvolvimento para o SAD, ancorada pelo fato que o sistema pode ter vários núcleos, não necessariamente integrados desde o começo da construção do SAD, complementares e de fácil integração. Dessa forma, faz-se necessária a definição dos módulos ou núcleos do SAD, o que pode ser feito tomando-se por base as etapas do modelo de decisão, das semelhanças e diferenças de características das etapas do processo decisório.

4.1.1 Módulo de cadastro das seções e cenários de perigo (θ , a_i)

Este módulo permite a inserção, edição e exclusão das seções de gasoduto e dos cenários de perigo ou cenários acidentais a serem trabalhados ao longo do processo de decisão. Ficará claro ao longo do capítulo 4 que este módulo consiste na base dos requisitos de dados e informações necessárias ao uso efetivo do sistema de apoio a decisão proposto, já que o modelo de decisão trabalhado é completamente dependente dos dados e informações provenientes destes dois componentes do processo decisório: as ações (seções) e os estados da natureza (cenários de perigo).

As duas partes do módulo, o cadastro de seções e o cadastro de cenários perigosos, devem se apresentar em forma de formulário eletrônico, com um padrão de requisitos de informação requeridos ao usuário, incluindo um campo para comentários adicionais dos usuários. No caso do cadastro de seções devem ser previamente especificados os tipos de dados ou informações requeridas e os parâmetros necessários para caracterizar os trechos, desde informações técnicas, sobre sua localização e ambiente vizinho. Já o cadastro de cenários de perigo tem a particularidade de poder ser caracterizado de acordo com o fluxo de calor resultante, informação esta que no primeiro momento deve ser mencionada pelo usuário ao cadastrar o cenário. O cadastro de cenários deve conter também questões relacionadas às causas de falhas mais comuns e, se for o caso, o valor estimado da taxa de ocorrência do cenário em questão em determinado período de tempo, usualmente um ano.

Como foi visto na seção 3.3.3, a forma mais adequada, na maioria dos casos, de interpretar os dados encontrados relativos à ocorrência de cenários acidentais é como uma taxa de falhas λ , representando o número de vezes em que o cenário ocorrer por unidade de tempo e de comprimento. Este valor a ser inserido no cadastro do cenário acidental consiste, tipicamente, num valor de referência baseado em bases de dados como a EGIG, utilizada por Brito & Almeida (2009).

4.1.2 Módulo de cálculo numérico

Estabelecer um módulo de cálculo numérico é indispensável devido aos requisitos dos procedimentos de cálculo, tais como integrações numéricas, distribuições de probabilidade e análises de regressão. Está, portanto, em contato permanente com os demais módulos do SAD, exceto com o Módulo de cadastro descrito na seção anterior, com o qual desenvolve um contato de menor intensidade. Pode ser definido como um suplemento ao *software*, porém tem forte influência na performance dos demais módulos, o que aumenta ainda mais a importância deste módulo e traz a necessidade de defini-lo como módulo do sistema.

Este módulo é essencialmente invisível ao usuário, à medida que está em permanente contato com os demais módulos do sistema, porém em nenhum momento existe interação direta com usuário. A interação ocorre por meio dos módulos que dialogam como o usuário. Devido à precisão requerida pelos procedimentos de cálculo do risco, este módulo deve ser alvo de grande atenção. Procedimentos de cálculo que apresentem baixa acurácia ou imprecisão nos resultados podem tornar o modelo e o SAD ineficazes.

4.1.3 Módulo de análise de conseqüências

O módulo de análise de conseqüências corresponde às etapas de análise da exposição dos objetos de impacto, estimação do conjunto de *payoffs* e o cálculo das probabilidades das conseqüências, ou numa linguagem de teoria da decisão, cálculo das funções conseqüência $P(h, m, n | \theta, a_i)$.

A análise da exposição dos objetos de impacto corresponde à definição da zona ou área de perigo correspondente aos conjuntos de seções e cenários acidentais a serem considerados na aplicação. É um módulo que, em resumo, apresentação o resultado do procedimento de cálculo descrito no ANEXO 1, que é realizado no Módulo de cálculo numérico. Ao usuário, pode ser dada a liberdade de escolher sobre a utilização de um ponto de vista conservador, moderado ou arrojado (ou agressivo).

Quanto à estimação do conjunto de *payoffs*, o módulo correspondente apenas faz sentido caso o SAD possibilite a inclusão de novos atributos relacionados às dimensões de risco analisadas. Caso contrário, ou seja, caso os atributos utilizados no modelo sejam pré-definidos, a existência de um módulo de estimação do conjunto de *payoffs* não é necessária. Isso ocorre porque os dados relativos ao conjunto de *payoffs*, tais como o *range* de cada critério ou atributo e os referidos parâmetros, já devem estar descritos no módulo de cadastro das seções.

Por último, tem-se a parte do módulo referente ao cálculo das probabilidades das conseqüências, que apresenta duas opções de abordagem: a inclusão direta de probabilidades calculadas em outro ambiente, com maior ferramental computacional e de maior robustez numérica; ou a partir do procedimento de cálculo descrito no ANEXO 1. Esta opção requer uma grande parcela dos dados atrelados ao módulo de cadastro das seções e cenários de conseqüência, além de alguns outros dados adicionais para realizar a avaliação do ANEXO 1, avaliação esta que possui forte vínculo com o Módulo de cálculo numérico do SAD. Já o uso daquela abordagem é possível quando da utilização de ferramentas de cálculo e simulação avançadas para avaliar a vulnerabilidade e a extensão dos impactos de cada cenário, assim como os mecanismos probabilísticos envolvidos.

É necessário observar que os resultados obtidos pelo módulo de análise e cálculo das conseqüências podem advir de outros sistemas especializados, que por sua vez podem conferir maior rigidez técnica ao processo de análise e cálculo. Dessa forma, caso o módulo proposto neste item não existisse como parte do SAD proposto, sua função seria exercida por outro sistema, que deve atuar de forma integrada com os demais módulos do SAD. Isto requer uma estrutura de integração de sistemas eficiente, para que as vantagens a serem obtidas com o uso de uma ferramenta especializada compensem as eventuais dificuldades que possam ocorrer durante o processo de integração dos sistemas.

4.1.4 Módulo de elicitação de conhecimento *a priori*

Este módulo é, em especial, bastante importante à eficácia do modelo de decisão e do SAD, no que diz respeito ao apoio que pode dar ao processo de decisão, já que é comumente complicada a existência de dados neste tipo de problema, inviabilizando o uso de uma abordagem estritamente freqüentista da probabilidade. Na maioria das vezes, é de grande importância e necessária a abordagem subjetiva de probabilidade para determinar os parâmetros do modelo.

O objeto de conhecimento *a priori* tratado neste módulo são as probabilidades de ocorrência de cenários acidentais, ou mais adequadamente, as taxas com que estes cenários ocorrem em determinado trecho. Tais estimativas podem ser determinísticas ou a partir de distribuições de probabilidade sobre o valor de λ . Consiste, portanto, na utilização das características das seções e dos cenários perigosos cadastrados, em conjunto com dados de referência (como os da EGIG) e, possivelmente, do conhecimento extraído de especialistas

através de procedimentos tais como os descritos nas seções 2.4 e 3.3.3, para estabelecimento das taxas λ adequadas para o estudo em vigor.

É imprescindível que o módulo apresente um diálogo cognitivamente adequado, pois a etapa de elicitação de conhecimento *a priori* é fortemente dependente dos aspectos cognitivos envolvidos durante este processo.

4.1.5 Módulo de elicitação da função utilidade

Assim como o módulo descrito na seção anterior, o módulo de elicitação da função utilidade é de suma importância à eficácia do modelo de decisão e do SAD, em relação ao apoio que pode dar ao processo de decisão. Pode ser dividido em duas partes: uma referente à elicitação da função utilidade unidimensional para cada dimensão de risco e outra à determinação da função utilidade multiatributo.

É importante tornar disponível o uso de funções utilidades unidimensionais mais comuns, de modo que o decisor possa escolher determinada forma da função sem passar pelo procedimento de elicitação. Isto requer que o decisor ou analista tenham grande domínio sobre o assunto ou que o procedimento tenha sido feito em outro ambiente. Algo semelhante pode ser feito quanto à função utilidade multiatributo, já proposta de forma simplificada no modelo de decisão, sendo disposta como opção a forma aditiva e requerendo apenas a definição das constantes de escala.

Caso não seja este o caso, o procedimento de elicitação segue os procedimentos descritos em Keeney & Raiffa (1976) para o caso unidimensional e o multiatributo. Mesmo já caracterizada como uma função aditiva, a escolha da função utilidade multiatributo pode ser flexível, deixando como opção a possibilidade de se elicitar uma função utilidade que não atenda às propriedades de independência preferencial, independência em utilidade e independência aditiva.

Enfatiza-se a importância crítica do componente diálogo também para este módulo, assim como no módulo de elicitação de conhecimento *a priori*, o que pode ser visto mais detalhadamente na seção que trata do desenho do componente diálogo do SAD em questão.

4.1.6 Módulo de estimação de riscos, determinação do *ranking* das seções e análise dos resultados

Este módulo consiste na apresentação dos resultados obtidos a partir da realização das demais etapas: o cálculo do risco, em cada dimensão e de forma global, de cada seção considerada e o *ranking* das seções obtido de acordo com uma hierarquia de riscos; e também

da opção de análises dos resultados. Em relação à apresentação dos resultados obtidos, é basicamente uma apresentação gráfica e numérica dos índices de risco obtidos, tanto em cada critério de risco como de forma multiatributo, para cada trecho de gasoduto.

No que tange às opções de análise dos resultados, deve ser considerada especialmente necessária ao efetivo uso do SAD em todas suas vantagens. Tal análise deve abranger a análise de cenários, análise de sensibilidade, busca por objetivos e análises *what-if*; sendo primordial ressaltar que todas estas análises devem ser suportadas pelo banco de dados do SAD.

4.1.7 Relações entre os módulos

Os módulos descritos anteriormente compõem a estrutura básica do sistema tratado neste trabalho. Após explicar cada um deles, é interessante dar foco às relações entre os módulos e procurar diferenciar a dependência entre os módulos do sistema e a dependência entre as etapas do modelo de decisão.

A Figura 4.1 traz a representação dos módulos de acordo com as etapas do modelo de decisão, enquanto que a Figura 4.2 mostra o relacionamento funcional dos módulos do sistema. O ponto central do sistema é determinar e avaliar os índices de risco dos trechos do gasoduto a partir do conceito de risco abordado na Teoria da Utilidade, de forma a estabelecer um *ranking* entre tais trechos em função desse risco. Nesse sentido, os demais módulos exercem um papel coadjuvante no processo de determinação do risco, em detrimento ao módulo de estimação de riscos, ordenação dos trechos e análise dos resultados. Este detém o objetivo fundamental do sistema, enquanto que os outros representam objetivos meio, ou seja, que não são fundamentais porém contribuem de alguma forma com o objetivo principal .

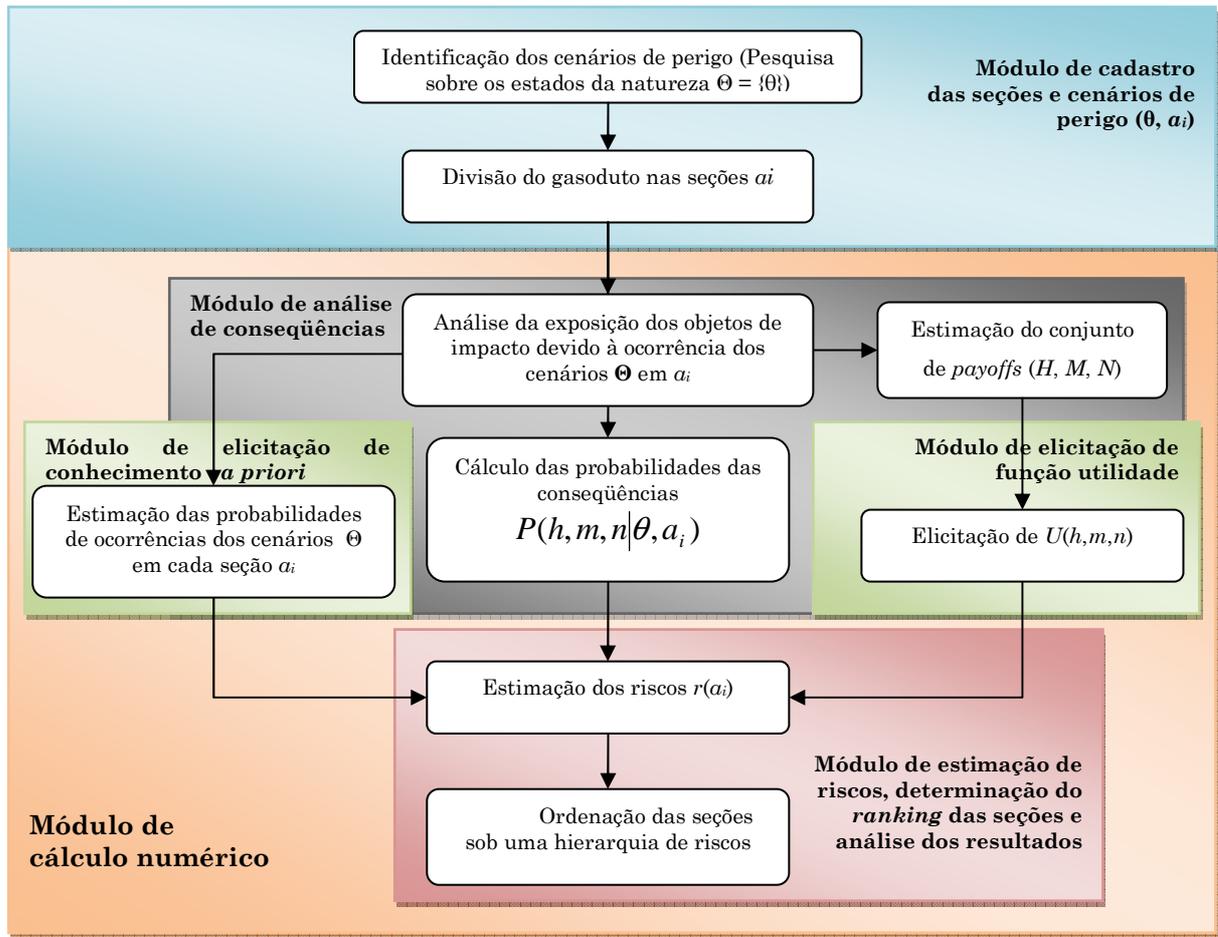


Figura 4.1 Módulos do SAD e suas relações com as etapas do modelo



Figura 4.2 Relacionamento funcional dos módulos do sistema

4.2 Desenho da Base de Dados

Normalmente, a base de dados de um SAD não está localizada em conjunto com a base ou banco de dados organizacional. Devido às particularidades relativas aos problemas de decisão que não são completamente estruturados, o banco de dados de um SAD é “dedicado”, no sentido que é criado especialmente para atender às necessidades do usuário final e usualmente localizado fora da estrutura de dados da empresa.

Assim como existem vários métodos de estruturar as organizações empresariais, também é possível esquematizar de várias maneiras os dados necessários a essas organizações (TURBAN *et al* ,2003). Como modelos de estruturas de dados mais comuns, podem ser citados o hierárquico, de rede e relacional. A estrutura baseada no modelo hierárquico é semelhante ao tipo de estrutura organizacional hierárquica bastante encontrada nas empresas, onde cada função só está ligada ascendentemente a apenas uma função; já o modelo de banco de dados de rede não impõe restrições quanto ao número de relações em conjuntos em que um campo pode participar, o que torna este modelo mais consistente com as relações empresariais

atuais, onde, por exemplo, os fornecedores têm vários clientes e os clientes, vários fornecedores. Por sua vez, o modelo de banco de dados relacional, que se baseia no conceito simples de tabelas, para explorar as características de linhas e colunas de dados. Em um banco de dados relacional, essas tabelas são denominadas “relações” e o modelo baseado na teoria matemática de conjuntos e relações.

Como afirmam Turban *et al* (2003), ao contrário dos modelos hierárquico e de rede, os dados existentes em uma tabela e entre tabelas podem ser vinculados, relacionados e comparados, sendo que a lógica dos dados em tabelas pode ser mais independente do que a implementação física. Essa característica é determinante para que este tipo de modelo estrutural de dados seja mais flexível durante a implementação e modificação da estrutura lógica.

Para o SAD em questão, o modelo a ser utilizado é o de banco de dados relacional, sobretudo devido à sua característica de flexibilidade, primordial numa abordagem adaptativa de desenvolvimento do sistema. Outras vantagens do modelo relacional estão na possibilidade de combinar informações procedentes de diversas fontes, simplicidade na estrutura e manutenção e possibilidade de adicionar novos dados e registros sem interferir nas aplicações já existentes. Mesmo se caracterizando como de menor eficiência e velocidade de processamento, o modelo de dados relacional é totalmente aplicável ao contexto de sistemas de apoio a decisão devido à sua flexibilidade em tratar de problemas de natureza não estruturada, que necessitam de uma abordagem adaptativa.

Os sistemas de apoio à decisão, em particular, utilizam-se de dados provenientes de diversas fontes, que podem ser categorizados em fontes de dados internos e fontes de dados externos:

- Fontes de dados internos – os dados internos são aqueles gerados dentro da empresa, seja de forma integrada com os demais sistemas de informação da organização ou a partir da coleta, inserção e manutenção de dados que não estejam disponíveis através das atividades normais de processamento. Estes consistem em, por exemplo, conteúdos de documentos armazenados eletronicamente, estimativas subjetivas dos gerentes e dados relacionados à engenharia (SPRAGUE & WATSON, 1989; ALMEIDA & RAMOS, 2002). Como dados internos relacionados ao problema de decisão em análise, podem ser destacados dados relativos aos trechos ou seções do gasoduto, às

características de operação e manutenção, contratos com fornecedores e clientes, além dos dados provenientes de procedimentos de elicitação;

- Fontes de dados externos – os dados externos estão ligados àquilo que ocorre fora da organização, estando relacionado principalmente às decisões nos níveis gerenciais mais altos, tais como dados econômicos regionais e dados sobre concorrentes e consumidores (SPRAGUE & WATSON, 1989; ALMEIDA & RAMOS, 2002). Os dados externos envolvidos com o problema de decisão em destaque concentram-se basicamente nos dados a respeito do ambiente onde as seções do gasoduto estão inseridas, suas características ambientais e humanas a serem consideradas no modelo de decisão.

Para o Sistema de Apoio a Decisão proposto neste trabalho, são pontos cruciais em relação ao desenho da base dados: o cadastro das seções de gasoduto e o cadastro dos estados da natureza ou cenários acidentais considerados no problema. Estes dois conjuntos de dados formam a base para a operacionalização do modelo de decisão, e conseqüentemente, para que o sistema esteja apto a contribuir ao processo decisório. O motivo é simples: os dados inseridos nesses dois cadastros constituem os parâmetros necessários à realização das demais etapas do modelo, assim como do uso efetivo das demais funções do SAD.

Como exemplos de parâmetros necessários à realização das demais etapas do modelo podem ser citados: a densidade demográfica da região, as características ambientais da região, o perfil das atividades econômicas desempenhadas na região e das propriedades de terceiros, valores de multas de contratos e indenizações, informações técnicas sobre o fluxo de gás pelo duto, assim como os demais parâmetros utilizados no cálculo das funções conseqüências descritas no ANEXO 1.

O cadastro dos estados da natureza, ou seja, dos cenários acidentais a serem considerados pelo modelo, deve ser realizado primeiramente. A razão para isto é que as características de perigo ligadas aos estados da natureza podem influir na segmentação do duto e, por conseguinte, no cadastro das seções a serem analisadas pelo modelo.

O cadastro das seções pode ser considerado o ponto mais importante dentre o par de cadastros citada anteriormente. O usuário poderá prosseguir para as demais etapas do modelo após o cadastro das características do trecho, tais como: diâmetro, pressão e idade do duto, descrição da área de localização, acessibilidade, capacidade técnica de manutenção ou supervisão, além de outros aspectos considerados relevantes para a companhia de gás. A descrição da área de localização do trecho deve ser feita em função das dimensões de risco

consideradas, de forma que as seções sejam caracterizadas de acordo com os conjuntos de objetos de impacto ou conjuntos de conseqüências a serem trabalhados pela ferramenta. Realizados estes dois cadastros, podem ser iniciadas as demais etapas do modelo.

É imprescindível que a base de dados do SAD seja capaz de armazenar os dados gerados a partir das utilizações anteriores do próprio sistema, desde as seções e cenários perigosos trabalhados anteriormente como os provenientes da utilização de recursos típicos em sistemas de apoio a decisão, tais como: análises de sensibilidade, análises “*what-if*” e criação de cenários, análises para atingir meta ou objetivo, dentre outros. Outro grupo de dados importantíssimo é aquele construído a partir dos procedimentos de elicitação contidos no sistema.

A questão central é que a base de dados deve ser capaz de prover ao usuário a capacidade de trabalhar em cima de aplicações anteriores, ao refazer de forma completa ou parcial as etapas contidas nos diferentes módulos do SAD. Uma possível abordagem para disponibilizar este tipo de flexibilidade pode ser a opção de salvar um dito “problema-base”, contendo informações a respeito de um módulo ou conjunto de módulos do sistema e, a partir deste “problema-base” os módulos restantes serem trabalhados, de forma que, ao final, seja possível combinar alguns cenários relacionados aos módulos. Por exemplo, estabelece-se um problema-base, contendo o Módulo de cadastro das seções e cenários de perigo (θ , a_i) e o Módulo de análise de conseqüências. Pode-se, então, permitir combinar diferentes cenários para os módulos de elicitação da probabilidade *a priori* dos cenários de perigo e perfis diferentes de comportamento do decisor quanto a decisões sob risco referente ao Módulo de elicitação da função utilidade (ver Figura 4.3).

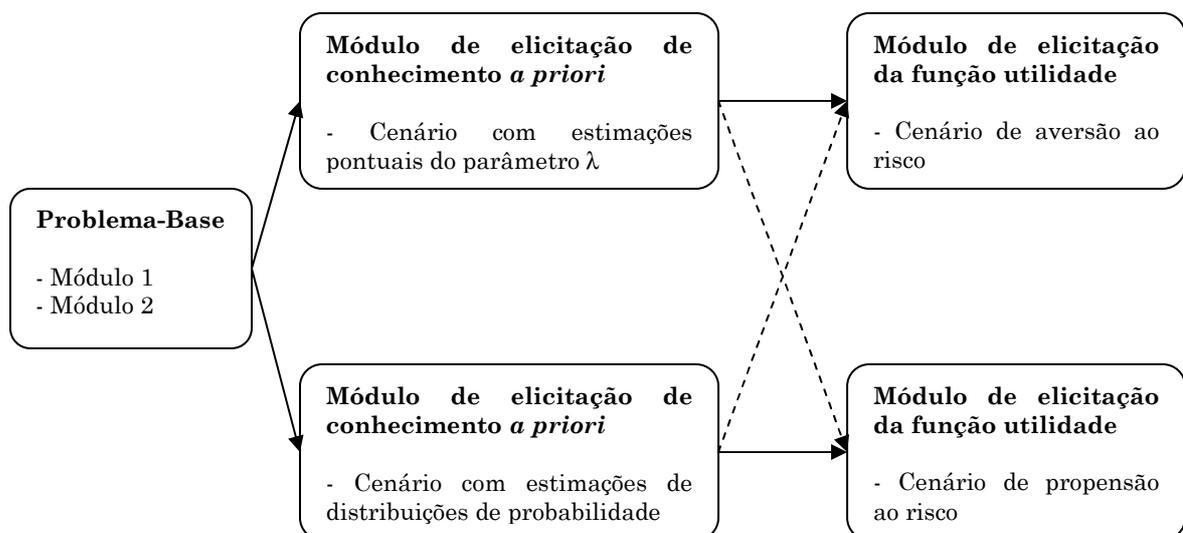


Figura 4.3 Exemplo de flexibilidade da análise no SAD

4.2.1 Descrição dos dados do sistema

A aplicação do modelo de decisão requer a inserção e uso pelo sistema de uma grande quantidade de parâmetros, os quais apresentam grande diversidade na natureza de sua fonte, assim como estão relacionadas diversificadamente com as etapas do modelo. Dessa forma, esta seção procura descrever melhor estes parâmetros, buscando deixar claro seu significado, propor maneiras de aquisição destes dados, além de outros fatores que sejam importantes para o entendimento da estrutura de dados e uso eficaz desta.

Para facilitar o entendimento, os dados ou parâmetros descritos a seguir serão caracterizados de acordo com a fonte ou objeto de descrição com os quais estão relacionados. Por exemplo, a medida de comprimento de uma seção do duto relaciona-se apenas com o referido trecho que está sendo avaliado; já a taxa de liberação de gás devido a um cenário acidental depende do trecho de gasoduto e do cenário acidental no que tange à vazão de gás natural e o acidente específico, respectivamente. Portanto, esta forma de apresentação segue a lógica da estrutura relacional dos dados do sistema e ajuda na fase de desenvolvimento e construção desta base. Esta organização deve ser a mesma a ser utilizada na construção do código e interface do sistema (ANEXO 2).

Observa-se que a obtenção de grande parte dos dados descritos a seguir depende da disponibilidade da companhia de gás, da qual se espera uma postura colaborativa, já que esta usufruirá dos eventuais ganhos advindos de uma análise de risco eficaz.

4.2.1.1 Dados característicos das seções

Como dados que se caracterizam apenas de acordo com a seção avaliada, podem ser citados:

- (Q) Vazão regular do gás na seção do gasoduto em m^3/s – este dado pode ser obtido diretamente da companhia de transporte de gás natural ou verificando-se o consumo a jusante do trecho, pois a vazão é a unidade utilizada para a aquisição do gás. No entanto, deve-se tomar cuidado para não confundir com a pressão mantida pela companhia durante o fornecimento do gás, informação esta normalmente disponibilizada publicamente;
- (d) Diâmetro e (L) Comprimento do trecho – da mesma forma que a vazão, o diâmetro e o comprimento do trecho pode ser obtido diretamente da companhia de gás ou, caso necessário, pode-se efetivamente realizar a medição;

- (w) estimativa em valores monetários por segundo (\$/s) da produção das empresas, a jusante do trecho, que utilizam o GN em seu processo produtivo. Este dado é de difícil mensuração, sobretudo caso as empresas clientes não se apresentem de forma colaborativa para fornecer este tipo de informação. Como (w) é utilizado apenas no cálculo das conseqüências financeiras no que tange à mensuração de danos às empresas que deixam de operar devido ao eventual corte no fornecimento de gás natural, talvez seja mais prático e realista utilizar os contratos da empresa fornecedora com os clientes ao longo do gasoduto, especificamente as multas contratuais por tempo de interrupção no fornecimento. Esta informação é de fácil obtenção com a companhia de gás.
- (v) valor médio de renda do gás por m^3 – é semelhante ao caso anterior, já que este tipo de informação está presente em contratos entre a companhia de gás e os clientes do respectivo trecho. É importante frisar que este valor médio da renda deve considerar toda a venda à jusante do trecho, pois quando se interrompe determinado trecho do duto ocorre conseqüentemente a interrupção no fornecimento de todo o trecho à jusante.

4.2.1.2 Dados característicos dos cenários acidentais

Como dados que se caracterizam apenas de acordo com a seção avaliada, podem ser citados:

- (I) Fluxo médio de radiação térmica, em quilo Joules (kJ) devido ao cenário acidental - questão técnica de caráter experimental cujo valor depende das características técnicas do duto e do cenário acidental. Podem, eventualmente, serem usados dados de especialistas e também de bases de dados que dispunham desse tipo de dado;
- (R) taxa de liberação do gás, em metros cúbicos por segundo, a partir do furo (R_f) ou a partir da ruptura (R_r). Tais parâmetros requerem a verificação de questões técnicas da dinâmica do fluido com o qual se está trabalhando, assim como questões técnicas internas e externas ao duto, tais como pressão mantida no trecho, material do gasoduto, dentre outros;

4.2.1.3 Dados característicos das seções e dos cenários acidentais

A tabela 4.1 apresenta os dados e parâmetros cuja mensuração ou especificação está relacionada simultaneamente com as características das seções do duto e dos cenários acidentais avaliados.

(β)	Constante de proporcionalidade, em unidades monetárias por quilo Joule (\$/kJ) - utilizada no cálculo das perdas por danos às propriedades, multas e indenizações por danos físicos. Para sua mensuração, pode-se realizar análises estatísticas, a partir de bases de dados, para avaliar a associação entre a variável dinheiro (indenização) e a energia liberada pelo cenário acidental, tal como uma análise de regressão entre as indenizações e os cenários ocorridos. Trata-se de um parâmetro de difícil mensuração, sendo imprescindível a realização de análise de sensibilidade sobre o valor do parâmetro.
(A)	Zona de perigo (m^2) relacionada ao trecho - compreende-se pela área retangular delimitada pelo comprimento do duto e o raio da zona de perigo. De modo exaustivo, cada zona de perigo depende do trecho analisado e do cenário acidental considerado, porém pode-se adotar simplificações tais como determinar a zona de perigo de forma conservadora (considerando o pior caso, ou seja, a maior zona) ou determinando um raio médio de perigo a partir dos raios de perigo para cada cenário num trecho e as probabilidades de ocorrência daquele cenário. Com tais simplificações, a zona de perigo deixaria de depender simultaneamente do trecho e do cenário, mas apenas do trecho em questão.
(k)	Constante que relaciona o tempo, após apagar as chamas, para restauração e operação regular do sistema, com o tempo para apagá-las. Relacionada à manutenibilidade da empresa, podendo ser realizada as análises estatísticas para mensuração, além de opiniões de especialistas.
(u)	Inverso do tempo médio para o apagamento das chamas no duto ($1/\lambda$). Também relacionado à manutenibilidade da empresa, este parâmetro de tempo pode ser avaliado sob a uma abordagem freqüentista ou subjetiva de probabilidade. Em certas situações, pode ser melhor avaliar o tempo para reparo do que o tempo do apagamento das chamas ou, de forma mais exaustiva, avaliar separadamente os dois tempos. Apagar as chamas nos arredores do duto que impede o reparo. Verificar a possibilidade de adotar dois tipos de tempo de apagamento de chamas de acordo com as dimensões financeiras e ambientais.
(S)	Área de vegetação inserida na zona de perigo do trecho. Na verdade, este dado depende da definição da zona (A) de perigo do trecho, citada anteriormente. É importante na definição do range do atributo na dimensão ambiental para cada trecho. O cálculo pode ser feito determinando-se uma porcentagem da zona total de perigo do trecho, correspondente a área de vegetação sob influência da seção do duto. Considerando-se toda área da zona de perigo, determina-se qual a área a ser considerada para estimar o <i>payoff</i> na dimensão ambiental.
(λ)	Constante em metros quadrados por quilo Joules (m^2/kJ) relacionada ao cenário acidental e ao trecho, que representa o parâmetro da função consequência na dimensão ambiental. Corresponde a um dado técnico sobre a taxa de área devastada por kJ emitido no raio de perigo esperado, e que pode ser inferido estatisticamente, experimentalmente ou por meio de especialistas.
(n)	Número máximo de pessoas a serem atingidas na zona de perigo associada ao trecho, determinado pela multiplicação da área de perigo pela densidade demográfica na zona de perigo do trecho.
(α)	Probabilidade de, havendo o cenário acidental, uma pessoa que está na zona de perigo seja atingida pela radiação térmica. Sua determinação depende da definição da zona de perigo. No primeiro momento, de forma simplificada, é melhor utilizar o raio esperado, portanto esta probabilidade será a divisão da área circular relacionada ao raio esperado de perigo pela área total de perigo do trecho (A). Este cálculo é possível pois se considera a homogeneidade do trecho do gasoduto, e conseqüentemente, de sua densidade demográfica.
(ω)	Fator que retrata quantas vezes mais provável que uma fatalidade é uma queimadura de primeiro ou segundo grau quando uma pessoa é exposta à radiação I. É essencialmente um parâmetro que depende de especialistas. Uma alternativa é utilizar dados provenientes de bases de dados, a respeito das consequências de acidentes em gasodutos. Ou ainda, pode-se verificar valores da Probit no contexto de consequências não fatais, obtendo-se a

	probabilidade de um indivíduo exposto à radiação térmica I sofrer conseqüências, porém não fatais, e dividindo-se esse valor pela probabilidade de ocorrer uma fatalidade encontrada através da transformação Probit descrita no ANEXO 1.
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabela 4.1 Dados característicos das seções e dos cenários acidentais

4.2.1.4 Dados característicos dos procedimentos de elicitação

Durante os procedimentos de elicitação que podem ser realizados quando da aplicação do modelo de decisão, alguns dados e parâmetros são especificados e devem, portanto, ser armazenados de forma a prosseguir eficazmente com a análise, além de atender análises subsequentes. Estes dados relacionam-se, por exemplo, com os resultados de loterias usadas durante o procedimento de elicitação da função utilidade, resultando nos parâmetros das funções utilidades cadastradas, ou seja, na função utilidade escolhida.

Outra forma de exemplificar este tipo de dado é citar os procedimentos de elicitação de conhecimento *a priori* sobre a taxa de ocorrência dos cenários acidentais, os quais podem resultar em parâmetros de distribuições de probabilidade ou até em equações de funções de densidade de probabilidade determinadas através de análise de regressão. Pode-se, ainda, observar a importância do armazenamento das constantes de escala determinadas para o cálculo do risco considerando as três dimensões abordadas.

4.2.1.5 Dados das Análises de Resultados

O armazenamento e manipulação de dados e parâmetros provenientes da análise de resultados realizadas são essenciais para alcançar um resultado eficaz na análise de risco pretendida. Tais ações são tais difíceis quanto mais flexíveis se apresentarem as possibilidades de análise de resultados.

A possibilidade de se realizar cadastro de cenários, análise de sensibilidade e de estabelecer metas para os índices calculados requer grande capacidade do sistema de armazenamento de dados, assim como depende fortemente da arquitetura definida para o banco de dados do sistema de apoio a decisão.

Outra questão é a análise e visualização dos índices de risco calculados pelo modelo por meio de uma transformação linear, como descrito em Brito & Almeida (2009). Utilizando a propriedade cardinal dos resultados de uma análise construída com base na teoria da utilidade, os autores propõem a transformação dos índices de risco de modo a facilitar o entendimento do decisor. Para lançar mão desta propriedade, é necessária a manipulação eficiente dos dados necessários, principalmente dos parâmetros da transformação linear a ser realizada.

4.3 Desenho da Base de Modelos

Conforme Bigdoli (1989), a implementação de técnicas de modelagem em um ambiente de sistemas de apoio à decisão pode ser feita de várias maneiras, sendo métodos comuns o uso de sub-rotinas ou pacotes de programas. No caso do SAD em proposição, a forma a ser considerada para implementar os modelos do sistema é a inclusão através de sub-rotinas, cujos processamentos são requeridos durante a execução de um programa. A maior razão para esta escolha é tornar mais fácil e consistente o fluxo de informação, por exemplo, com a base dados, provendo melhorias na manipulação das sub-rotinas e atualização dos dados do sistema.

A comunicação ágil e flexível entre a base de modelos e os demais componentes do sistema, base de dados e diálogo, são características inerentes ao atendimento das necessidades do processo decisório o qual o SAD pretende dar suporte. No que tange à relação com a base de dados, o grande número de variáveis e parâmetros utilizados na estrutura matemática do modelo requer tais características, principalmente devido à necessidade de se armazenar os resultados de análises anteriores para um uso posterior, como está observado durante a descrição da base de dados na seção 4.2. Já em relação ao diálogo, a base de modelos trabalha juntamente com a base de dados, fornecendo o que foi requerido pelo usuário. Em virtude das inerentes características de interatividade e continuidade desse processo e da complexidade de alguns procedimentos de cálculo da base de modelos, faz-se necessário o uso de um Módulo estritamente dedicado a procedimentos de cálculo, a fim de prover maior agilidade ao processo. O Módulo de cálculo numérico pode ser, portanto, desenvolvido a partir de ferramentas computacionais próprias para a realização deste tipo de procedimento, sendo observada a criticidade que envolve a questão de integração dos módulos. Utilizar uma ferramenta de cálculo muito eficiente não é útil se a integração entre esta ferramenta e os demais módulos do SAD não for eficiente.

Os modelos matemáticos e estatísticos a serem utilizados no SAD são aqueles citados ao longo do capítulo 3. No entanto, ressalta-se a diversidade de tipos de modelos, seja em relação ao seu propósito, com relação ao tratamento da aleatoriedade e generalidade de aplicação. Mesmo com essa diversidade de alternativas de modelagem, existe um ponto em comum imprescindível a todos eles: todos devem usar a mesma base de dados, de modo que ao mesmo tempo com que o modelo pode entrar com informações geradas pelas suas análises na base de dados, esta nova informação esteja disponível para os demais modelos, de modo a atendê-los em análises posteriores.

O módulo de integração numérica, possivelmente embasado numa ferramenta específica, torna-se imprescindível neste tipo de sistema devido às questões essenciais de interatividade, flexibilidade e agilidade nas relações entre usuário, sistema e projetista. Excetuando o Módulo de cadastro das seções e cenários de perigo, os demais módulos possuem maior ligação com a base de modelos do SAD. De forma geral, os requisitos de procedimentos os quais o Módulo de cálculo numérico deve abranger estão restritos àqueles procedimentos de cálculo mais complexos referentes ao modelo de decisão tratado no capítulo 3, tais como cálculo de integrais, análise de regressão e demais cálculos estatísticos. Desta maneira, cada módulo contém a organização da estrutura de modelagem, o que deve ser feito e em que seqüência, além de alguns procedimentos de cálculo mais simples. Os módulos então se comunicam com o Módulo de cálculo numérico para atualizar resultados e dar prosseguimento às etapas de modelagem (ver Figura 4.4).

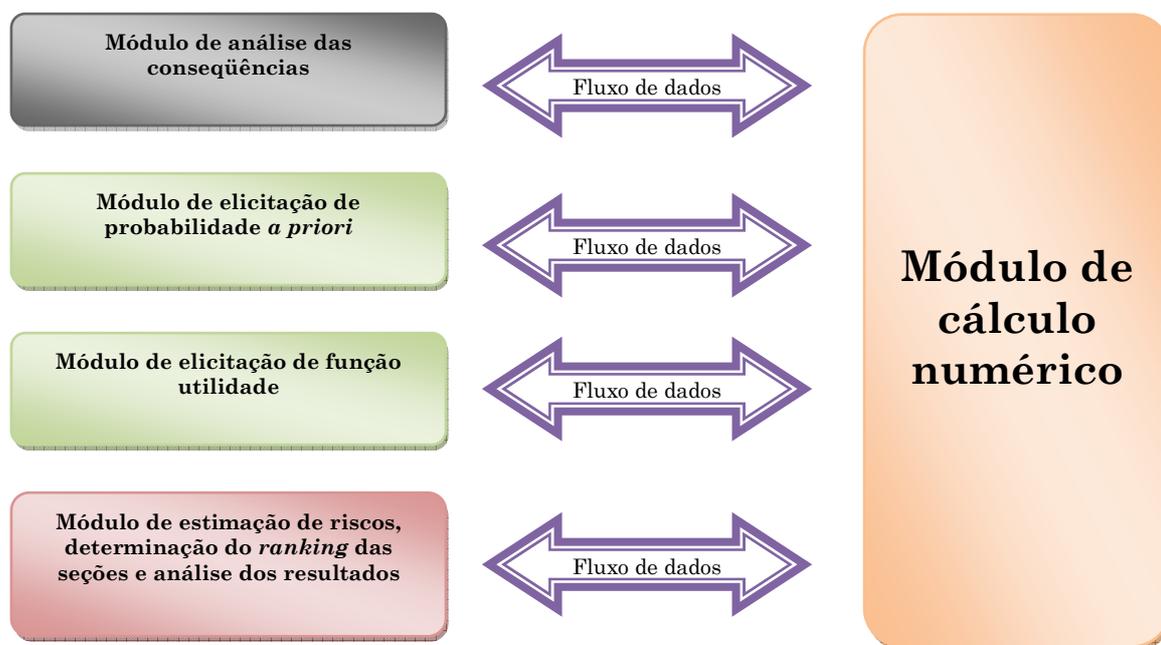


Figura 4.4 Fluxo de dados entre o Módulo de cálculo numérico e demais módulos

O Módulo de elicitação de conhecimento *a priori* deve abranger os procedimentos de elicitação relatados nas seções anteriores. O uso deste módulo acontece quando não existem valores de referência de bases de dados externas ou deseja-se, a partir destes valores, estimar diferentemente as probabilidades ou, como neste modelo, o valor da taxa λ_{ijk} . Caso se deseje estimativas pontuais para os diferentes valores λ_{ijk} , deve ser posta a oportunidade de estabelecer tais valores em virtude da superestimação ou subestimação de valores de referência.

Já para a abordagem através de distribuições de probabilidade acerca do parâmetro λ_{ijk} , podem ser disponibilizados os procedimentos propostos por Raiffa (1970) e Martz & Waller (1982). Num primeiro momento de construção e uso do SAD, parece mais adequado o uso do procedimento de Martz & Waller, no intuito de simplificar tanto o procedimento de elicitação em si como a exigência quanto à estrutura matemática requerida. O uso do método das probabilidades equiprováveis (RAIFFA, 1970) necessita de uma comunicação mais estruturada entre a base de modelos e o componente diálogo devido à seqüência de perguntas e respostas, além da realização de análise de regressão para determinar a forma funcional da função de distribuição de probabilidade e respectivos parâmetros.

Embora de aplicabilidade mais restrita, o procedimento de Martz & Waller (1982) pode ser considerado de forma satisfatória ao tratarmos com taxas de ocorrência, pois como foi observado na seção 3.3.3, é bastante eficaz o uso de distribuições *Gamma* para representar a distribuição de probabilidade sobre o parâmetro λ . Com isso, os valores dos parâmetros a e b da distribuição de probabilidade *Gamma* são elicitados para, posteriormente, serem utilizados pelo Módulo de cálculo numérico em conjunto com o Módulo de cálculo do risco, de acordo com as fórmulas dispostas ao longo da seção 3.3.

No que diz respeito ao Módulo de elicitação da função utilidade, a modelagem da utilidade unidimensional é necessária quando o usuário não escolhe dentre as opções de formas funcionais mais comuns, que são sugeridas no Módulo; enquanto que a modelagem na análise multiatributo refere-se à checagem das propriedades de independência. Para a abordagem adaptativa, é plausível que seja assumida ao menos a propriedade de independência em utilidade num primeiro momento do desenvolvimento do sistema. Procedimentos de análise de regressão são necessários à modelagem das funções utilidades unidimensionais, além do cálculo de expressões mais simples referente às loterias de escolha.

Tanto a elicitação de conhecimento *a priori* como a da função utilidade fazem uso de procedimentos essencialmente interativos. Por esta razão, a base de modelos que dá apoio a estes procedimentos deve, de antemão, prever alguns pontos relativos ao desempenho da comunicação com os demais componentes do sistema. A característica de dinamicidade destes procedimentos requer um contato rápido com a base de dados, assim como o registro de resultados e análises realizadas.

Em problemas de decisão de cunho estocástico, grande atenção deve ser dispensada à base de modelos probabilísticos, já que estes constituem a base dos conceitos abordados durante o processo decisório. Em especial, o Módulo de análise das conseqüências requer

certa estruturação nos procedimentos de cálculo, tanto na questão procedimental como na fase de cálculo propriamente dito das expressões numéricas. Sob o ângulo de visão de um analista de pesquisa operacional, é plausível admitir que o Módulo considerado por este como de maior complexidade é o de análise de conseqüências, devido às questões específicas de engenharia amplamente utilizadas, sobretudo à análise de vulnerabilidade e susceptibilidade dos objetos de impacto ao fluxo de calor emanado pelo cenário acidental. Deve-se obter respostas para questionamentos complicados, tais como sobre a quantidade vítimas fatais ou não fatais em uma determinada área onde ocorreu um cenário acidental específico ou sobre o tempo para restauração de um trecho acidentado, que atua, por exemplo, em assuntos de multas e indenizações a pessoas físicas e jurídicas em virtude da interrupção no fornecimento do gás natural.

Nesse sentido, o uso dos procedimentos descritos no ANEXO 1 é suficiente para os primeiros ciclos de evolução do sistema de apoio a decisão. São esses os procedimentos que demandam o maior número de variáveis e parâmetros do modelo de decisão e, com isso, tem grande destaque no desenho de sua base de modelos e respectivos aspectos de comunicação com a base de dados e o diálogo. Caso necessário, o uso de outras ferramentas mais desenvolvidas do que a proposta neste trabalho podem ser incorporadas ao processo de decisão, especificando, durante o modo de execução do sistema, que serão utilizados dados externos para a análise de conseqüências.

No ANEXO 2 são ilustradas alguns resultados gráficos do uso da componente de modelos do SAD, como a questão da determinação da função utilidade unidimensional e das distribuições de probabilidade que darão base para o estabelecer as funções conseqüência.

4.4 Descrição da componente diálogo e interface

Do ponto de vista do usuário do SAD, o componente de diálogo é a forma como o sistema opera e funciona, enquanto que segundo a visão do projetista e do desenhista do componente está ligada à construção do diálogo, um ponto de vista técnico do SAD (ALMEIDA & RAMOS, 2002). Considerando a diversidade de natureza dos módulos definidos previamente é razoável definir que o SAD proposto deve possuir uma estrutura de diálogo baseada numa combinação de estruturas tradicionais, de modo que determinado módulo utiliza predominantemente um tipo de diálogo e o SAD então compreende o conjunto destas estruturas utilizadas.

Um aspecto primordial diz respeito à definição do usuário do sistema. Nessa seção, admite-se que o decisor possua conhecimento técnico suficiente sobre o problema de decisão abordado, as variáveis e parâmetros envolvidos nesta análise. Mesmo assim, é recomendável a presença de um analista de apoio, que seja capaz de operar o sistema e de interpretar seus resultados. Tal recomendação deve-se ao tamanho considerável da análise de risco suportada pelo sistema, o grande número de variáveis, de parâmetros e das relações entre estes. Nesse sentido, a presença de um analista deve apoiar tanto o processo de levantamento de dados técnicos e cálculo de conseqüências, a realização dos procedimentos de elicitação e à análise de resultados.

Dessa forma, a seguir serão abordadas separadamente as questões relevantes à estruturação do desenho do componente diálogo para cada módulo identificado na seção 4.1.7. O ANEXO 2 ilustra exemplos destas estruturas de diálogo, com base no desenvolvimento inicial do SAD, em Microsoft Excel 2003 e em MATLAB 13.

4.4.1 Diálogo dos módulos de entrada de dados

Para os módulos de entrada de dados, seja para cadastro de cenários ou dos trechos a serem analisados, o diálogo proposto é o Entrada/Saída, que pode se mostrar bastante eficaz quando existe uma correlação entre entradas e saídas (ALMEIDA & RAMOS, 2002). Para as ações de cadastro das seções e dos cenários de perigo, a interface para inserção de dados dependerá da característica relacional do dado: se é característica somente do trecho, somente do cenário, do trecho e do cenário, dos procedimentos de elicitação e da análise de resultados. Assim, deve seguir a mesma lógica abordada para a classificação utilizada durante a descrição e desenho da base de dados no item 4.3.

A estrutura da interface recomendada é um formulário de entrada de dados comum, dividido em partes de acordo com a característica relacional do grupo de dados requisitados. É oportuna a visualização da descrição dos dados requeridos, que são muitos, no intuito de facilitar o preenchimento do formulário pelo usuário.

4.4.2 Diálogo dos módulos de elicitação

Os módulos de elicitação, de probabilidade *a priori* e da função utilidade, dependem de forma especial do componente diálogo escolhido para a construção dos módulos. Entende-se que a existência destes módulos não é obrigatória para que o sistema seja eficaz, porém tais módulos podem ajudar a elucidar problemas de cunho técnico e preferencial. Isso se dá devido ao fato que tais procedimentos de elicitação baseiam-se em procedimentos que buscam

contribuir para que o decisor compreenda e reflita melhor sobre o contexto de decisão. Em especial, as análises realizadas nesses dois módulos, muitas vezes, ajudam o decisor a escolher um curso de ação para o problema de decisão de forma mais consistente, mesmo que indiretamente.

Para os procedimentos de eliciação de conhecimento *a priori* sobre as probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais descritos nas seções 2.4.1 e 2.4.2., o tipo de diálogo empregado deve basear-se no de Entradas/Saídas e de Perguntas e Respostas, respectivamente.

Por ser mais simples e de menor flexibilidade em relação à natureza e ao volume de informação requisitado ao usuário, o método de Martz & Waller (1982), o diálogo realizado através de uma estrutura de perguntas e respostas é satisfatório. Já para o método das probabilidades equiprováveis (RAIFFA, 1970), a interação entre usuário e sistema é mais intensa, sendo a estrutura de entradas e saídas de maior adaptabilidade ao contexto. Além do estabelecimento dos intervalos equiprováveis, assim como descrito em 2.4.1, este módulo requer a visualização da fase de análise de regressão, análise esta que requer maior participação do usuário.

4.4.3 Diálogo dos módulos de cálculo

Com relação ao componente diálogo, o único módulo de cálculo envolvido é o de análise das conseqüências inerentes à ocorrência dos cenários acidentais, já que o módulo de cálculo numérico é constituído apenas de algoritmos de cálculo estruturados internamente ao código do SAD e, portanto, não possui a componente diálogo.

No que se refere ao módulo de análise de conseqüências, o diálogo tem como forte característica a necessidade, normalmente, da presença de um analista de apoio, capaz de operar e interpretar os resultados, capaz de orientar e guiar o decisor durante a análise. Como afirmado anteriormente, a construção deste módulo pode ser preterida pelo uso integrado de um sistema especializado nas análises a serem realizadas. Seguindo esta linha de pensamento, é aceitável que, pela necessidade evidente de um apoio especializado de um analista, pode-se trabalhar com um diálogo através de linguagens de comando para o módulo de análise e cálculo das conseqüências. Deve-se ponderar que o analista é um usuário considerado experiente, possuidor de um conhecimento prévio do sistema especializado ou do módulo em questão, e que o uso de um componente diálogo através de linguagens de comando pode conferir maior eficiência a esta fase da análise de risco em gasodutos. Tal ponto é

importantíssimo, já que grandes esforços são demandados nesta fase mais técnica do modelo de decisão.

4.4.4 Diálogo do módulo de estimação de riscos, *ranking* das seções e análise dos resultados

Sem dúvida, o módulo de estimação de riscos, determinação do *ranking* das seções e análise dos resultados é aquele cuja qualidade do diálogo utilizado está fortemente ligada à eficácia de seus resultados e eficiência de seus procedimentos e, por conseguinte, à eficácia da análise de risco e eficiência dos procedimentos da análise. Nesse caso, é importante definir qualidade como adequação ao uso. Enfatizar este conceito é essencial à compreensão exata da importância do diálogo para este módulo: a adequação ao uso liga-se justamente às necessidades do decisor ao interagir, de forma direta ou indireta, com sistema de apoio a decisão; para este módulo, um componente diálogo eficaz e eficiente deve satisfazer às necessidades de análise dos resultados pelo decisor, prover ferramentas flexíveis para análise, em suma dar suporte completo à tomada de decisão.

Dito isto, é recomendável estabelecer o componente diálogo deste módulo como uma combinação de opções de diálogo, de modo a permitir ao usuário selecionar o de sua preferência. Mesmo atrelando mais trabalho à fase de construção e desenvolvimento do sistema, os benefícios advindos durante os procedimentos de análise de resultados são essencialmente maiores que os diversos tipos de custo envolvidos ao adicionar trabalho às fases de construção e desenvolvimento.

A estimação dos riscos e o estabelecimento do *ranking* das seções não devem consistir, simplesmente, em tornar visíveis os resultados decorrentes da realização das etapas anteriores. A base metodológica utilizada para o cálculo dos riscos em cada trecho do gasoduto não é de amplo conhecimento, de modo que o estabelecimento de índices entre -1 e 0 não é informativo para usuários que não estiverem a par dos conceitos do modelo multicritério utilizado. Além disso, devido a características de raridade dos eventos acidentais, os índices de risco tendem a diferenciar-se apenas com certo número de casas decimais, dificultando ainda mais a análise numérica dos índices de risco. Dessa forma, podem ser realizadas transformações lineares de escala de modo a representar os índices de risco de forma mais clara aos usuários finais do SAD. Este tipo de transformação já foi comentado na seção 3.3.9, e é possível graças a escala intervalar da função utilidade.

É bastante importante o uso de recursos gráficos que contribuam ao aspecto cognitivo do diálogo deste módulo. As análises mais importantes do processo de apoio a decisão serão realizadas neste módulo, como por exemplo, análise de sensibilidade nos parâmetros, estabelecimento de cenários, busca por metas estabelecidas, dentre outros.

5 Conclusão

O conteúdo exposto neste trabalho teve por objetivo estruturar metodologicamente o desenho e a construção de um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) para Análise de Risco em Gasodutos, estabelecer os respectivos módulos do sistema e descrever os aspectos que envolvem o desenho e construção destes módulos do SAD. Nesse sentido, foram desenvolvidos tópicos relacionados à revisão bibliográfica das áreas de conhecimento envolvidas, à descrição e análise do modelo de decisão a ser utilizado e, finalmente, ao desenho e descrição do sistema de apoio a decisão proposto.

O uso de um sistema de apoio a decisão no contexto de análise de risco em gasodutos mostra-se pertinente ao considerarmos a característica não estruturada do problema, o grande número de variáveis e parâmetros envolvidos, assim como a flexibilidade necessária durante o procedimento de análise das seções. Há uma compatibilidade natural entre as funcionalidades básicas de um SAD e as características inerentes ao tipo de decisão a qual pretende-se apoiar ou suportar. O problema tratado é não estruturado, é de grande porte, considera a subjetividade no processo decisório. O SAD constitui-se, então, como uma ferramenta que viabiliza o enfrentamento desse tipo de problema de forma efetiva.

Portanto, a proposta e concepção deste SAD ocorreu de forma natural, como uma etapa subsequente à proposta de Brito & Almeida (2009) de um modelo de decisão para analisar quantitativamente riscos, no contexto de transporte de gás natural via gasodutos. Dessa forma, a descrição e desenho do sistema são diretamente ligadas aos conceitos, etapas e procedimentos atrelados à estrutura da modelagem abordada.

Nessa revisão de literatura, pôde-se identificar tópicos relativos aos conceitos introdutórios acerca de Sistemas de Apoio a Decisão (SAD), Apoio Multicritério a Decisão (AMD) e modelos probabilísticos necessários à elicitação de conhecimento *a priori*. Há ainda uma seção que trata dos conceitos acerca de *risco* e análise de risco em gasodutos de gás natural. É oportuno registrar que a estrutura metodológica que embasa os modelos do SAD proposto é genérica, no sentido que essa estrutura não está atrelada somente ao contexto de análise de risco ou análise de risco em gasodutos. Ou seja, caso se deseje trabalhar com Sistemas de Apoio a Decisão noutros contextos de decisão, pode-se trabalhar de forma semelhante tanto com a estrutura do modelo de decisão como com a abordagem adaptativa para desenvolvimento de SAD's.

Quanto ao modelo de decisão a ser adotado como base para o sistema de apoio a decisão, foram explicitadas as etapas descritas por Brito & Almeida (2009) e realizadas algumas observações e propostas quanto a possibilidades de alteração ou adaptação do modelo a ser incorporado ao SAD. Em virtude de tais análises das etapas do modelo de decisão, foram identificados alguns *insights* de grande relevância para a proposta do sistema, tais como os aspectos presentes no relacionamento entre as etapas do modelo quando observadas sob o ponto de vista dos requisitos dos módulos do SAD, a estrutura do banco de dados do sistema, a dependência de grande parte dos módulos do sistema com o Módulo de cálculo numérico e os diferentes níveis de criticidade da componente diálogo em cada módulo do sistema de modo que cada um possa atingir os níveis de desempenho desejados.

Durante a realização deste trabalho, evidenciou-se o caráter modular da estrutura do SAD. As etapas do modelo de decisão que dá base ao SAD são bastante diversificadas tanto em relação ao conhecimento necessário às suas realizações como no que diz respeito ao tipo de interação entre o usuário e o sistema que deve dar suporte ao processo decisório. É importante registrar que grande parte da base de dados necessária ao uso efetivo do sistema possivelmente servirá para análises que atendam outra metodologia para quantificação de riscos.

Outro aspecto evidenciado durante a realização deste trabalho é a constatação clara da adequação do uso da abordagem adaptativa de desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão. Conforme discutido no capítulo 4, o estudo a respeito do SAD proposto passou por várias fases, que não se apresentaram de maneira seqüencial, mas sim ocorreram de forma não estruturada. Em várias ocasiões, foram revistas etapas anteriores, seja realizando pequenas adaptações ou até a reestruturação total da etapa. A dissertação, portanto, foi construída de forma semelhante: tomando por base um processo de *feedback* contínuo à elaboração do texto do trabalho. Dessa maneira, a constatação da adequação da abordagem adaptativa ao desenvolvimento do SAD norteou também, consideravelmente, parte do processo de elaboração deste trabalho.

É imprescindível também verificar que a realização de uma análise de risco, seja tal análise suportada ou não por um SAD, deve caminhar ao lado de outras atividades obrigatórias a uma gestão de riscos eficiente, que por sua vez está posicionada num contexto mais amplo de uma política empresarial de saúde, segurança e meio ambiente. A análise de risco provê informações sobre a realidade com a qual está trabalhando-se, porém, não é capaz de fomentar, isoladamente, os processos de gerenciamento de riscos.

Por fim, conclui-se que o trabalho conseguiu alcançar o objetivo ao qual se propôs, vislumbrando também oportunidades de trabalhos futuros. A proposta e definição do desenho do SAD foram realizados em conjunto com o desenvolvimento de seções que abordam tópicos condizentes com o modelo de decisão e o contexto no qual está inserido o sistema. Como sugestões para trabalhos futuros relacionados aos tópicos desenvolvidos ao longo da dissertação podem ser citados:

- Proposição de SAD que atenda outro contexto de decisão em atividades sob risco, como por exemplo em outras atividades da cadeia produtiva do petróleo e gás natural, tais como plataformas e sondas de produção de petróleo, refinarias, etc.;
- Desenvolvimento computacional do SAD proposto, sobretudo a construção da interface dos módulos de diálogo descritos no capítulo 4;
- A incorporação das propostas de adaptação e observações ao modelo de decisão;
- Desenvolvimento de modelos para quantificação de risco que sigam outros procedimentos no contexto do Apoio Multicritério a Decisão;
- Desenvolvimento de procedimentos de elicitação de conhecimento *a priori* específicos para realização de Análises de Risco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, R; ROBERGE, L; TANNIRU, M. R. MIS planning: A methodology for systems prioritization. *Information & Management*, v.27, p.261-274, 1994.
- AHITUV, N.; NEUMANN, S. *Principles of information systems for management*. Vm. C. Brown Company Publishing, 1983.
- ALAVI, M.; NAPIER, A. *Aplicação da abordagem adaptativa ao desenvolvimento de DSS: um experimento*. In: SPRAGUE Jr., R. H.; WATSON, H. J. *Decision support systems: putting theory into practice*. Prentice Hall, 1989.
- ALBADVI, A. Formulating national information technology strategies: A preference ranking model using PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, Volume 153, Issue 2, 1 March 2004, Pages 290-296
- ALMEIDA, A. T. de (Org.) ; RAMOS, F. S. (Org.) . *Gestão da informação na competitividade das organizações*. 2.ed. Recife: Editora Universitaria, 2002.
- ALMEIDA, A.T. de; COSTA, A. P. C. S. Modelo de decisão para priorização no Sistemas de Informação com base no método PROMETHEE. *Gestão & Produção*, v. 9, n.2, p. 201-214, 2002.
- ALMEIDA, A.T. de (Org); COSTA, A. P. C. S. (Org) *Aplicações com métodos multicritério de apoio a decisão*. Recife: Editora Universitária, 2005.
- Almeida, A T (Org.) ; SOUZA, F. M. C. de (Org.) . *Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade*. 1. ed. Recife: Editora Universitária, 2001. v. 1. 380 p.
- ARNALDOS, J.; CASAL, J.; MONTIEL, H.; SANCHEZ-CARRICONDO, M.; VILCHEZ, J.A. Design of a computer tool for the evaluation of the consequences of accidental natural gas releases in the distribution pipes. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, v.11, p.135-148, 1998.
- ASSMUTH, T; HILDÉN, M. The significance of information frameworks in integrated risk assessment and management. *Environmental Science & Policy*, v.11, p.71- 86, 2008.
- AVEN, T; VINNEM, J.E.; WIENCKE, H.S. A decision framework for risk management, with application to the offshore oil and gas industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 433-448, 2007.
- BALL, D. J. Environmental risk assessment and the intrusion of bias. *Environment International*, v.28, p.529– 544, 2002.
- BERGER, J.O. *Statistical decision theory and Bayesian analysis*. New York: Springer; 1985

- BERNROIDER, E. W. N.; STIX, V. Profile distance method—a multi-attribute decision making approach for information system investments. *Decision Support Systems*, v.42, p.988–998, 2006.
- BIER, V.M.; HAIMES, Y.Y.; LAMBERT, J.H.; MATALAS, N.C.; ZIMMERMAN, R.. A Survey of Approaches for Assessing and Managing the Risk of Extremes. *Risk Analysis*, Vol. 19, No. 1, 1999.
- BIGDOLI, H. *Decision Support Systems – Principle and Practice*. West Publishing Company, 1989.
- BRAGA, B. *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, 2002
- BRANS, J. P.; VINCKE, P.H. A preference ranking organization method, the PROMETHEE method for MCDM. *Management Science*, v.31, p647-656, 1985.
- BRITO, A. J. de M. *Avaliação multicritério de riscos em gasodutos de gás natural: uma abordagem de classificação com Electre Tri*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Recife, 2007.
- BRITO, A.J.; DE ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliab Eng Syst Safety* (2009), v. 94 (2009) p. 187–198. doi:10.1016/j.res.2008.02.014
- CAMPELLO DE SOUZA, F. M. *Decisões racionais em situações de incerteza*. 2.ed., Editora Universitária da UFPE: Recife, 2005.
- CAVALCANTE, C.A.V.; ALMEIDA, A. T. de. A multi-criteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventing maintenance planning under uncertain conditions. *Journal of Quality in Maintenance*, v.13, p. 385-397, 2007.
- CLÍMACO, J.C. N. An critical reflection on optimal decision. *European Journal of Operational Research*, v.153, p.506–516, 2004.
- CRAWLEY, F. K.; LINES, I. G. ; MATHER, J. Oil and gas pipeline failure modelling. *Trans IChemE*, v.81, p.3-11, 2003.
- CTGAS^a. *Centro de Tecnologia do Gás*. Usos e Vantagens do GN. Disponível em: <http://www.ctgas.com.br/template02.asp?parametro=2547>. Acesso em: 06/05/2008.
- CTGAS^b. *Centro de Tecnologia do Gás*. Usos e Vantagens do GN. Disponível em: <http://www.ctgas.com.br/template02.asp?parametro=95>. Acesso em: 06/05/2008.
- DAVIS, C. B. & OLSON, M. H. *Management Information Systems: Conceptual Foundations, Structure and Development*. McGraw-Hill, 1885.

- DEY, P.K.; TABUCANON, M.T.; ONGULANA, S.O. Petroleum pipeline construction planning: a conceptual framework. *International Journal of Project Management*, v.14, p.231-240, 1996
- DZIUBNSKI, M.; FRATCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *J Loss Prevent Process Ind*, v.19, p.399–408, 2006.
- EDWARDS, W; BARRON, F. H. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, v.60, p.306-325, 1994.
- FAYERWEATHER, W.E.; COLLINS, J.J; SCHNATTER, A.R.; HEARNE, F.T.; MENNING, R.A; REYNEFL, D.P. Quantifying Uncertainty in a Risk Assessment Using Human Data. *Risk Analysis*, Vol. 19, No. 6, 1999.
- FROHWEIN, H.I.; LAMBERT, J.H., HAIMES, Y.Y. Alternative measures of risk of extreme events in decision trees. *Reliability Engineering and System Safety*, 66, 69-84, 1999.
- GILPIN, A. *Environmental impact assessment (EIA) cutting edge for the twenty-first century*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S. & ALMEIDA, A.T. *Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério*. 2.ed., Editora Atlas, Rio de Janeiro, 2006.
- HAASTRUP, P.; MANIEZZO, V.; MATTARELLI, M.; MAZZEO RINALDI, F.; MENDES, I.; PARUCCINI, M. A decision support system for urban waste management. *European Journal of Operational Research*, V.109, p.330-341, 1998
- HAMILTON, A.J. Species diversity or biodiversity? *Journal of Environmental Management*, v.75, p.89-92, 2005.
- HOKSTAD, P.; STEIRO, T. Overall strategy for risk evaluation and priority setting of risk regulatios. *Reliability Engineering and System Safety*, v.91 ,p.100-111, 2006.
- IBAMA. *Avaliação de impacto ambiental: agentes sociais, procedimentos e ferramentas*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1995.
- JO, Y.D., AHN, B. J. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. *Journal of Hazardous Materials*, v. A123, p. 1-12, 2005.
- 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, p.179-186, 2002.
- KEENEY, R.L. *Value-focused thinking*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992.

- KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. *Decision with Multiple Objectives: Preferences and value trade-offs*. John Wiley & Sons, 1976.
- KHAN, F. I.; SADIQ, R.; HADDARA, M.M. RISK-BASED INSPECTION AND MAINTENANCE (RBIM) Multi-attribute Decision-making with Aggregative Risk Analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 82(B6): 398–411, 2004.
- MARTZ, H. F.; Waller, R. A. *Bayesian Reliability Analysis*. John Wiley & Sons, pp.745p, 1982.
- MAVROTAS, G.; DIAKOULAKI, D. & CALOGHIROU, Y. 2006. Project prioritization under policy restrictions. A combination of MDCA with 0-1 programming. *European Journal of Operational Research*, 171:296-308.
- McDANIELS, T; LONGSTAFF, H; DOWLATABADI, H. A value-based framework for risk management decisions involving multiple scales: a salmon aquaculture example. *Environmental Science & Policy*, v. 9, p.423-438, 2006.
- MACGILL, SM.; SIU, Y.L. A new paradigm for risk analysis. *Futures*, v.37, p.1105-1131, 2005.
- MELCHERS, R.E. On the ALARP approach to risk management. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 71, p.201-208, 2001.
- OMONBUDE, E.J. The transit oil and gas pipeline and the role of bargaining: A non-technical discussion. *Energy Policy*, v.35, p.6188–6194, 2007.
- PAPADAKIS, G. A. Major hazard pipelines: a comparative study of onshore transmission accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 91-107, 1999.
- PRESSMAN, R. S. *Engenharia de Software*. 5.ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.
- RAIFFA, H. *Decision analysis*. Reading, MA: Addison-Wesley; 1970.
- RECHELO NETO, C.A.; SAUER, I.L. LNG as a strategy to establish developing countries' gas markets: The Brazilian case. *Energy Policy*, v.34, 4103–4114, 2006.
- RENKEMA, T. J. W.; BERGHOUT, E. W. Methodologies for information systems investment evaluation at the proposal stage: a comparative review. *Information and Software Technology*, v.39, p.1-13, 1997.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- SAATY, R.W. The analytical hierarchy process: What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, v.9, p.161-176, 1987.

- SCHAFER, A.G. *O item "Danos devido a ação de terceiros" na estruturação de um SIG para avaliação de risco em linhas de dutos*. Anais do COBRAC 2006 – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, 2006.
- SKLAVOUNOS, S; RIGAS, F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 83-88, 2006.
- SOWLATI, T.; PARADI, J. C.; SULD, C.. Information systems project prioritization using data envelopment analysis. *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 41, Issues 11-12, May 2005, Pages 1279-1298
- SPRAGUE Jr., R. H.; WATSON, H. J. *Decision support systems: putting theory into practice*. Prentice Hall, 1989.
- SRA. *Society for Risk Analysis*. Risk Analysis Glossary. Disponível em http://www.sra.org/resources_glossary_p-r.php. Acesso em 06/05/2008.
- TURBAN, E.; ARONSON, J. E.; LIANG, T. P. *Decision support systems and intelligent systems*. Prentice Hall, 2005.
- TURBAN, E.; RAINER, R. K. Jr.; POTTER, R. E. *Administração de tecnologia da informação*. Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- VON NEUMAN, J.; MORGESTEN, O. *Theory of Games and Economic Behaviour*. , University Press, Princeton, 1944.
- WEI, C-C, CHIEN, C-F, WANG M-J J. An AHP-based approach to ERP system selection *Chun-Chin Int. J. Production Economics*,v. 96, p.47–62, 2005.
- WESTMAN, W. E.. *Ecology, impact assessment, and environmental planning*. New York: J. Wiley, 1985.
- WU, T.H.; LIN, J.N. Solving the competitive discretionary service facility location problem. *European Journal of Operational Research*, v. 144, p. 366–378, 2003.
- WU L.-C., ONG C.-S., Management of information technology investment: A framework based on a Real Options and Mean–Variance theory perspective. *Technovation* (2007), doi:10.1016/j.technovation.2007.05.011.
- ZAMBOM, K.L.; CARNEIRO, A.A.F.M.; SILVA, A.N.R.; NEGRI, J.C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. *Pesquisa Operacional*, v.25, n.2, p.183-199,2005.
- ZELENY. M. Multiple criteria decision making: eight concepts of optimality. *Human Systems Management*, v.17, p.97–107, 1998.

ZÚÑIGA-GUTIÉRREZ, G., ARROYO-CABRALES, J., LECHUGA, C., ORTEGA-RUBIO, A. Environmental quantitative assessment of two alternative routes for a gas pipeline in Campeche, Mexico. *Landscape and Urban Plannig*, v.59, p.181-186, 2002.

ANEXO 1

O ANEXO 1 está baseado no trabalho de Brito (2007) e trata da estimação das conseqüências em cada dimensão de risco, assim como das probabilidades de ocorrência de tais conseqüências. Aqueles parâmetros cuja definição esteja suprimida já foram detalhados na seção 4.1.2.

DIMENSÃO HUMANA

Utiliza-se a transformação *PROBIT*, que associa o nível de radiação térmica à probabilidade (P) de ocorrência de um determinado dano físico em uma pessoa, neste caso uma fatalidade, a partir de um *probit* Y.

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

Considera-se Y como uma variável gaussiana de média 5 e variância 1, cujo valor é determinado a partir das equações abaixo:

$$Y = k_1 + k_2 \ln(V)$$

$$V = t \cdot I^{4/3}$$

Entende-se V como uma variável de causa que, neste contexto, corresponde a uma carga térmica absorvida por um indivíduo. Dessa forma, k_1 e k_2 são constantes determinadas experimentalmente, t é o tempo de exposição em segundos e I é o fluxo radiacional de calor (kW/m^2). Calcula-se a probabilidade de uma pessoa ser atingida pela radiação térmica decorrente de algum dos cenários acidentais e apresentar danos físicos, como queimaduras de primeiro e segundo grau:

$$\delta = \alpha_{\theta,i} \cdot \omega \cdot P$$

Onde P é a probabilidade obtida pela probit, α e ω já foram detalhadas na seção 4.2.1.

Por fim, considerando que o ferimento de cada indivíduo em um cenário acidental corresponde a um ensaio independente de Bernoulli, a probabilidade de ocorrer uma conseqüência p_h , dado que ocorreu a falha j e o cenário acidental k :

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

Que é utilizada no cálculo da utilidade esperada da consequência humana, definida por:

$$u(P(p_h | \theta_{jk}, a_i)) = \sum_{p_h=0}^{n_i} \left[\binom{n_i}{p_h} \cdot \delta^{p_h} \cdot (1 - \delta)^{n - p_h} \cdot u(p_h) \right]$$

DIMENSÃO AMBIENTAL

Para calcular as consequências ambientais (neste caso, a área vegetal p_a atingida) considera-se a expressão a seguir:

$$p_a = \cdot S_i \cdot [1 - \exp(-\lambda_{\theta,i} \cdot \bar{I}_\theta \cdot t_Q)]$$

Onde :

t_Q é o tempo até que as chamas decorrentes da ignição do gás e da queima de material combustível sejam apagadas (segundos);

\bar{I}_θ é o fluxo radiacional médio de calor associado a um cenário acidental θ_{jk} (kW/m²);

S_i é a área de vegetação presente na zona de perigo associada ao trecho a_i (m²) ou na qual esta última está inserida;

$\lambda_{\theta,i}$ é uma constante associada ao cenário e ao trecho (m²/kJ);

Considera-se que o tempo t_Q segue uma distribuição binomial e, portanto, calcula-se a função de densidade de probabilidade da extensão de área queimada devido ao acidente e a respectiva utilidade esperada da consequência ambiental:

$$f(p_a | \theta_{jk}, a_i) = - \frac{u_{\theta,i}}{\lambda_{\theta,i} \cdot \bar{I}_\theta} \left[\frac{\left(1 - \frac{p_a}{S_i}\right)^{\frac{u_{\theta,i}}{\lambda_{\theta,i} \cdot \bar{I}_\theta}}}{p_a - S_i} \right]$$

$$u(P(p_a | \theta_{jk}, a_i)) = \int_0^{S_i} - \frac{u_{\theta,i}}{\lambda_{\theta,i} \cdot \bar{I}_\theta} \left[\frac{\left(1 - \frac{p_a}{S_i}\right)^{\frac{u_{\theta,i}}{\lambda_{\theta,i} \cdot \bar{I}_\theta}}}{p_a - S_i} \right] \cdot u(p_a) dp_a$$

DIMENSÃO FINANCEIRA

Para o cálculo da consequência financeira p_f devido a um cenário acidental, utiliza-se as funções abaixo, que tratam, respectivamente, das perdas por faturamento cessante, perdas por ressarcimento a clientes empresariais cujo atendimento tiver sido interrompido e perdas por danos a propriedades, multas e indenizações por danos físicos:

$$F(t_Q) = v \cdot R \cdot t_i + v \cdot L_i \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + v \cdot Q \cdot t_R = v \cdot R \cdot t_i + v \cdot L_i \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + v \cdot Q \cdot k_i \cdot t_Q$$

$$W(t_Q) = w_i \cdot (t_Q + t_R) = w_i \cdot (1 + k_i) \cdot t_Q$$

$$M(t_Q) = \beta \cdot \bar{I}_\theta \cdot A_i \cdot t_Q$$

Dessa forma, determina-se p_f e, considerando t_Q como seguindo uma distribuição exponencial, assim como na análise da dimensão ambiental, obtém a função densidade de probabilidade para p_f

$$P_f = F(T_Q) + W(T_Q) + M(T_Q)$$

$$f(p_f | \theta_{jR}, a_i) = \frac{u_\theta}{\xi_i} \exp\left(-u_\theta \cdot \frac{p_f - \eta_i}{\xi_i}\right)$$

Onde:

$$\xi_i = w_i(1 + k_i) + v \cdot Q \cdot k_i + \beta \cdot \bar{I}_\theta \cdot A_i$$

$$\eta_i = v \cdot L_i \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + v \cdot R \cdot t_i$$

Ao final, determina-se a expressão para a utilidade esperada da consequência financeira:

$$u(P(p_f | \theta_{jk}, a_i)) = \int_0^{\infty} \frac{u_\theta}{\xi_i} \exp\left(-u_\theta \cdot \frac{p_f - \eta_i}{\xi_i}\right) \cdot u(p_f) dp_f$$

ANEXO 2

Este anexo apresenta telas dos softwares que estão sendo implementados, com base nos resultados desta dissertação, pelo Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão – GPSID. A seguir, estão dispostas figuras que representam diferentes etapas de construção e desenvolvimento do aplicativo, tanto no ambiente do Microsoft Excel (FIGURA 2A até a FIGURA 2K) como em ambiente MATLAB (FIGURA 2L até FIGURA 2O).

FIGURA 2A – Cadastro das seções (Excel)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		Descrição do trecho	(L) m	(d) m	(Q)	(v)	(wi)					
3	Trecho A	Distrito Industrial	700	0,203	1,9	0,68	21					
4	Trecho B	Terminal de Ônibus Urbano	1100	0,203	1,6	1,2	11					
5	Trecho C	Área Médica	500	0,203	1,3	1,2	18					
6	Trecho D	Área Residencial (baixa densidade)	500	0,203	1,2	1,2	12					
7	Trecho E	Shopping	700	0,203	1,2	1,46	5,3					
8	Trecho F	Área Residencial (média densidade) - Área de Preservação	1000	0,203	1	0,67	2,5					
9	Trecho G	Área Residencial (alta densidade)	500	0,203	0,6	1,46	7,5					
10	Trecho H	Área Residencial (alta densidade) - Classe Alta	1000	0,203	0,4	1,46	25					
11	Trecho I											
12	Trecho J											
13												
14												
15		Perda Monetária Máxima	10000000									
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												

FIGURA 2B – Descrição dos trechos (Excel)

Descrição do trecho	(RP) (%Veg)	(β)	(ni)	(ai)	(Rf)	(Rr)	
Trecho A Distrito Industrial	49,61	0,03	0,0007	30	0,05	0,9	1,9
Trecho B Terminal de Ônibus Urbano	49,16	0,03	0,0012	40	0,03	0,8	1,6
Trecho C Área Médica	38,47	0,03	0,0012	37	0,03	0,6	1,3
Trecho D Área Residencial (baixa densidade)	32,99	0,03	0,0012	27	0,07	0,6	1,2
Trecho E Shopping	30,3	0,03	0,0015	10	0,02	0,6	1,2
Trecho F Área Residencial (média densidade) - Área de Preservação	29,48	0,15	0,0007	30	0,005	0,5	1
Trecho G Área Residencial (alta densidade)	28,03	0,03	0,0015	50	0,01	0,3	0,6
Trecho H Área Residencial (alta densidade) - Classe Alta	47,3	0,03	0,0015	10	0,007	0,2	0,4
Trecho I							
Trecho J							

FIGURA 2C – Cadastro dos cenários de perigo (Excel)

DESCRÇÃO	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10
Determinístico										
prob a priori										
Trecho A	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho B	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho C	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho D	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho E	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho F	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho G	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho H	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho I	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003
Trecho J	0,002	0,003	0,004	0,005	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003

FIGURA 2D – Elicitação da função utilidade com aversão ao risco (Excel)

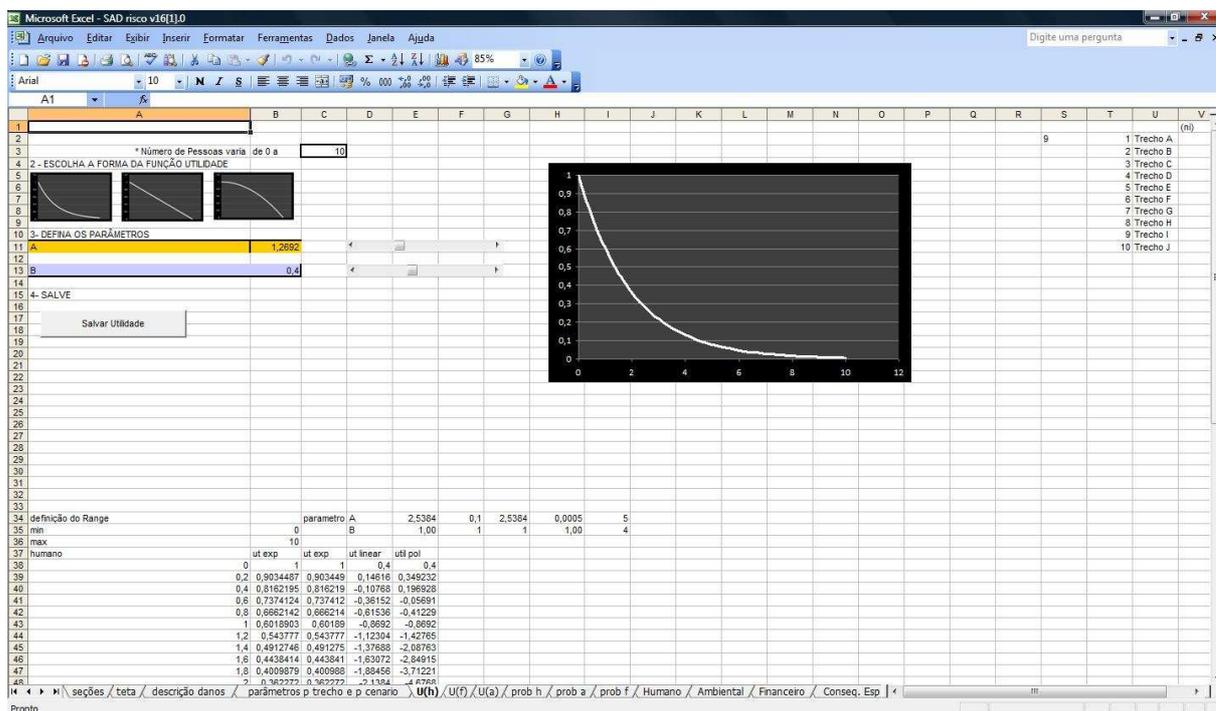


FIGURA 2E – Elicitação da função utilidade com propensão ao risco (Excel)

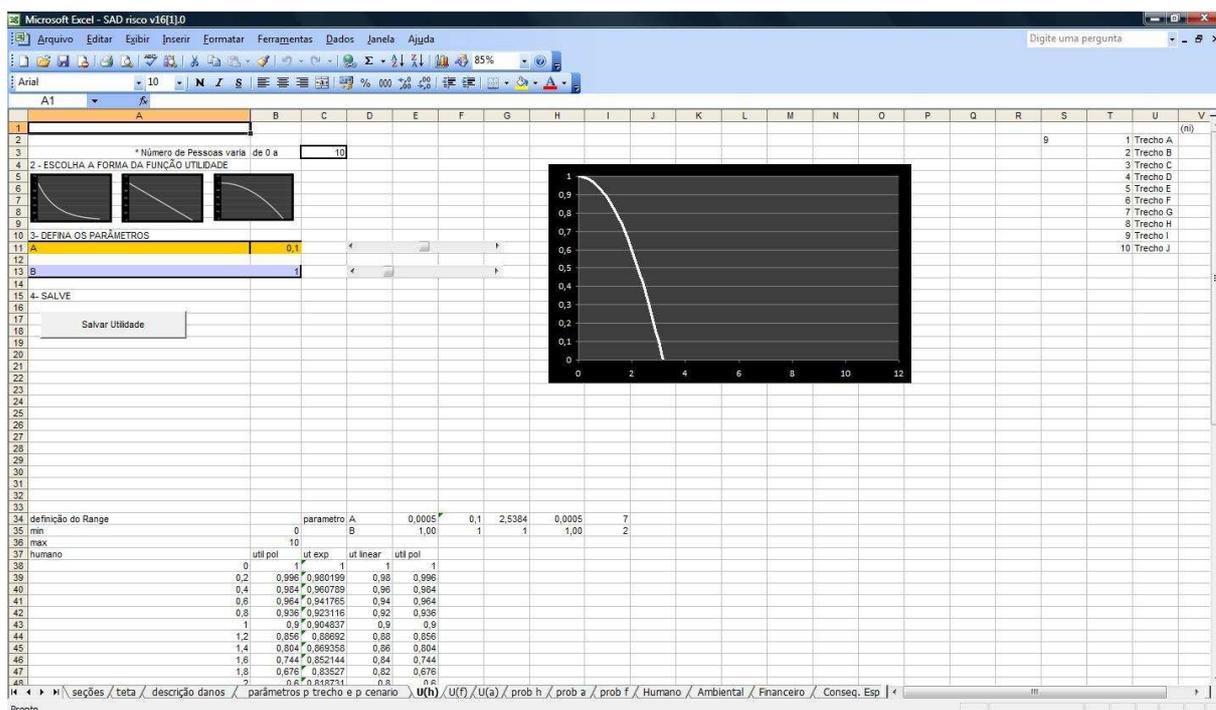


FIGURA 2F – Elicitação da função utilidade com comportamento neutro ao risco (Excel)

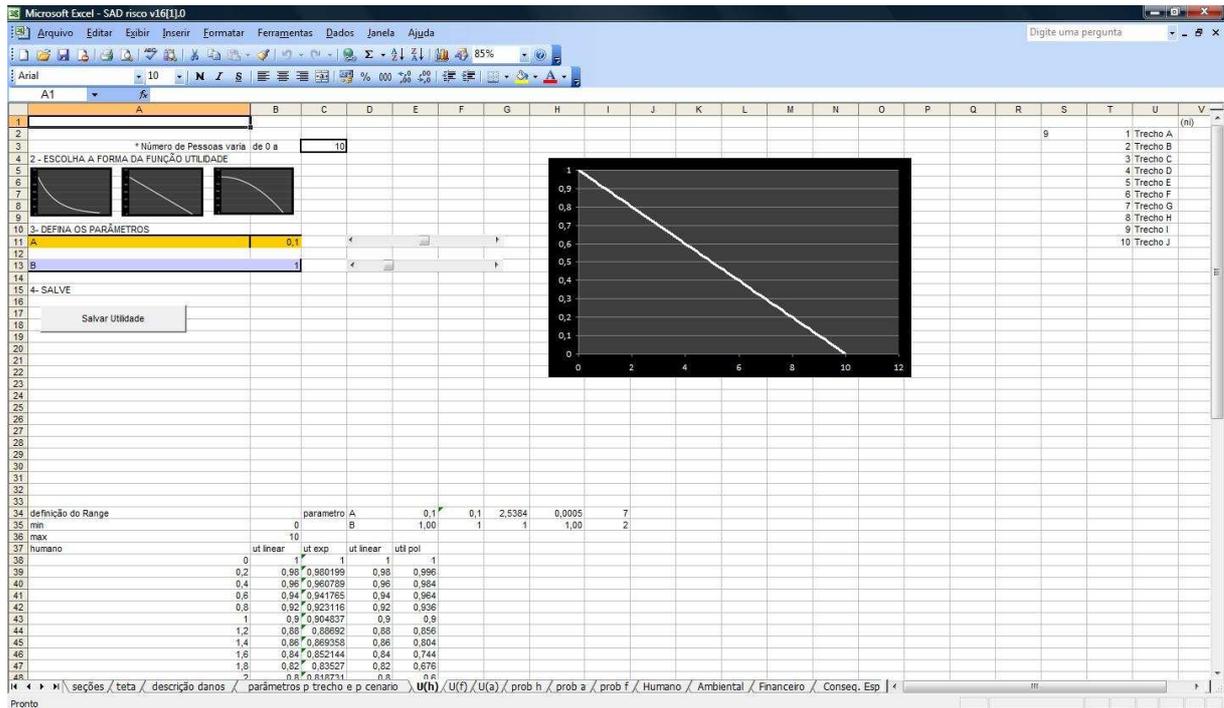


FIGURA 2G – Função consequência contínua (Excel)

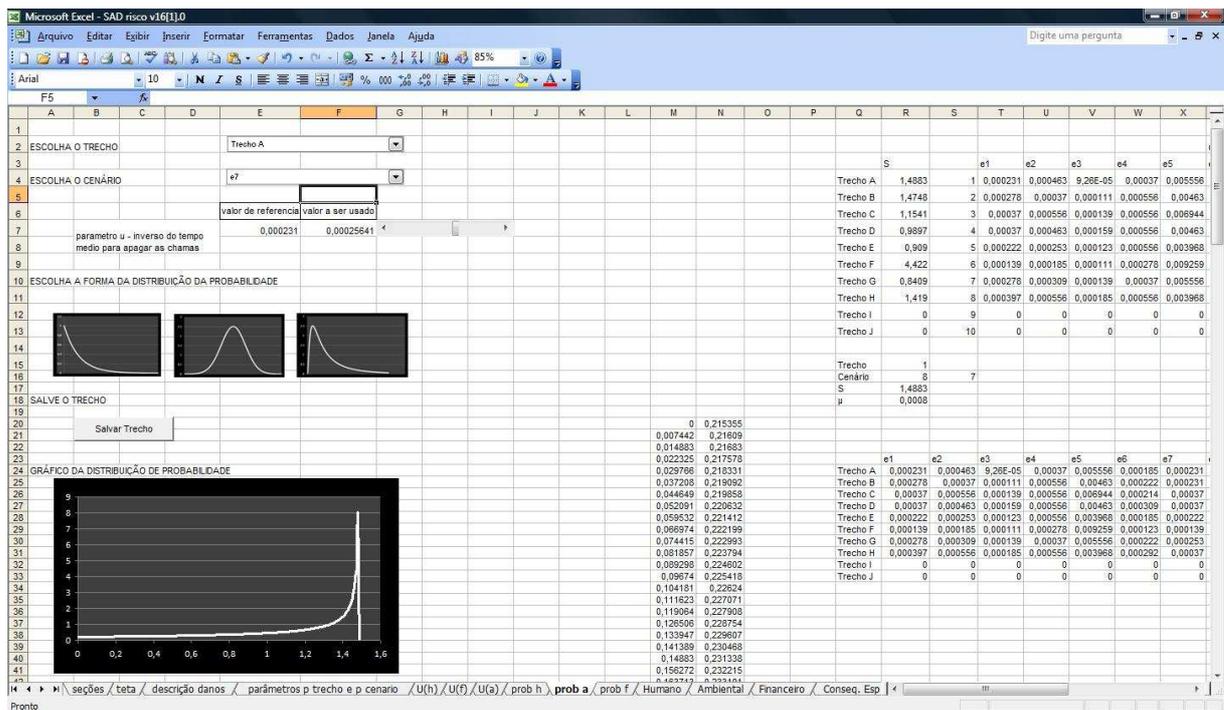


FIGURA 2H – Função consequência discreta (Excel)

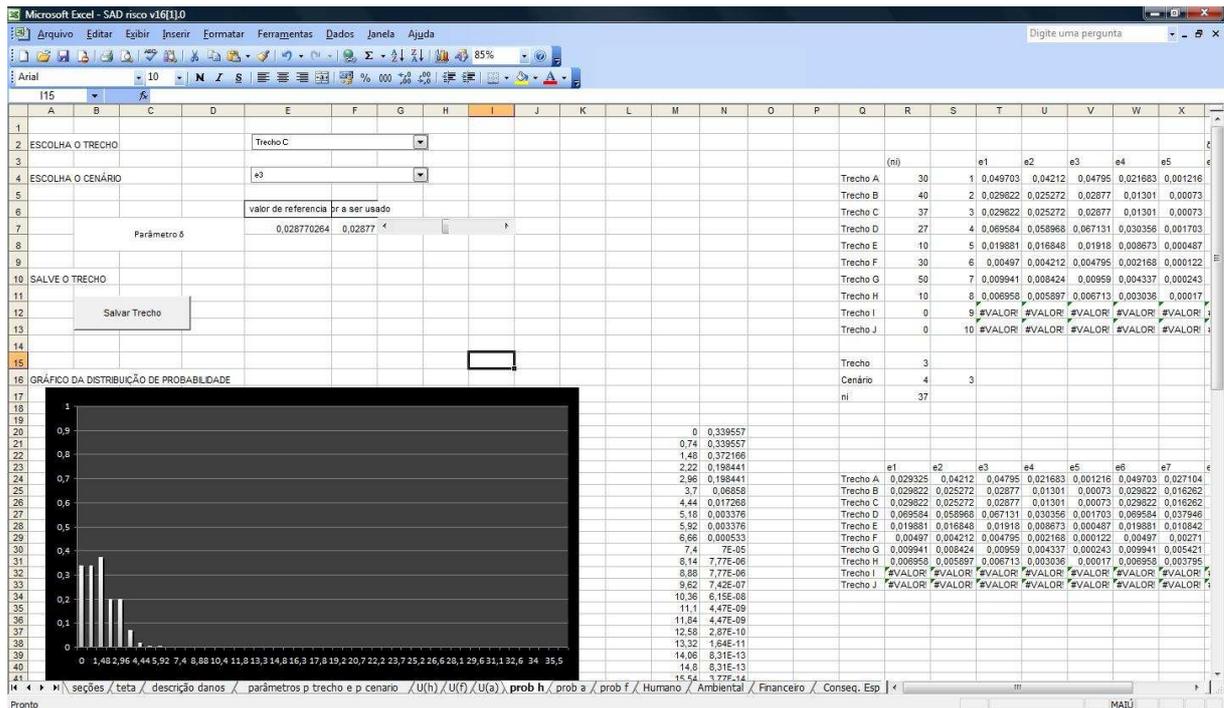


FIGURA 2I – Função consequência discreta com pequena dispersão (Excel)

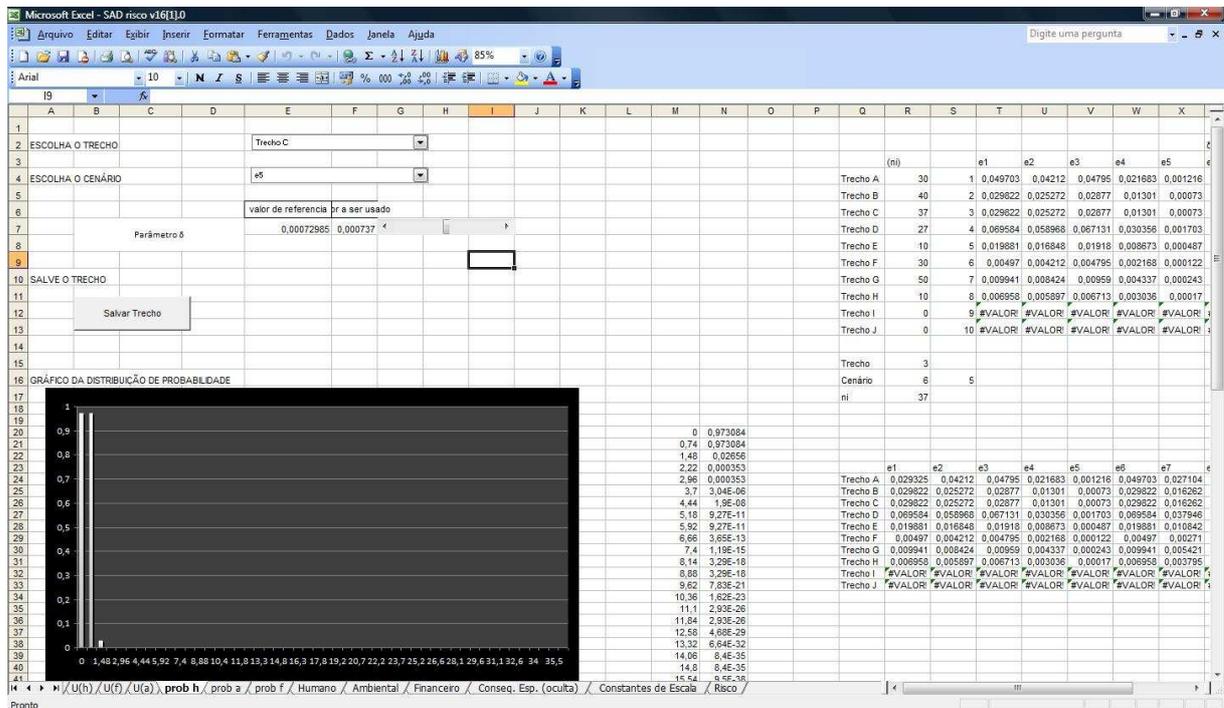


FIGURA 2J – Cálculo das utilidades das funções consequência na dimensão ambiental (Excel)

The screenshot displays an Excel spreadsheet with the following structure:

- Columns:** A-Z, with specific cells labeled e1 through e10.
- Rows:** 1-17 for environmental risks from rupture; 18-29 for environmental risks from fire; 30-36 for environmental risks from CVCE.
- Sub-headers:** "Riscos Ambientais devido ao cenário de detonação causado por uma ruptura", "Riscos Ambientais devido ao cenário de Bola/Jato de fogo causado por uma ruptura", and "Riscos Ambientais devido ao cenário de CVCE causado por uma ruptura".
- Data:** Tables for each scenario with columns for risk level (I), percentage of vegetation (%Veg), slope (S), and various utility parameters (u, U(P(eta,a))).
- Annotations:** "Calcular as Perdas Ambientais" and "Apagar Valores" are present as callouts.

FIGURA 2K - Cálculo das utilidades das funções consequência na dimensão financeira (Excel)

The screenshot displays an Excel spreadsheet with the following structure:

- Columns:** A-U, with specific cells labeled Rp, beta, v, Q, R, d, Li, Ai, wi, ki, ui, Epsilon, Neta, and U(P(eta,a)).
- Rows:** 1-17 for financial risks from rupture; 18-29 for financial risks from fire; 30-36 for financial risks from CVCE.
- Sub-headers:** "Riscos Financeiros devido ao cenário de detonação causado por uma ruptura", "Riscos Financeiros devido ao cenário de Bola/Jato de fogo causado por uma ruptura", and "Riscos Financeiros devido ao cenário de CVCE causado por uma ruptura".
- Data:** Tables for each scenario with columns for risk level (I), percentage of vegetation (%Veg), slope (S), and various utility parameters (u, U(P(eta,a))).
- Annotations:** "Calcular Perdas" and "Apagar Valores" are present as callouts.

FIGURA 2L – Desenvolvimento do código para cadastro das seções (MATLAB)

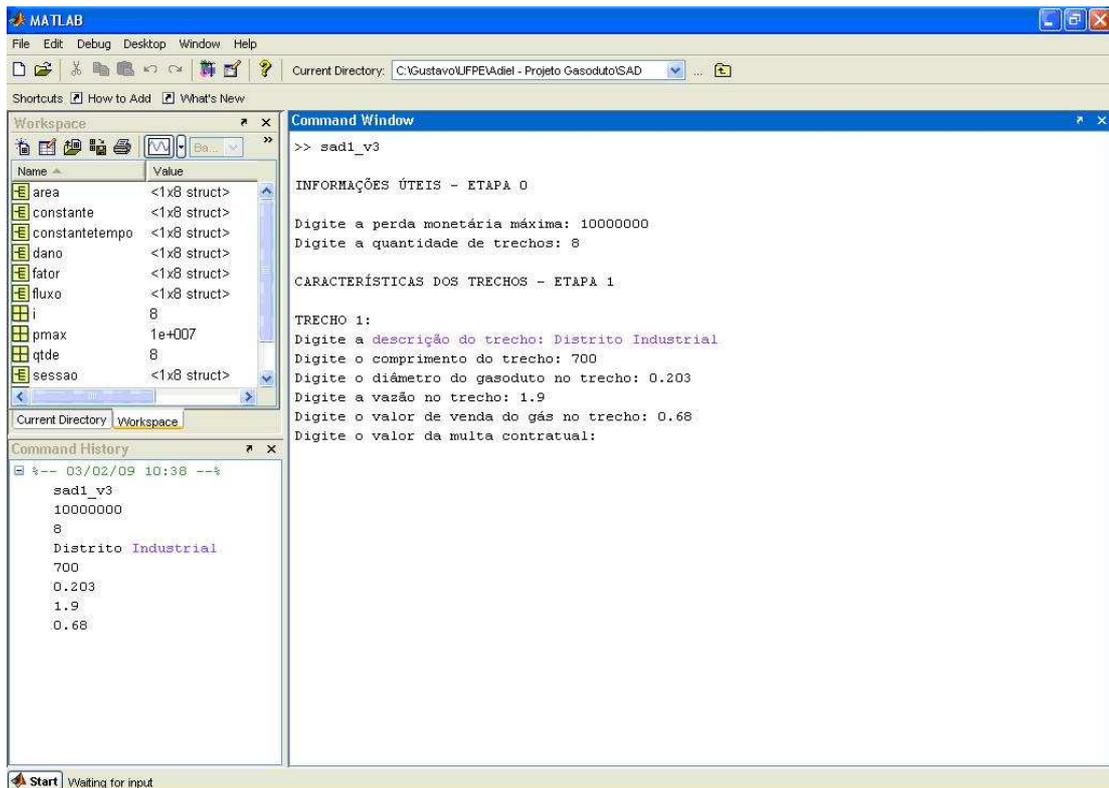


FIGURA 2M – Código para leitura e armazenamento dos dados (MATLAB)

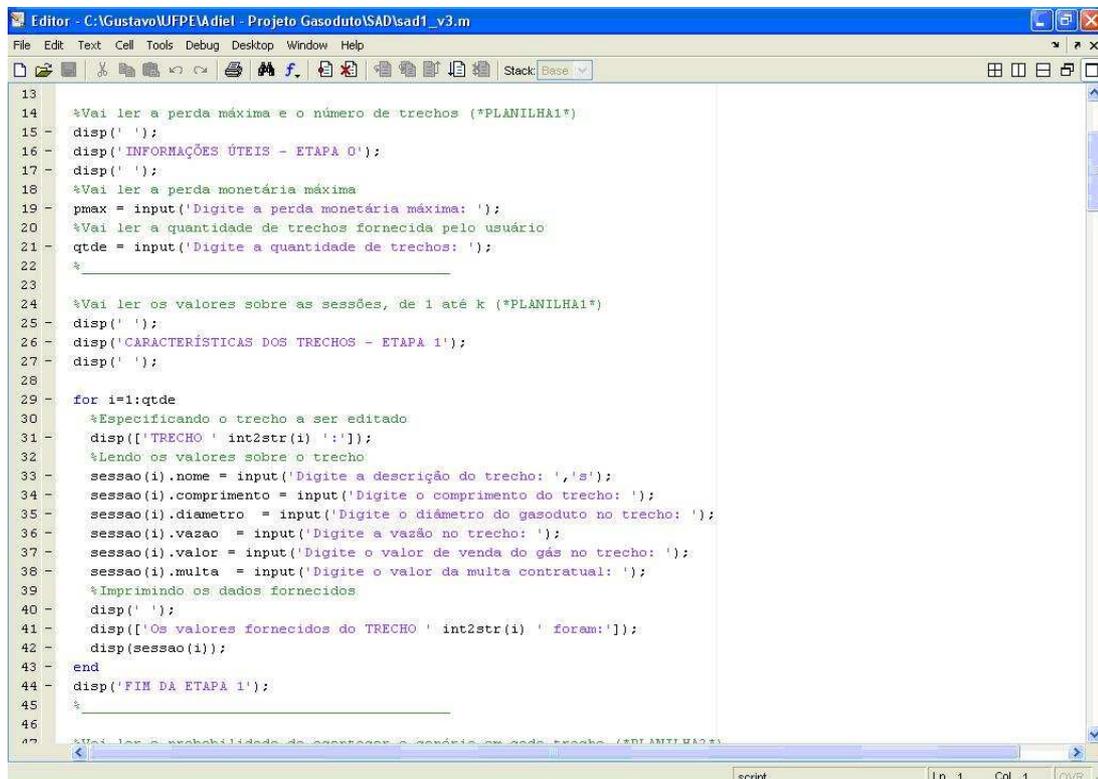


FIGURA 2N – Ajuste da função utilidade na dimensão humana (MATLAB)

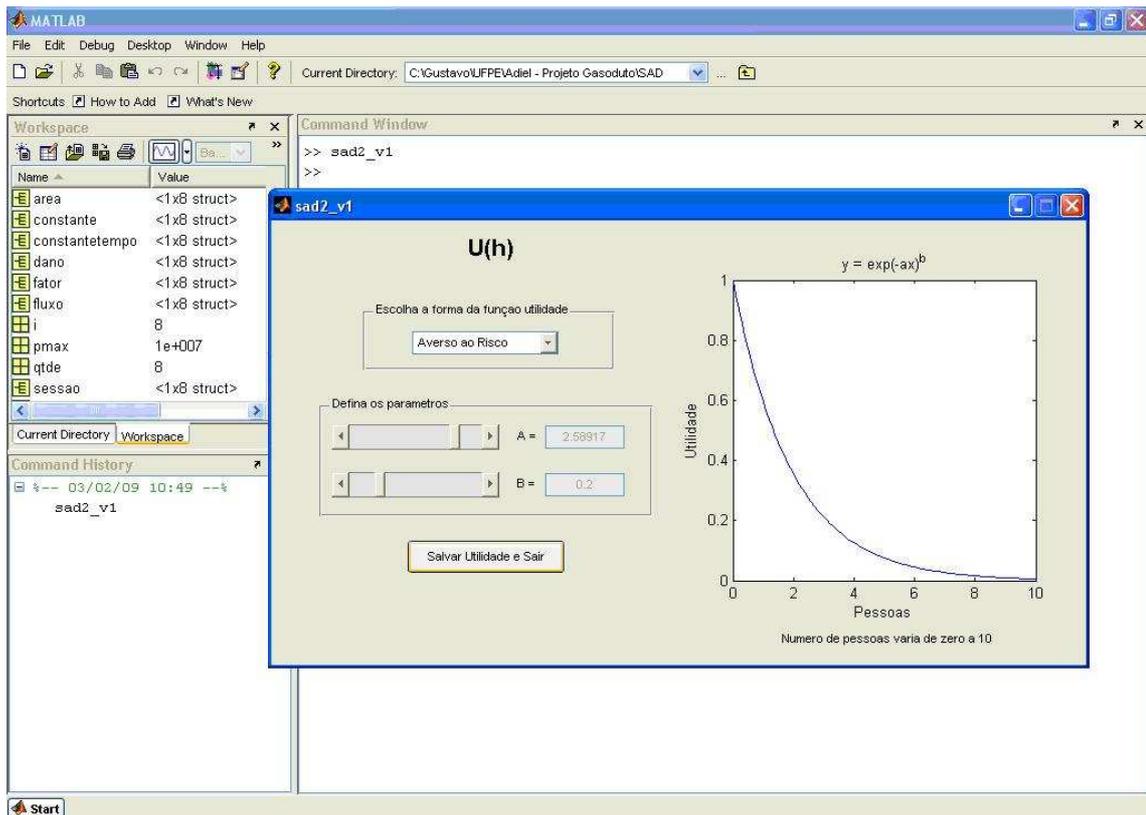


FIGURA 2O – Código para ajuste da função utilidade na dimensão humana (MATLAB)

```

130 function slider_Callback(hObject, eventdata, handles)
131 %Ao mexer no slider, o programa verificará se valor = 1 ou 2
132
133 if handles.valor == 1 % Se o usuário for averso ao risco
134 % Recebe o valor do slider que vai de 0 a 10
135 contsliderA1 = get(handles.sliderA, 'Value');
136 handles.contsliderA1 = contsliderA1;
137 guidata(hObject, handles);
138 % Calcula o valor de "a", a partir do contador e do "menor pessoas" e
139 % atribui ao editA o valor de a
140 a = (25.384/handles.menorpessoas) * ((handles.contsliderA1+2)/10);
141 set(handles.editA, 'String', a);
142 % Recebe o valor de "b" que está no slider
143 b = get(handles.sliderB, 'Value');
144 % Plota o gráfico da exponencial e dá título aos eixos e ao gráfico
145 y=exp(-a*handles.x).^b;
146 plot(handles.x,y);
147 title('y = exp(-ax)^b');
148 xlabel('Pessoas');
149 ylabel('Utilidade');
150 set(handles.grafico, 'YLim', [0 1]);
151 set(handles.grafico, 'YLimMode', 'manual');
152 % Salvando o y final escolhido
153 handles.yfinal = y;
154 guidata(hObject, handles);
155
156 else if handles.valor == 2 % Se o usuário for propenso ao risco
157 % Recebe o valor do slider que vai de 0 a 10
158 contsliderA2 = get(handles.sliderA, 'Value');
159 handles.contsliderA2 = contsliderA2;
160 guidata(hObject, handles);
161 % A variável p vai ser de 1.5 até 11.5
162 p = handles.contsliderA2 + 1.5;
163 set(handles.editA, 'String', p);
164 % Plota o gráfico e dá título aos eixos e ao gráfico
165

```