UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS EM INSTALAÇÕES DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS

TESE SUBMETIDA À UFPE

PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR

POR

ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO

Orientadora: Prof.ª Ana Paula Cabral Seixas da Costa, DSc

RECIFE, JULHO / 2008

A447m **Almeida Filho, Adiel Teixeira de.**

Modelo de decisão multicritério para avaliação de riscos em instalações de exploração de petróleo e gás / Adiel Teixeira de Almeida Filho. - Recife: O Autor, 2008.

xiii, 114 folhas, il : figs.

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

Inclui Bibliografia.

1. Engenharia de Produção. 2. Pesquisa operacional. 3.Petróleo e gás – Avaliação de riscos. 4. Modelagem Multicritério. I. Título.

UFPE

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

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO DE

ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO

"Modelo de Decisão Multicritério para Avaliação de Riscos em Instalações de Exploração de Petróleo e Gás"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato *ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO* **APROVADO COM DISTINÇÃO.**

Recife, 03 de julho de 2008.

Profa. ANA PAULA CABRAL SEIXAS COSTA, Doutor (UFPE)

Profa. CAROLINE MARIA DE MIRANDA MOTA, Doutor (UFPE)

Profa. DENISE DUMKE DE MEDEIROS, Docteur (UFPE)

Prof. HELDER GOMES COSTA, Doutor (UFF-RJ)

Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

"Há mais pessoas que desistem do que pessoas que fracassam."

Henry Ford

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A certeza da vocação acadêmica fez surgir mais forte a vontade de atingir objetivos cada vez maiores, fazendo com que fossem aceitos desafios e prazos que em alguns momentos pareciam impossíveis, mas que com muito trabalho e perseverança puderam ser enfrentados até a conclusão desta tese e o início desta nova fase que se inicia através do ingresso na universidade. Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de aprendizado, sem os quais jamais teria chegado até aqui.

À minha orientadora, Profª Ana Paula Cabral, por ter aceitado o desafio de concluir esta tese dentro deste prazo, pela atenção e pelas importantes e inestimáveis contribuições ao longo do trabalho.

Aos membros da banca pelas contribuições e sugestões para a melhoria deste trabalho, especialmente aqueles que participaram da etapa de pré-banca, Prof.ª Caroline e Prof.ª Denise.

Ao meu pai, Prof. Adiel, pela amizade, dedicação, disposição e atenção durante toda a trajetória percorrida até aqui, bem como durante o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão aos professores Francisco Ramos e Fernando Campello, que me orientaram durante graduação e a pós-graduação, respectivamente, e fizeram despertar em mim o interesse e a admiração pela carreira acadêmica e atividades científicas.

À minha mãe, Maria Stella, pela dedicação e amor dispensados, aos meus irmãos, pela amizade que existe entre nós e a Renata, por todo carinho e incentivo nos momentos de dificuldade.

Aos amigos, especialmente Gabriel Barros, Marco Diniz, Tiago Sorin e Túlio Bezerra, que sempre reclamaram da minha ausência, justificada pela necessidade de estudar para cumprir com os prazos exigidos.

Meus agradecimentos ao PPGEP/UFPE e a todos os professores que se esforçam para manter este programa entre os melhores do Brasil. Agradeço especialmente à Juliane, com a qual pude sempre contar para me auxiliar na resolução de questões administrativas e burocráticas, inclusive no período em que estava no exterior.

Aos meus amigos do GPSID, especialmente Rodrigo pelo companheirismo, amizade e idéias que trocamos desde o primeiro período da graduação, à Yuri, Anderson e Marcos Felipe pelas discussões a cerca de questões práticas sobre o tema, à Profª Luciana, Prof. Cristiano e Profª Danielle pelo companheirismo e troca de experiências.

À todos os colegas do curso com os quais compartilhei dificuldades e agora também vitórias, principalmente Afrânio, Carlos Sant'Anna e Heldemárcio, e àqueles que me acompanham desde o início do curso de graduação.

Devido à vontade de expressar minha gratidão àquelas pessoas que de alguma forma ajudaram a superar obstáculos, e me incentivaram a continuar o caminho que me levou a conquista do título de doutor, me arrisquei a citar nomes, quando mais que simplesmente agradecer eu queria compartilhar essa conquista com todos que de uma forma ou de outra contribuíram para que ela acontecesse.

Agradeço também a Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro durante todo o processo de doutoramento.

RESUMO

Neste trabalho é desenvolvido um *framework* para análise e avaliação de riscos voltada para a modelagem e estruturação de problemas de decisão com múltiplos objetivos. São identificadas abordagens tradicionais para analisar e avaliar riscos, agregando-se as vantagens que a teoria da utilidade proporciona ao permitir a quantificação e a mensuração destes riscos dentro de diferentes dimensões. Portanto é proposto um modelo de avaliação para implementação de ações para redução destes riscos, onde estes são avaliados sob uma perspectiva de julgamento humano de valor, que agrega objetivos pertinentes ao contexto. Para ilustrar o uso e as vantagens desta abordagem, é feita uma aplicação no contexto de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás. Nesta aplicação foi considerado um estudo prévio de avaliação e identificação de perigos apresentado na literatura, e a partir deste estudo, resolve-se um problema de decisão sob a implementação de ações de melhoria que visam a redução de riscos. Fatores financeiros também são levados em consideração, levando a uma situação conflitante sob a perspectiva de reduzir os riscos e de justificar o valor a ser investido nessa redução de riscos. Por fim, é apresentada uma análise dos resultados obtidos e são discutidas as vantagens do uso desta abordagem.

Palavras Chave: Análise e Avaliação de Riscos, Decisão sob Riscos, Modelagem Multicritério, Teoria da Utilidade

ABSTRACT

In this work is developed a framework for risk analysis and evaluation toward structuring and modeling decision problems with multiple objectives. Traditional approaches to analyze and evaluate risks are identified, to which is proposed the use of utility theory to allow quantifying and measuring these risks into different risk dimensions. Thus is proposed a model for evaluate the implementation of risk reduction projects, which are evaluated under a perspective of human judgment of value which aggregates objectives regarding to this context. To illustrate the use and the advantages of this approach is presented an application in the context of an offshore platform problem, considering a previous study of hazards identification and analysis found on the literature. From this previous study a decision problem is contextualized and solved regarding which risk reduction projects should be implemented in the platform. Financial factors are also considered, leading to a conflict situation under the perspective of risk reduction and costs of the investment in the project. At the end is presented an analysis of the obtained results and are discussed the advantages of using this framework.

Keywords: Risk Analysis and Evaluation, Decision Under Risk, Multicriteria Modeling, Utility Theory.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 JUSTIFICATIVA 2

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO 3

1.2.1 Objetivo Geral 3

1.2.2 Objetivos Específicos 3

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 4

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 6

2.1 TEORIA DA UTILIDADE 6

2.2 DECISÃO MULTICRITÉRIO 7

2.2.1 Conjunto de Ações 9

2.2.2 Problemáticas de Referência e Escolha da Metodologia Adequada 10

2.3 MAUT – *MULTI ATRIBUTE UTILITY THEORY* 13

2.4 O MÉTODO ELECTRE I 14

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE GESTÃO DE RISCOS EM PETRÓLEO E GÁS 16

3.1 GERENCIAMENTO DE RISCOS NA ELABORAÇÃO DO PROJETO 16

3.1.1 Segurança Inerente à Elaboração do Projeto (Inherent Safety Design) 17

3.2 GERENCIAMENTO DE RISCOS NA GESTÃO E EXECUÇÃO DE PROJETOS *OFFSHORE* PARA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS 19

3.3 ANÁLISE, DIMENSIONAMENTO E ESTIMAÇÃO DE CONSEQÜÊNCIAS DE ACIDENTES EM OPERAÇÕES DE PETRÓLEO E GÁS 19

3.4 INFLUÊNCIA DA MÃO DE OBRA PARA O RISCO EM INSTALAÇÕES DE PETRÓLEO E GÁS 26

3.5 ANÁLISE E MONITORAMENTO DE RISCO AMBIENTAL 27

4 CONSTRUÇÃO DE MODELOS DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE RISCOS EM PROBLEMAS DE PETRÓLEO E GÁS 29

4.1 MODELOS DE AVALIAÇÃO E REDUÇÃO DE RISCOS 29

4.2 ESTRUTURAÇÃO DE PROBLEMAS 32

4.3 FRAMEWORK PROPOSTO PARA DECISÃO EM SITUAÇÕES DE RISCO MULTIDIMENSIONAL 35

4.4 ESCOLHA DO MÉTODO MULTICRITÉRIO 41

4.4.1 Abordagem Compensatória 42

4.4.2 Abordagem Não-Compensatória 43

4.5 DIFERENCIAL DO MODELO PROPOSTO 44

4.6 CONCLUSÕES 45

5 MODELO DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE RISCOS EM UNIDADES DE PROCESSO DE EXTRAÇÃO OFFSHORE 46

5.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA 46

5.1.1 A Estrutura de uma Plataforma Offshore 47

5.1.2 O Processo Primário 50

5.1.3 Identificação de Perigos numa Plataforma Offshore 54

5.2 MODELAGEM DO PROBLEMA 55

5.2.1 Conjunto de Alternativas 56

5.2.2 Estados da Natureza e Probabilidades (θ e $P(\theta)$) 57

5.2.3 Descrição dos Critérios 63

5.2.4 Descrição das Conseqüências 65

5.2.5 Função Utilidade para Conseqüência Humana 67

5.2.6 Função Utilidade para Conseqüência Ambiental 71

5.2.7 Função Utilidade para Custo das Alternativas 73

5.2.8 Utilidade Multiatributo 74

5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO 78

5.3.1 Análise das Alternativas 78

5.3.2 Análise de Sensibilidade 80

5.3.3 Discussão de Resultados 80

5.4 APLICAÇÃO CONSIDERANDO FUNÇÃO UTILIDADE PARA CUSTO COM PROPENSÃO A RISCO 82

5.5 VANTAGENS DO USO DE MAUT PARA AVALIAR RISCOS 84

5.6 CONSIDERANDO UMA RACIONALIDADE NÃO COMPENSATÓRIA 87

5.6.1 Análise dos Resultados e Conclusões 96

6 MODELO DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE RISCOS EM GASODUTOS 97

6.1 CONTEXTO DO PROBLEMA 97

6.2 MODELAGEM DO PROBLEMA 99

6.2.1 Problemática e Identificação de Alternativas 99

6.2.2 Avaliação das Incertezas e dos Estados da Natureza 101

6.2.3 Valoração 101

6.2.3.1 Assumindo a Hipótese de Racionalidade Compensatória 103

6.2.3.2 Assumindo a Hipóteses de Racionalidade Compensatória e de Apenas uma Alternativa Não-dominada para Redução de Riscos em Cada Trecho 105

6.2.3.3 Assumindo a Hipótese de Racionalidade Não-Compensatória 105

6.2.4 Seleção da Alternativa, Análise de Sensibilidade e Discussão dos Resultados 106

6.3 CONCLUSÕES 106

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 107

7.1 CONCLUSÕES 107

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 109

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 111

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Modelo de processo iterativo para avaliação e redução de riscos do ISO / IEC Guide 51: 1999, Fonte: ISO/IEC (1999). **30**
Figura 4.2 – Modelo de estimação, análise e avaliação de riscos apresentado pela NORSOK Standard Z-013, Fonte: NORSOK (2001). **31**
Figura 4.3 – Processo de decisão multicritério, Adaptado de Belton & Stewart (2002). **33**
Figura 4.4 – Framework proposto para problema de decisão com risco multidimensional **36**
Figura 4.5 – Contraste entre abordagem AFT e VFT, Fonte: Keeney (1992). **38**
Figura 4.6 – Escolha do método de agregação. **40**
Figura 5.1 – Ilustração da cabeça do poço (Wellhead), Fonte: Schlumberger (2008a). **48**
Figura 5.2 – Ilustração do riser, Fonte: Schlumberger (2008b). **49**
Figura 5.3 – Layout da planta de processo primário de um plataforma de extração offshore, Fonte: Khan et al. (2002). **50**
Figura 5.4 – Ilustração do separador de óleo (separador 1), Fonte: Schlumberger (2008c). **51**
Figura 5.5 – Fluxo da operação do processo primário em uma plataforma de extração de petróleo e gás, Fonte: Khan et al. (2002). **52**
Figura 5.6 – Flare, gás indesejado sendo queimado, Fonte: Britannica (2008). **53**
Figura 5.7 - Resultados obtidos da etapa de identificação dos perigos da plataforma, Fonte: Khan et al. (2002). **55**
Figura 5.8 – Árvore de falha para cenário 2 (acidente no separador 2), Fonte: Khan et al. (2002). **60**
Figura 5.9 – Árvore de falha modificada para cenário 2 (acidente no separador 2), Fonte: Khan et al. (2002). **61**
Figura 5.10 – Raio de destruição **66**
Figura 5.11 – Exemplo de loteria **68**
Figura 5.12 – Preferências para níveis de h dado a^0 e preferências para níveis de a dado h^0 ..... **75**
Figura 5.13 – Preferências para níveis de c dado a^0 e preferências para níveis de a dado c^0 ..... **76**
Figura 5.14 – Preferências para níveis de h dado c^0 e preferências para níveis de c dado h^0 ..... **76**
Figura 5.15 – Acessando a função u(h,a) quando a e u são mutuamente independentes em utilidade **77**
Figura 5.16 – Loterias igualmente preferíveis **77**
Figura 5.17 - Gráfico da função de utilidade propensa a risco para o custo. **83**
Figura 6.1 – Rede de gasoduto, Fonte: Copergás (2008). **98**
Figura 6.2 – Árvore de eventos de um vazamento acidental de gás, Fonte: Sklavounos & Rigas (2006). **100**

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Conjunto de alternativas 57
Tabela 5.2 – Tabela das probabilidades de ocorrência dos cenários catastróficos em um ano, Adaptado de Khan et al. (2002) 62
Tabela 5.3 – Probabilidade dos estados da natureza dada a ação tomada 62
Tabela 5.4 – Conseqüências dos impactos causados pelos acidentes, Adaptado de Khan et al. (2002) 66
Tabela 5.5 – Utilidade para dimensão humana 68
Tabela 5.6 – Utilidade esperada para dimensão humana 70
Tabela 5.7 – Utilidade para dimensão ambiental 72
Tabela 5.8 – Utilidade esperada para a dimensão ambiental 72
Tabela 5.9 – Utilidade para o custo das alternativas 74
Tabela 5.10 – Utilidade multiatributo das alternativas 79
Tabela 5.11 – Avaliação das diferenças de preferência quanto às alternativas 81
Tabela 5.12 – Utilidade multiatributo das alternativas considerando propensão a risco para o custo 83
Tabela 5.13 – Utilidades unidimensionais das alternativas 88
Tabela 5.14 – Matriz de concordância 90
Tabela 5.15 – Continuação da matriz de concordância 91
Tabela 5.16 – Matriz de discordância 93
Tabela 5.17 - Continuação da matriz de discordância 94

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 5.1 ..... **70**
Equação 5.2 ..... **70**
Equação 5.3 ..... **77**
Equação 5.4 ..... **78**
Equação 5.5 ..... **78**
Equação 5.6 ..... **82**
Equação 5.7 ..... **85**
Equação 5.8 ..... **88**
Equação 5.9 ..... **88**
Equação 6.1 ..... **102**
Equação 6.2 ..... **104**
Equação 6.3 ..... **105**

1 INTRODUÇÃO

Os derivados de petróleo vem sendo utilizados há aproximadamente 7.000 anos (NEIVA, 1993). Segundo o historiador grego do século V a.C., Heródoto, o petróleo era transportado pelos rios como um "precioso produto comercial". O uso do petróleo na antiguidade é relatado na Bíblia, no livro de Gênese, onde este era empregado para formar uma "argamassa a base de petróleo", utilizada no templo de Salomão. Observa-se também a referência ao uso do petróleo na construção da Arca de Noé, construída com madeira resinosa e depois vedada com betume (THOMAS, 2004).

Há indícios que na China antiga houvesse poços de petróleo e gás natural com até mil metros de profundidade em pleno século II d. C., servindo para iluminação e aquecimento, utilizando para o transporte uma canalização feita de bambus, o que seria os primeiros protótipos de oleodutos (CETESB, 2008). No entanto, o primeiro registro oficial da abertura de um poço ocorreu na França no início do século XV. Já na América, há referência de que os Astecas e Incas também usavam petróleo na pavimentação de estradas e nas construções, há relatos de que em 1527 foi encontrada uma pequena refinaria rudimentar (POFFO, 2000).

A partir da invenção dos motores à explosão, ao final do século XIX, iniciou-se a fase que culminou na realidade atual, onde a gasolina e o diesel são os principais combustíveis. O surgimento da indústria petroquímica em 1930 possibilitou o uso de derivados de petróleo como componentes explosivos (glicerina e tolueno), material sintético para roupas, solventes e medicamentos, verificando-se assim, uma grande dependência da humanidade em torno da extração do petróleo, o que motivou o imenso crescimento desta indústria no século passado, através da prospecção e descoberta de novos campos petrolíferos, aperfeiçoamento das técnicas de exploração submarina, construção de super petroleiros transoceânicos, a inauguração e ampliação dos terminais de carga e descarga de petróleo e derivados, a construção de refinarias e polidutos de dimensão interestadual e internacional, entre outros fatores que suportaram o desenvolvimento da indústria petrolífera (CETESB, 2008).

Contudo, observa-se a existência de grandes riscos ao longo de toda esta cadeia de produção e distribuição. A periculosidade envolvida nas atividades de extração, refino e transporte do petróleo e de seus derivados faz crescer cada vez mais as preocupações no que tange a segurança das pessoas envolvidas ao longo desta cadeia e do meio ambiente que

freqüentemente é atingido por derramamentos acidentais e incêndios alimentados por estes materiais altamente inflamáveis.

Com o crescimento cada vez maior da indústria petrolífera e a dependência da humanidade em torno do petróleo como fonte de energia, a elaboração e o desenvolvimento de trabalhos que abordem a análise e a avaliação de riscos nesta indústria é cada vez mais pertinente.

A preocupação em torno destes riscos motivou a uma vasta literatura abrangendo a análise de riscos aplicada ao setor petrolífero, mais conhecida como análise de risco em petróleo e gás, portanto, neste trabalho será abordada a temática de análise e avaliação de riscos dentro do contexto de petróleo e gás, para a qual foi feita uma revisão da literatura que trata da avaliação de riscos dentro deste contexto.

Ao longo desta etapa de revisão da literatura observou-se uma carência no que diz respeito à análise de risco que envolvesse probabilidade, o julgamento humano de valor sobre conseqüências catastróficas e uma medida que quantificasse os graus de risco. Observando a oportunidade de fazer uma contribuição para a literatura deste setor, é apresentado ao longo do trabalho um *framework* de apoio a decisão que permite considerar múltiplas dimensões de risco e fornecer resultados avaliando as preferências e o comportamento humano quanto aos riscos, e medidas de risco quanto quantificam os graus de risco e suas diferenças.

Para demonstrar a abordagem proposta neste trabalho, foi estruturado um problema de decisão envolvendo riscos em múltiplas dimensões dentro do contexto de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás. Neste problema foram consideradas as dimensões monetárias, ambientais e humanas.

1.1 Justificativa

Este trabalho busca preencher a lacuna existente no que tange a aplicação da teoria da utilidade para avaliação de riscos. Permitindo uma participação do decisor, através da inclusão das suas preferências sobre as conseqüências, permitindo diferenciar as catástrofes em termos do grau de severidade que representam numa estrutura de julgamento de valor humana e da probabilidade de ocorrência.

A literatura de avaliação de riscos em petróleo e gás é bastante escassa no que diz respeito a consideração destes dois aspectos de forma conjunta, apresentando diversas

abordagens que consideram estes dois fatores de forma separada, as probabilidades de ocorrência e as conseqüências de uma catástrofe.

Por considerar que a análise destes dois fatores em conjunto é fundamental para uma correta avaliação de riscos, será aplicada a teoria da utilidade para avaliação e tomada de decisão dentro de um contexto de riscos no setor de petróleo e gás.

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo apresentar e demonstrar o uso da teoria da utilidade na avaliação de riscos e na tomada de decisão sob riscos dentro do contexto de petróleo e gás, agregando as dimensões de risco envolvidas através de uma metodologia de agregação de preferências quanto à múltiplos objetivos, de forma a permitir que as conseqüências e as incertezas nas dimensões de riscos consideradas possam ser avaliadas de forma conjunta.

Busca-se também propor uma forma estruturada para avaliação de riscos em estruturas *offshore* e para o suporte à decisão sob risco em problemas referentes a essas estruturas, a fim de elaborar um plano de ação referente às ações mitigadoras a serem implementadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

De uma forma mais específica, deseja-se propor um *framework* para estruturação de modelos de decisão sob riscos, que considere probabilidade, julgamento humano de valor sobre conseqüências catastróficas e o comportamento humano em relação a riscos, resultando em uma medida quantitativa de grau de risco que possa ser utilizada em problemas de decisão pertinentes ao contexto de petróleo e gás.

Utilizando a teoria da utilidade para mensuração dos graus de risco, este trabalho tem por objetivo estruturar uma abordagem que quantifique e agregue múltiplas dimensões de risco, permitindo analisar e avaliar os riscos.

Assim, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar os conceitos encontrados na literatura referente a avaliação e análise de risco dentro do contexto de petróleo e gás.
- Fornecer uma revisão da literatura referente à avaliação de riscos no contexto de atividades petrolíferas.

- Apresentar um *framework* para modelagem de problemas de decisão sob riscos.
- Contextualizar um problema de decisão sob riscos no contexto das atividades de extração de petróleo e gás.
- Propor um modelo de decisão multicritério para o problema em questão seguindo o *framework* proposto para modelagem de problemas de decisão sob riscos.
- Contextualizar e discutir a aplicação do *framework* em um problema de decisão em estruturas de transporte de gás.
- Discutir e analisar os resultados do modelo proposto, avaliando as vantagens da aplicação deste modelo.

1.3 Estrutura do Trabalho

Para melhor compreensão da estrutura da tese e de como os objetivos gerais e específicos foram alcançados ao longo do trabalho, a seguir é apresentada uma descrição do conteúdo dos capítulos da tese:

- O presente capítulo, Capítulo 1, constitui-se de uma introdução ao contexto do problema a ser abordado nesta tese, onde são apresentados os objetivos a serem atingidos ao longo do trabalho e alguns questionamentos que serão discutidos nos capítulos a seguir.
- O Capítulo 2, refere-se ao referencial teórico utilizado para a realização do trabalho, reunindo uma descrição Teoria da Utilidade, Decisão Multicritério, Teoria da Utilidade Multiatributo (*MAUT, Multi Attribute Utility Theory*) e Método ELECTRE I, necessários para a compreensão do modelo construído posteriormente. Neste capítulo será dado maior enfoque aos aspectos referentes à modelagem de preferência, a estrutura axiomática de preferência adotada e à modelagem preferencial para riscos.
- O Capítulo 3 é composto por uma revisão sobre as abordagens encontradas na literatura para avaliação e o gerenciamento de riscos dentro do contexto de petróleo e gás.

- O Capítulo 4 apresenta um *framework* para a construção de modelos de decisão sob riscos, que posteriormente será aplicado na modelagem de um problema referente ao contexto de petróleo e gás.
- O Capítulo 5 apresenta a contextualização de um problema de decisão e a modelagem deste problema segundo o *framework* apresentado no Capítulo 4. Na aplicação do modelo proposto sob o problema contextualizado, são descritos e discutidos aspectos práticos da aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo para avaliação de risco e tomada de decisão, apresentando e ilustrando o uso de MAUT para a avaliação de riscos com múltiplos objetivos e as vantagens provenientes da utilização desta abordagem. Ao final do capítulo é ilustrada a aplicação de uma abordagem não-compensatória através do uso do método ELECTRE I.
- No Capítulo 6 é contextualizado o uso do *framework* proposto na tese em um problema de dutos de distribuição de gás.
- Para finalizar o trabalho, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e considerações finais acerca do modelo para avaliação de riscos e decisão em estruturas de extração de petróleo *offshore,* sugerindo futuros trabalhos para dar continuidade às pesquisas neste tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico utilizado para a realização do trabalho, apresentando uma descrição Teoria da Utilidade, Decisão Multicritério, Teoria da Utilidade Multiatributo (*MAUT, Multi Attribute Utility Theory*) e Método ELECTRE I, necessários para a compreensão do modelo construído posteriormente.

2.1 Teoria da Utilidade

O conceito de utilidade se dá pelo valor adimensional atribuído a cada conseqüência e expressa o grau de importância que aquela conseqüência ocupa na preferência geral do decisor (KEENEY & RAIFFA, 1976; GOMES et al., 2002). Uma função *u*, que associa um número real *u(x)* para cada *x* no conjunto de ações, é chamado de função utilidade (unidimensional) representando a estrutura de preferências do tomador de decisões de forma que:

$x' \sim x'' \Leftrightarrow u(x') = u(x'')$, e

$x' \succ x'' \Leftrightarrow u(x') > u(x'')$

onde,

$x' \sim x''$, representa que a conseqüência x' é indiferente à conseqüência x"

$x' \succ x''$, representa que a conseqüência x' é preferível à conseqüência x"

A determinação da utilidade para as conseqüências de um problema de decisão pode ser realizada basicamente por meio de duas técnicas:

- **Avaliação Direta** – neste processo são identificadas as conseqüências de maior e de menor preferência, onde estas duas conseqüências irão compor o início e o fim da escala de utilidade, sendo os valores extremos dessa escala;
- **Levantamento da função utilidade** – o levantamento da função utilidade é baseado no procedimento anterior, porém permite que com base na utilidade de algumas conseqüências, seja traçada uma curva denominada de *função utilidade*, que permite determinar a utilidade de qualquer conseqüência no intervalo predefinido

Neste processo de determinação da função utilidade é necessário que o decisor seja coerente com os axiomas para que a função de utilidade não seja inconsistente com suas preferências. Deve-se verificar a consistência da função utilidade obtida verificando a

adequação do decisor com os axiomas para que seja possível utilizar esta abordagem (KEENEY & RAIFFA, 1976; GOMES et al., 2002). Os axiomas são:

- **Axioma da Ordenabilidade** – dadas as conseqüências x' e x'', podemos dizer que $x' \succ x''$ (x' *é preferível à* x''), ou $x' \sim x''$ (x' *é indiferente à* x'') ou $x' \prec x''$ (x'' *é preferível à* x');
- **Axioma da Transitividade** – se $x' \succ x''$ e $x'' \succ x'''$, então $x' \succ x'''$. E se $x' \sim x''$ e $x'' \sim x'''$, então $x' \sim x'''$.
- **Axioma da Continuidade** – se $x' \succ x'' \succ x'''$, então existe p, $0 \leq p \leq 1$, tal que $x'' \sim [x', p; x''', 1\text{-}p]$;
- **Axioma da Substituibilidade** – se $x' \sim x''$, então $[x', p; x''', 1\text{-}p] \sim [x'', p; x''', 1\text{-}p]$;
- **Axioma da Redutibilidade** – $[[x', p; x'', 1\text{-}p], q; x'', 1\text{-}q] \sim [x', pq; x'', 1\text{-}pq]$;
- **Axioma da Monotonicidade** – se $x' \succ x''$, então $[x', p; x'', 1\text{-}p] \succ [x', q; x'', 1\text{-}q]$, se e somente se $p > q$.

2.2 Decisão Multicritério

Há muitos anos o homem vem tentando abordar processos complexos de tomada de decisão através de abstrações, heurísticas e raciocínios dedutivos, as vezes se apoiando no estado-da-arte do conhecimento científico disponível. Até a década de 60, os processos de tomada de decisão eram focados na busca de maior produtividade ou de um único objetivo ou então utilizando a esperança matemática em busca da melhor solução para problemas em condições consideradas aleatórias. Entretanto em determinadas situações, as limitações e o risco associado a este tipo de tratamento começou a ser considerado inaceitável, levando à busca de metodologias e modelos de decisão que fossem mais flexíveis e adequados as constantes mudanças de cenários. Uma justificativa para esta busca, segundo Vincke (1992), é porque dificilmente existem situações a serem tratadas sob um único enfoque, normalmente vários aspectos, ou critérios, devem ser simultaneamente considerados, objetivando a identificação da melhor, ou das melhores opções ou alternativas.

Entre outros fatores, esses problemas de decisão são caracterizados pela existência de vários critérios, de naturezas diversas, com diferentes escalas de valores e muitas vezes

conflitantes entre si, de forma que a má definição ou a não compreensão das alternativas e suas conseqüências prejudica a modelagem, comprometendo, assim, o processo decisório. Como dito antes, os métodos tradicionais consideravam apenas um objetivo, transformando os outros objetivos em restrições para este problema, prejudicando a modelagem e distanciando o modelo da realidade considerada. Sem dúvida, em termos de otimização, os métodos tradicionais geravam soluções ótimas, no entanto, não necessariamente conduziam o decisor para a melhor alternativa, pois deixavam de considerar muitas das características e particularidades do problema de decisão que se dispunham a resolver.

Segundo Gomes et al. (2002), os métodos de decisão multicritério não visam encontrar uma solução que seja uma verdade única representada pela ação selecionada, e sim apoiar o processo de decisão sendo tão importante quanto a qualidade da informação disponível é a forma de tratamento analítico aplicado ao problema.

Vincke (1992) considera que em comparação com as técnicas clássicas de Pesquisa Operacional, neste tipo de enfoque, o uso da palavra "*otimização*" não faz sentido, pois, dificilmente existe a melhor decisão, avaliando-se simultaneamente todos os pontos de vista. De forma que o termo "*suporte ou ajuda*" torna-se essencial para a compreensão desta abordagem. Por outro lado, algumas metodologias de Decisão Multicritério transformam o problema inicial num problema de otimização, agregando todos os critérios em uma única função analítica que seria otimizada pela escolha da ação.

Os primeiros modelos multicritério incorporaram a multiplicidade de fatores, na busca objetiva de uma situação otimizada, dando origem a modelos normativos, que procuravam modelar o comportamento humano através de axiomas que ditam o que se chama de realidade. Além da rígida forma destes modelos, imposta pela sua forte estrutura axiomática, a falta de comunicação e de interação entre os atores e agentes do processo de decisão foram identificadas como suas principais desvantagens. Assim, surgiram trabalhos numa linha prescritivista, que incorporam de uma maneira mais ampla os valores dos atores. Keeney & Raiffa (1976), assumem a postura de descrever uma realidade para prescrever as soluções. A questão principal concentra-se em confrontar os indivíduos com os axiomas prescritivistas provenientes dos estudos, e se estes axiomas forem aceitos, aplicá-los. Esta abordagem é característica da Escola Americana de metodologias multicritério.

Uma outra abordagem foi desenvolvida na Europa, dando origem à Escola Francesa, os métodos que seguem esta linha incorporam uma visão construtivista, onde os modelos são

construídos durante o processo decisório, de forma participativa e interativa. Estes modelos devem permitir uma exploração dos elementos subjetivos dos valores dos decisores, na construção de recomendações passíveis de atender às suas expectativas em relação aos problemas.

Este conjunto de métodos compõe o AMD, Apoio Multicritério a Decisão, para auxiliar ou apoiar pessoas e organizações a tomarem decisões sob a influência de uma multiplicidade de objetivos, que apresentam critérios conflitantes para os atores do processo decisório. Malczewski (1999) identificou seis componentes para os problemas multicritério, onde deve-se considerar os objetivos, os decisores, os conjuntos de critérios de decisão, o conjunto de alternativas, o conjunto de estados da natureza e as conseqüências das decisões.

2.2.1 Conjunto de Ações

O decisor depara-se com um conjunto, comumente conhecido como conjunto de escolha, ou de ações, ou de alternativas, que será representado por *A,* onde presume-se que estas ações sejam diferentes, exaustivas e excludentes. A definição do conjunto de ações se relaciona fortemente com todos os elementos que influenciam o processo de tomada de decisão. Segundo Vincke (1992), devido à dificuldade de definir o conjunto de ações a priori, ele é definido durante o processo decisório, de forma progressiva. Roy (1996) considera que uma ação representa uma alternativa ou solução, e pode ser distinguida entre uma ação real, que pode ser representada por um projeto e que pode ser materializado, enquanto uma ação fictícia é aquela que corresponde a um projeto idealizado ou mesmo a uma construção mental. As ações que correspondem a projetos que são factíveis ou realizáveis são chamadas de ações realistas, caso contrário ações irrealistas. Assim uma ação fictícia pode ser realista ou irrealista.

Uma ação potencial seria toda ação real ou fictícia julgada realista, no mínimo temporariamente, por pelo menos um dos atores do processo, decisores e analista. A identificação das ações envolve os conceitos de globalizado ou fragmentado. Uma ação é considerada globalizada, quando é mutuamente exclusiva em relação a todas as outras. No caso contrário, quando a ação é somente parte de uma alternativa específica incompleta, ela é classificada como fragmentada (ROY,1996).

Os problemas de decisão podem ser modelados utilizando-se vários conjuntos de ações diferentes, e suas características dependem do conjunto selecionado, não existe a melhor definição do referido conjunto (VINCKE,1992).

Segundo Gomes et al. (2004), a exaustividade das alternativas supõe que, se o decisor introduz uma nova alternativa no conjunto de ações, em princípio, deverá reformular o problema com o novo conjunto A, ou seja, não é possível conceber "alternativas intermediárias" às que já estão enumeradas. Sendo necessário considerar estas alternativas, deve-se agregá-las ao conjunto de ações. Por outro lado se as alternativas fossem excludentes, significa que não seria permitido a opção por uma solução mista.

2.2.2 Problemáticas de Referência e Escolha da Metodologia Adequada

A problemática de referência diz respeito a que tipo de problema estamos enfrentando, agrupando os tipos de problema em quatro grupos onde cada grupo tem um objetivo específico. Roy (1996), utilizou a palavra problemática para descrever a concepção do analista, em relação à forma de abordagem do problema, como será a sua participação, como direcionar as investigações ,quais os resultados esperados e como serão apresentados. Desta forma, identifica quatro problemáticas de referências conforme descritas a seguir:

- **Problemática de Escolha - Pα** : Busca selecionar a "melhor" alternativa ou as melhores alternativas, direcionando a investigação no sentido de encontrar um subconjunto A' de A, tão restrito quanto possível visando a escolha final de uma única ação. Qualquer ação em A/A' deve ser preferida por, pelo menos, uma ação de A', ou no mínimo as ações em A' são consideradas boas o bastante para eliminar aquelas de A/A'. Resultado da Problemática Pα: Uma escolha ou um procedimento de seleção.
- **Problemática de Classificação – Pβ** : Apresenta o problema em termos de classificação das ações em categorias, definidas com base nos valores intrínsecos das ações. Resultado da Problemática Pβ: Uma classificação ou um procedimento de alocação.
- **Problemática de Ordenação - Pγ** : Gera uma ordenação entre as alternativas, direcionando as investigações para determinar uma ordenação parcial ou completa, entre as classes que contêm as ações consideradas equivalentes, ou propor um procedimento de ordenação, que pode ser aplicado repetidas vezes. Diferentemente

das classes da problemática anterior Pβ, as classes desta problemática não são definidas "a priori", pelo contrário, a significância da classe é relativa e depende da sua posição na ordem. Resultado da problemática Pγ: uma ordenação ou um procedimento de ordenação.

- **Problemática de Descrição - Pδ** : Realiza uma descrição das ações e suas conseqüências de um maneira sistemática e formal, ou desenvolve um procedimento cognitivo. Nesta problemática, o analista muito mais apresenta o problema de forma clara e objetiva, em termos qualitativos e quantitativos, do que faz recomendações de solução. Resultado da Problemática Pδ: Uma descrição ou um procedimento cognitivo.

A maneira de formular o problema de decisão depende de se precisar a natureza, do que se procura, e o espírito da recomendação, podendo ser escolhida uma problemática, um caso especial de uma delas, uma seqüência de mais de uma problemática ou até mesmo uma mistura diferente, quando não se encaixar em nenhuma destas opções, (ROY,1996).

Entretanto, estas problemáticas não são independentes entre si, pois parece lógico pensar que a ordenação das alternativas (Pγ) pode servir como base para resolver problemas de seleção da melhor alternativa (Pα).

Utiliza-se um método de análise multicritério quando existe a necessidade de se prescrever quais objetivos o decisor busca alcançar, representando estes múltiplos objetivos através do uso de múltiplos critérios ou múltiplos atributos.

A aplicação da abordagem multicritério tem como objetivo estabelecer uma relação de preferências (subjetivas) entre as alternativas que compõe o conjunto de ações a luz de vários critérios.

Segundo Almeida (2003), as organizações cada vez mais têm se preocupado com a formulação e o tratamento de problemas de decisão, manifestando esta preocupação através de seus gerentes e executivos, pois o desempenho dos decisores está ligado diretamente aos ganhos competitivos no negócio da organização, que apresentam uma relação de dependência com a forma como os problemas são analisados. Sem dúvida estes fatores promoveram o estudo e as aplicações de métodos multicritério de apoio a decisão, de forma que hoje existem mais de duas mil e quatrocentas referências listadas pelo EURO Working Group Multicriteria Decision Aiding (EWG-MCDA).

Dentre os diversos métodos desenvolvidos na literatura para o tratamento de problemas com múltiplos objetivos, pode-se destacar dois grupos de métodos citados na literatura, a escola americana e a escola européia (ou francesa).

Na escola americana destaca-se a teoria da utilidade multiatributo (MAUT), a primeira abordagem estudada nesta escola, sendo um dos principais métodos desta escola. A principal característica da escola americana é a utilização de modelos aditivos, considerando-se a agregação das preferências do decisor em todos os critérios numa única forma funcional.

Já na escola européia (ou francesa), buscou-se desenvolver métodos não compensatórios que explorassem as relações de sobreclassificação entre as alternativas nos múltiplos critérios. Dentre os métodos desenvolvidos nesta escola destacam-se os métodos da família ELECTRE e da família PROMETHEE.

A escolha de um método multicritério de apoio a decisão depende de vários fatores. Segundo Almeida (2003), os principais fatores são:

- O problema analisado;
- O contexto considerado no problema;
- A estrutura de preferências do decisor;
- A problemática.

Roy (1996) identificou os quatro tipos de problemáticas, que são associadas de acordo com o resultado que se espera para o problema, considerando-se inicialmente o conjunto de métodos que atendem ao problema de decisão.

A análise da estrutura de preferências do decisor tem elevado grau de importância, pois pode ser o fator que predomina na escolha do método. Dentre outros aspectos a facilidade e a simplicidade de aplicação dos métodos podem ser considerados na escolha do método, pois dependendo do contexto do problema que se deseja solucionar, podem existir aspectos que inviabilizem o uso de determinados métodos devido a sua complexidade e dificuldade de aplicação, por exemplo, o tempo para solucionar o problema ou até mesmo a impaciência do decisor.

Almeida (2003) aponta um fator que surge freqüentemente na escolha do método a ser utilizado e provoca uma grave distorção, este fator é a preferência do analista por um método em particular, pois isto pode ocorrer não só por uma questão de preferência do analista apenas, e sim pelo fato do analista não possuir familiaridade com outros métodos, mais que poderiam ser mais adequados para o problema de decisão considerado.

2.3 MAUT – *Multi Atribute Utility Theory*

A Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT, *Multi Attribute Utility Theory*) derivou da teoria da utilidade. O MAUT incorpora à teoria da utilidade a questão do tratamento de problemas com múltiplos objetivos. MAUT foi o primeiro método de apoio multicritério a decisão que agrupou as preferências do decisor em um único funcional objetivo, servindo de inspiração para a maioria dos métodos compensatórios de apoio multicritério a decisão. O MAUT baseia-se na hipótese de que, em qualquer problema de decisão, existe uma função de valor real ν sobre o conjunto das ações ou alternativas A que o tomador de decisão deseja examinar, consciente ou inconscientemente. Essa função agrega os critérios ou atributos X_1, X_2, ..., X_n. O papel do analista consiste em determinar tal função. O princípio fundamental desta teoria baseia-se no seguinte axioma: qualquer decisor tende a inconscientemente, ou implicitamente maximizar alguma função que agrega todos os pontos de vista a considerar.

No conjunto de métodos de apoio multicritério a decisão, esse método é o único que recebe o nome de teoria, embora algumas vezes seja utilizado como um método e não como uma teoria. Essa distinção está associada à forma como se obtém a função de utilidade multiatributo. Como teoria, a determinação da função está associada à confirmação de da relação que existe entre a estrutura axiomática da teoria e a estrutura de preferências do decisor. Como método essa confirmação não efetuada, pelo menos em alguns estágios do processo de análise. Podemos dizer que em alguns métodos de apoio multicritério a decisão o decisor especifica os parâmetros ou as condições que influenciam no processo de decisão de forma ad hoc, de forma que este processo é feito sem um protocolo bem estruturado e suportado por uma estrutura axiomática associada. Em MAUT esse processo é muito bem estruturado e é chamado de elicitação ou edução.

Para entender o MAUT, é necessário o entendimento dos conceitos associados a teoria da utilidade, visto que estes conceitos deram origem ao MAUT. A noção de utilidade, descrita em 1738 por Daniel Bernoulli como unidade para medir as preferências, começou com a associação de por exemplo quanto gostaríamos de possuir um bem em detrimento de outro bem, ou por exemplo, quanto mais temos de um bem, menos estamos dispostos a pagar por este bem (saciedade). Em seguida Jeremy Benthan em sua obra publicada em 1789 tratou dessa noção, destacando que a humanidade é governada por dois “senhores”: a dor e o prazer, associando a sensação de que a propriedade de qualquer objeto tende a produzir benefício, vantagem, prazer, bem ou felicidade. O trabalho publicado em 1944 por John von Neumann e

Oskar Morgenstern foi um marco na teoria da utilidade, assim desenvolvendo-se a teoria da utilidade e a teoria dos jogos.

Muitos autores consideram o MAUT um método aplicável a problemas discretos. Entretanto em sua concepção inicial associada a teoria da decisão, esse método permite a solução de problemas com o conjunto de ações discreto ou contínuo. Segundo Gomes et al. (2002), talvez por essa classificação mais restrita, MAUT venha sendo utilizado mais freqüentemente para problemas discretos.

O MAUT inicia-se com a avaliação de várias condições de independência sobre as atitudes do decisor a cerca de suas preferências, apropriadas ao problema que se está analisando e assim, se obtém uma forma funcional consistente com as condições consideradas (KEENEY & RAIFFA, 1976; VINCKE, 1992; OLSON, 1996). Nessas condições, considera-se também a questão da incerteza, que é inserida dentro da estrutura axiomática, permitindo uma abordagem mais consistente para problemas multicritério sob situações de incerteza. Essa forma funcional consistente, deve agregar as funções de utilidade de cada atributo na forma:

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

Uma forma típica, e a mais utilizada, para função de utilidade multiatributo é a função de utilidade aditiva:

$$u(a) = \sum_{j=1}^{n} k_j u_j(a) \qquad (2.2)$$

Nesta expressão, $u_j(a)$ representa a função utilidade unidimensional da alternativa *a* segundo o *j*-ésimo atributo e k_j (com $k_j>0$) representa uma constante de escala relativa ao *j*-ésimo atributo. Essa constante de escala é freqüentemente chamada de peso, entretanto essa função só pode ser usada se as condições de preferência forem satisfeitas, de forma que estas constantes k têm a função de trazer a utilidade de determinado atributo para a escala que será utilizada na função de utilidade aditiva, portanto não representa a importância relativa dos atributos como a palavra peso quer dizer em outras metodologias.

2.4 O Método ELECTRE I

O método ELECTRE I faz parte da família de métodos ELECTRE (*ELimination Et Choix TRaduisant la rEalité*), que basicamente buscam a redução do tamanho do conjunto de

alternativas, explorando os conceitos de dominância. Para isto, utiliza-se um índice de concordância *C(a,b)* para medir a vantagem relativa de cada alternativa sobre todas as outras e de forma similar, é definido um índice de discordância *D(a,b)*, que mede a relativa desvantagem relativa (ROY, 1996;VINCKE, 1992).

O método ELECTRE I atende a uma problemática de escolha, e para isto, executa em seu algoritmo um procedimento para reduzir o número de alternativas até encontrar um conjunto formado apenas por alternativas não dominadas. Assim, considerando um conjunto de alternativas com *K* objetivos, este algoritmo busca reduzir o tamanho do conjunto de ações não dominadas.

Assume-se também, que o decisor é capaz de fornecer um conjunto informações intercritérios, que refletem a relativa importância entre os *K* objetivos, onde na maioria das vezes, esta importância é representada pelos pesos. A idéia fundamental consiste na eliminação ou sobreclassificação de alternativas dominadas por outras segundo um grau específico (ROY, 1996).

Na família de métodos ELECTRE também há métodos que atendem a problemática de ordenação (ELECTRE II e III) e classificação (ELECTRE TRI).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE GESTÃO DE RISCOS EM PETRÓLEO E GÁS

A análise e gestão de riscos em petróleo e gás ocorrem devido à grande relevância deste tema que vem sendo abordado por diversos autores. A natureza da operação quanto aos recursos financeiros envolvidos, vidas humanas e aspectos sócio-ambientais fazem como que este tema ocupe cada vez mais uma posição de destaque na literatura devido as conseqüências associadas a estes riscos.

A presença do gás na operação de extração de petróleo aumenta ainda mais os riscos, por ser este um elemento altamente inflamável, resultando em eventos tais como o *BLEVE, VCE ou jet fire*, que comprometem a segurança de pessoas envolvidas na operação e podem afetar o funcionamento da estrutura de uma forma geral, resultando inclusive em vazamento do petróleo no meio ambiente.

A literatura apresenta diversas abordagens que vêm sendo aplicadas nesse contexto, algumas delas quantitativas e outras qualitativas. Alguns trabalhos concentram-se apenas no dimensionamento das possíveis conseqüências de tais eventos indesejáveis. Nesta seção será apresentada uma revisão daquilo que vem sendo proposto na literatura para analisar e gerir riscos em petróleo e gás.

3.1 Gerenciamento de Riscos na Elaboração do Projeto

Na etapa de elaboração do projeto é possível melhorar a confiabilidade do sistema, reduzindo assim os riscos inerentes ao futuro da operação. Nesta etapa, são escolhidos os materiais e os tipos de componentes que serão utilizados na estrutura onde é feito o trade-off entre custo e confiabilidade, ou seja, analisa-se o quando deseja-se gastar para reduzir os riscos.

Análises de causa e efeito também são feitas, buscando melhorar os processos de forma a remover possíveis causas de acidentes. Isto pode ser feito através da análise de árvores de falhas, permitindo buscar alternativas que modifiquem as probabilidades associadas à seqüência de eventos que culminará numa fatalidade ou alterações na estrutura física que possam reduzir a probabilidade de ocorrência de uma catástrofe.

O trabalho de Khan et al. (2002) é um exemplo deste tipo de abordagem para redução de risco. Nesse trabalho, é feita a análise de um projeto duma plataforma de extração de

petróleo, dando maior enfoque ao processo de operação, por ser a atividade que apresentava maiores perigos dentro da atividade de transporte e perfuração de uma plataforma de gás e petróleo *offshore*, pois é uma área que apresenta grandes limitações de espaço, pouca ventilação e grande dificuldade para rotas de fuga devido à geometria da área de processo. De acordo com estes autores, tanto em operações *onshore* quanto *offshore* pequenos eventos que ocorrem durante a operação do processo geralmente evoluem para grandes catástrofes. Assim, o enfoque dado no trabalho de Khan et al. (2002) consistiu numa análise para redução de riscos associados ao processo de operação da plataforma. No trabalho de Khan et al. (2002), são analisadas algumas árvores de falhas que resultariam em cenários indesejáveis, e a partir desta análise, são propostos novos designs visando reduzir os riscos nesta operação. Através destas alterações no projeto é possível reduzir a taxa de acidentes fatais (FAR, *Fatal Accident Rate).*

3.1.1 Segurança Inerente à Elaboração do Projeto (*Inherent Safety Design*)

Segurança inerente é uma abordagem proativa para gestão de riscos (perigos) durante o processo de *design* e operação de uma planta. De acordo com Khan & Amyotte (2002), já está provado que considerando os custos durante a vida útil de um processo e sua operação, uma abordagem de segurança inerente é a opção ótima de custo.

A abordagem de segurança inerente pode ser incorporada em qualquer estágio de design e operação, contudo, os melhores resultados só podem ser atingidos com a aplicação desta abordagem desde os estágios mais elementares do processo de design, tais como a seleção de processos e o projeto conceitual. Apesar de ser uma técnica bastante atraente e que apresenta uma boa relação eficácia/custo para gestão de riscos (perigos), a abordagem de segurança inerente não tem sido utilizada tão amplamente quanto outras técnicas, tais como HAZOP ou análise quantitativa de risco (QRA). Khan & Amyotte (2002) argumentam que existem diversas razões para isto, sendo as principais, a carência na disseminação e a falta de ferramentas e metodologias sistematizadas.

Apesar da abordagem de segurança inerente já ter sido aplicada em vários aspectos dentro do contexto de gás e petróleo *offshore* para do design e a operação das instalações, o uso desta abordagem continua bastante limitado. Em Khan & Amyotte (2002) foi apresentada uma aplicação da abordagem de segurança inerente às atividades de petróleo e gás, onde é

feita também uma discussão sobre a disponibilidade de tecnologias para a implementação dos princípios de segurança inerente em atividades *offshore*.

Os princípios da segurança inerente foram propostos inicialmente por Kletz (1985) e podem ser encontrados também em Kletz (1998). Os princípios da segurança inerente são:

- Intensificação: buscar redução da quantidade de materiais perigosos.
- Substituição: utilizar materiais seguros.
- Atenuação: operar em condições consideradas seguras através do controle características tais como temperatura do ambiente, pressão e fase do líquido por exemplo.
- Limitação de efeitos: alterar o projeto resultando em menores conseqüências, por exemplo, a segregação de uma unidade.
- Simplificação: evitar a complexidade que pode aumentar as causas para falhas.
- Tolerância ao erro: através de equipamentos mais robustos, processos que possam operar em uma ampla faixa de especificações, capazes de suportar variações indesejadas.
- Evitar os efeitos de colisões: através de construções amplas e abertas.
- Impedir montagem incorreta: através de sistemas únicos de válvula ou tubulações, de forma a reduzir o impacto do erro humano.
- Clareza nas informações de controle: evitar equipamentos complexos, com excesso e redundância nas informações de controle.
- Facilidade no controle: redução da necessidade de habilidade para o controle.

Khan & Amyotte (2002) apresentam diversas etapas e setores dos processos de extração de petróleo e gás nos quais a abordagem de segurança inerente pode ser aplicada para reduzir perigos na operação, desde a localização das fontes, do projeto de tubulações, a localização dos módulos de acomodação (que apresentam diversos riscos quanto ao processo, operações com helicópteros, evacuação da plataforma, etc.), layout do processo da instalação, nos processos de separação, nos trocadores de calor, estações de bombeamento e medição e compressores.

A literatura aponta que ainda existem diversas oportunidades para contribuições que possam estruturar e sistematizar o uso desta metodologia.

3.2 Gerenciamento de Riscos na Gestão e Execução de Projetos *Offshore* para Extração de Petróleo e Gás

Antes de iniciar a extração de petróleo, é necessário que seja montada a estrutura que efetuará a extração do mesmo. No caso de extração *offshore*, onde a plataforma é construída no mar, existe uma série de fatores que irão afetar a gestão e a execução desta obra. As questões climáticas e suas sazonalidades exercem influência na gestão e execução de qualquer projeto, influenciando decisões quanto a prazos, ordem de atividades e a necessidade de recursos para que estas atividades sejam executadas de acordo com a condição climática.

A variação climática introduz um risco adicional significativo na execução de um projeto de construção *offshore*. Para tratar este assunto, Bowers & Mould (1994) propuseram um modelo de gerenciamento de riscos utilizando uma abordagem Markoviana, tratando os possíveis cenários de condições climáticas como estados de uma cadeia de Markov, atuando no cronograma do projeto e no seqüenciamento de atividades de forma a minimizar os riscos ao longo da execução do projeto.

Com relação à identificação de fontes de risco para gestão de projetos no setor petrolífero, Thuyet et al. (2007) apresentam os resultados de uma pesquisa para identificação de riscos em projetos de construção de estruturas de extração de petróleo e gás no Vietnam.

3.3 Análise, Dimensionamento e Estimação de Conseqüências de Acidentes em Operações de Petróleo e Gás

As atividades de análise, dimensionamento e estimação das conseqüências são cruciais para a classificação e a análise dos riscos, pois de acordo com a gravidade destas conseqüências, o impacto destas e as chances de ocorrências, é feito o gerenciamento de riscos.

Nas operações de extração de petróleo e gás um dos maiores perigos à vida humana envolvida e à destruição das instalações são as possibilidades de incêndios e explosões. A presença destes materiais altamente inflamáveis pode constituir diversos tipos de cenários de incêndios e explosões.

Nessa linha, a literatura apresenta o desenvolvimento de diversos trabalhos que abordam o estudo da dimensão de explosões, a quantidade de calor irradiada, o dimensionamento de barreiras de proteção contra incêndios, o projeto de estruturas que possam suportar tais eventos indesejáveis e medidas de segurança que possam mitigar os efeitos destes eventos.

Brandsæter (2002) descreve o uso e a implementação da análise de risco relacionada à segurança na indústria de extração de petróleo e gás *offshore*. Para isto, utiliza abordagens quantitativas e qualitativas, no entanto apresenta maior enfoque nas abordagens quantitativas de análise de risco. Nesse trabalho, Brandsæter (2002) utiliza as bases de regulamentação do Reino Unido e da Noruega, baseando-se nas experiências de extração de petróleo e gás destes países na exploração do mar do norte para descrever critérios de análise, cenários indesejáveis, causas e conseqüências de acidentes. Este trabalho de Brandsæter (2002) surgiu como resultado do *EC-JCR International Workshop on "Promotion of Technical Harmonisation on Risk-Based Decision Making"* realizado em maio de 2000. Em seu trabalho, Brandsæter (2002) responde a um conjunto de questionamentos levantadas pelos organizadores deste evento.

Brandsæter (2002) apresenta um relato sobre o histórico da análise de risco na indústria de exploração *offshore* e das evoluções nas regulamentações do Reino Unido e da Noruega. Nesse sentido, foram explicitadas algumas definições a serem utilizadas como terminologia técnica como resultado do *workshop*. Nesta ocasião, utilizou-se as definições que apresentadas abaixo:

- Perigo: Significa a propriedade de uma substância ou uma situação física com potencial de criar dano, avaria ou estrago à saúde humana ou ao meio ambiente.
- Risco: Significa a chance ou a possibilidade de um efeito específico originado por um determinado perigo ocorrendo em determinado período ou circunstâncias.
- Avaliação de risco: A avaliação de riscos pode se dividir em 5 passos, onde o primeiro passo é a *identificação dos perigos*, onde é feita um levantamento das fontes com potencial de causar efeitos indesejáveis à entidades de interesse que são o foco da estimação de possibilidade ou chance. O segundo passo é a *avaliação do cenário do evento*, onde são identificadas as causas destes eventos e são levantadas as seqüências de eventos que podem levar a materialização deste perigo. O terceiro passo é a *avaliação da conseqüência*, onde são identificados e avaliados os resultados da materialização do perigo. O quarto passo é a *análise de risco*, que consiste em duas fases, na primeira, ocorre a *avaliação de risco*, onde estes são avaliados e expressos através das probabilidade de ocorrência das conseqüências e onde é descrita a qualidade

destas estimativas. Na segunda fase, a *comparação de riscos*, são feitas comparações das estimativas de risco de acordo com uma determinada estrutura, critérios ou objetivos, e descrevendo a dependência destas estimativas de acordo com as hipóteses específicas que foram assumidas. O quinto passo consiste na *tomada de decisão*, onde é feita a opção por ações baseando-se nas avaliações de risco.

Brandsæter (2002) lista também algumas fontes de perigo típicas das operações de extração de petróleo e gás, tais como:

- Liberação de hidrocarbonetos ou outra substância inflamável e/ou substâncias tóxicas.
- Problemas de controle no poço.
- Tráfego de embarcações.
- Elevação e/ou operações com gruas e guindastes.
- Condições climáticas.
- Falhas estruturais, incluindo a perda da impermeabilidade em estruturas.
- Falhas no sistema de posição dinâmica ou falhas em manter a posição.

No que tange aos possíveis eventos indesejáveis, também é apresentada por Brandsæter (2002) uma lista categorizada destes eventos, onde alguns destes eventos são:

- *Blowouts*:
    - *Blowout* na perfuração.
    - *Blowout* na completação.
    - *Blowout* na produção.
    - *Blowout* em atividades de *workover* realizadas no poço.
    - *Blowout* no abandono de poço e de áreas.
    - *Blowout* subterrâneo.
    - Também são incluídos em *blowouts* os incidentes de controle do poço.
- Vazamentos no processo, vazamentos de gás e/ou petróleo provenientes de partes do processo, tais como:
    - Equipamento de vedação do poço.
    - Separadores e outros equipamentos de processo.
    - Compressores e outros equipamentos de tratamento de gás.
    - Tubulações do processo, válvulas, bombas, etc.

  - Tanques de armazenamento.
  - Queima do gás indesejável.
- Vazamentos de gás ou óleo na tubulação / r*iser*
  - Tubulação submersa.
  - *Manifold* submerso.
  - *Riser* de exportação.
- Incêndios fora do processo
  - Incêndios devido a falhas no sistema elétrico.
  - Ignição de gás.
  - Incêndios nas dependências da tripulação.
  - Incêndios em combustíveis, tais como metanol, diesel, querosene.
  - Incêndios no gerador/turbinas.
  - Incêndios no sistema de aquecimento/condicionamento de ar.
  - Incêndios no maquinário.
- Colisões marinhas, impactos provenientes de:
  - Embarcações de suprimentos.
  - Embarcações *stand-by*.
  - Embarcações de suporte (submarinos etc).
  - Embarcações mercantes ou de pesca.
  - Tanques de carregamento *offshore*.
  - Icebergs.
- Eventos marinhos:
  - Perda da âncora.
  - Distribuição de peso incorreta (lastro).
  - Capotagem devido a condições extremas ou erros na distribuição do lastro.
  - Perda do reboque em trânsito.
- Objetos derrubados:
  - Durante a construção ou reparo.
  - Durante operação de guindaste ou grua.
  - Transferência de carga.
  - Perfuração.

- Acidentes de transporte (envolvendo troca de tripulação ou transferência de campo):
    - Acidente de helicóptero no mar / plataforma.
    - Incêndio durante abastecimento do helicóptero.
    - Acidente com o pessoal durante transferência do barco.
- Eventos estruturais:
    - Falhas estruturais devido à fadiga ou erros de projeto.
    - Condições climáticas extremas.
    - Terremotos ou maremotos.
    - Falhas na fundação.
    - Colapso do guindaste ou grua.
    - Colapso da ponte.
    - Colapso do mastro.
- Acidentes de construção:
    - Construção da plataforma.
    - Construção da marinha.
    - Assentamento das tubulações.
- Acidentes com trabalhadores.
- Acidentes durante mergulho.

A cada evento indesejável podem ser associadas conseqüências e as chances de que estas ocorram. Nesse sentido, a literatura apresenta diversos estudos sobre como se comportam os incêndios e as chamas provenientes destes. Wakes et al. (2002) apresentam um estudo sobre os efeitos de alterações no formato do orifício e na pressão de um gás em combustão, conforme ocorre freqüentemente em instalações *offshore* para eliminar um gás indesejável. Nesse trabalho, Wakes et al. (2002) desafiam a visão convencional de que é suficiente apenas modelar vazamentos como jatos assimétricos, pois para identificar perigos e dimensionar proteções contra vazamentos de gás (tais como a posição ótima de sensores e detectores de gás) e iniciar os procedimentos de segurança após o vazamento é necessário possuir amplo conhecimento sobre o comportamento do vazamento de hidrocarbonetos quando estes emergem do vazamento para uma área de risco.

O dimensionamento das conseqüências provenientes de incêndios em instalações *offshore* é um fator de grande preocupação, e muitas vezes se torna uma atividade muito

complexa e custosa dependendo do nível de detalhamento que se deseje abordar o problema. Muitas vezes o nível de detalhamento necessário para a tomada de decisões na redução de riscos durante o projeto das instalações *offshore* não é disponível até que projeto alcance estágios mais avançados onde alterações no projeto já podem representar custos bastante elevados. Analisando este contexto, Krueger & Smith (2003) propõe uma forma de analisar os perigos e as conseqüências de incêndios em estruturas *offshore* utilizando uma abordagem baseada em cenários que determina o impacto potencial nos equipamentos de processo da plataforma, nos dispositivos estruturais, nas rotas de fuga, nos sistemas de segurança e determina a eficácia das opções potenciais para mitigação. Apesar da abordagem de Krueger & Smith (2003) não prover um detalhamento maior na análise, segundo estes autores, a antecipação destes resultados permite que a equipe que faz o projeto das instalações possa escolher um design mais seguro, satisfazendo também os níveis de riscos admitidos pela empresa e/ou pelas agências de regulamentação. Em Krueger & Smith (2003) é apresentada uma aplicação com esta abordagem para incêndios provocados por *jet fires* em estruturas de águas profundas localizadas no Golfo do México.

Pelas características compactas das plataformas de extração *offshore*, essas estruturas são conhecidas pela dificuldade de rotas de escape, pelas limitações de ventilação e pelo elevado grau de congestionamento dessas estruturas. Portanto, pequenos incidentes podem representar a evolução para um quadro de uma grande catástrofe, onde observa-se entre os principais perigos como sendo os incêndios. Para um estudo mais completo do comportamento dos incêndios é necessário o uso de técnicas de análise quantitativa de risco. Conforme dito anteriormente, estes estudos muitas vezes necessitam de um grande investimento para que possam representar estas situações de forma mais realística e com maior profundidade. A literatura apresenta diversos modelos para as conseqüências de incêndios que permitem prever os perigos de um incêndio, desde modelos de origem pontual a modelos altamente complexos de dinâmica dos fluidos. Contudo, poucos modelos foram validados para as situações particulares de estruturas *offshore*. Pula et al. (2005) consideraram a modelagem de conseqüências de incêndios em situações de estruturas *offshore* como sendo um conjunto de sub-modelos tais como modelos individuais de incêndios, modelos de radiação, modelos de pressão elevada, modelos de grau de toxicidade e fumaça e modelos sobre o impacto sobre seres humanos. Em seu trabalho, Pula et al. (2005) fizeram uma revisão do conjunto abrangente de modelos considerado para compor uma abordagem mais sintética,

a qual foi comparada às ferramentas computacionais utilizadas na indústria de petróleo *offshore*.

A análise das conseqüências de acidentes ocorridos no passado podem servir de referência para identificar causas e seqüências eventos para um evento indesejável que ainda não haviam sido identificadas. Muitas vezes também são utilizadas como referência para o dimensionamento das conseqüências de acidentes. Shaluf et al (2003) apresentam uma análise nessa linha, apontando a importância de considerar os possíveis efeitos dominó relativos a eventos independentes mas relacionados a instalações com perigos. Nesse trabalho, Shaluf et al (2003) sumarizam os eventos ocorridos em dois acidentes numa subsidiária da Shell na Malásia, onde identificam os eventos e os gatilhos que os iniciaram até chegar as conseqüências.

Após a ciência do que pode ocorrer em virtude de um evento indesejável, mesmo adotando medidas mitigadoras e demais procedimentos de segurança, é necessário que sejam definidas distâncias de segurança para estas fontes de perigo. Um exemplo deste tipo de trabalho pode ser encontrado em Sklavounos & Rigas (2006), que abordam o problema de distâncias de segurança entre tubulações de distribuição de gás liquefeito de petróleo e gás natural pressurizado. Na determinação destas distâncias Sklavounos & Rigas (2006) consideraram as conseqüências de um acidente envolvendo a liberação do gás pressurizado no sistema de transmissão. No que tange as alternativas para o transporte destes gases, em Thomas & Dawe (2003) apresentam e discutem diversas alternativas para transportar estes gases por longas distâncias. No trabalho de Sklavounos & Rigas (2006) foram utilizados procedimentos de análise quantitativa de risco para modelar os cenários de uma liberação de gás através de uma abordagem de análise de árvore de eventos. Como resultado do trabalho de Sklavounos & Rigas (2006), foram determinadas distâncias para duas tubulações de sistemas de distribuição de gás natural pressurizado e de gás liquefeito de petróleo existente na Grécia. Nesse trabalho, Sklavounos & Rigas (2006) modelaram as conseqüências de *jet fire* considerando a dissipação dos gases e a formação de nuvens de gás para casos onde não há ignição imediata, complementando com uma análise de cenário das possíveis condições atmosféricas.

Pode-se perceber que técnicas de análise quantitativa de risco e abordagens qualitativas são amplamente utilizadas nesses trabalhos. Observa-se também na literatura trabalhos que visam determinar os níveis de proteção a serem utilizados, Shetty et al. (1998) apresentam

uma abordagem para dimensionar o número de barreiras de proteção e a estrutura de pontes, rotas de fuga e deck, analisando as características de resistência dos materiais a serem utilizados. Nesse trabalho, Shetty et al. (1998) utilizaram além da análise quantitativa de risco diversas técnicas de análise de confiabilidade de sistemas e otimização do projeto baseada em confiabilidade.

Nos casos em que já existe uma literatura consolidada tratando as questões levantadas anteriormente, esta literatura é transcrita para normas de segurança e de operação. O Reino Unido é um dos países que mais se destaca no desenvolvimento destas normas.

Contudo, as normas e a literatura que abordam este tema tratam a probabilidade e as conseqüências de forma isolada, e quando é feita uma agregação, esta é feita através do cálculo do valor esperado das conseqüências, tais como a freqüência em que ocorrem fatalidades em determinado tipo de acidente. Na abordagem proposta nesta tese será feito o uso da teoria da utilidade para prover uma medida de risco que considere as probabilidades e o valor das conseqüências mediante o julgamento humano de valor, permitindo observar o comportamento do decisor face aos riscos.

3.4 Influência da Mão de Obra para o Risco em Instalações de Petróleo e Gás

Apesar do esforço para coletar informações e efetuar análises de riscos nas instalações de extração de petróleo e gás, utilizando técnicas avançadas para computar todos os fatores de risco através de abordagens quantitativa ou qualitativamente estruturadas, as pessoas no dia a dia da operação de uma estrutura de extração de petróleo não utilizam essas abordagens de avaliação de risco para tomarem decisões. Estas fazem uso de julgamentos subjetivos, conhecidos na literatura como percepção de risco, que pode ser influenciada por diversos fatores. Flin et al. (1996) apresentaram o primeiro trabalho sobre a percepção para riscos dos trabalhadores de uma instalação de extração de petróleo e gás *offshore*. Este estudo feito por Flin et al. (1996) tinha por objetivo complementar as extensivas análises quantitativas de risco que são realizadas em atenção as normas vigentes de segurança.

Desta forma, Flin et al. (1996) buscaram mensurar a percepção subjetiva de risco do pessoal envolvido em operações *offshore* e compará-la aos dados sobre este riscos disponíveis, ou seja, os relatórios provenientes das análises de acidentes e dos resultados obtidos através das abordagens de análise quantitativa de risco.

De uma forma geral, diversos autores apontam que o comprometimento da gerência com a segurança é um componente fundamental para a cultura de segurança da organização. No entanto, o envolvimento e a experiência dos gerentes de instalações em relação à segurança são raramente examinados. O'Dea & Flin (2001) conduziram uma pesquisa com mais de 200 gerentes de instalações *offshore* pertencentes a 36 empresas. Os questionários utilizados por O'Dea & Flin (2001) levantaram dados relativos à experiência e ao estilo de liderança dos gerentes. Além disso, foram levantados também dados sobre o conhecimento técnico e experiência destes gerentes quanto à operação. Desta forma, os questionários de O'Dea & Flin (2001) tinham dois objetivos, o primeiro objetivo era descobrir a relação entre de experiência dos gerentes e seus estilos de liderança com o comportamento e as atitudes destes com relação a segurança. O segundo objetivo dizia respeito às percepções dos gerentes quanto às melhores práticas para liderar a segurança e as opiniões destes gerentes sobre questões relativas à segurança. Como resultados, O'Dea & Flin (2001) encontraram que a experiência não era um fator dominante na determinação do estilo de liderança ou das atitudes do gerente relativas à segurança, no entanto, os gerentes menos experientes e com atitudes mais diretas de liderança foram identificados com gerentes que superestimavam sua habilidade para influenciar e motivar seus subordinados.

3.5 Análise e Monitoramento de Risco Ambiental

A questão ambiental é de grande relevância para o contexto da indústria de petróleo e gás, tendo em vista o potencial de toxicidade, destruição e contaminação destes materiais.

De uma forma geral, a preocupação com o meio ambiente é cada vez maior, fazendo com que haja maior regulamentação nesse sentido, que resulta na criação de normas que servem de referencial para o processo de gestão ambiental. Neste processo, surge a preocupação com a degradação ambiental, o que exige análises dos perigos relacionados ao meio ambiente.

Para satisfazer exigências ambientais, a indústria petrolífera necessita atender todas as exigências das agências reguladoras e efetuar uma análise de riscos ao meio ambiente. Stejskal (2000) propõe uma abordagem para análise de risco ambiental, necessária para a aprovação de projetos de extração de petróleo e gás considerando o contexto australiano. Stejskal (2000) faz uma aplicação da abordagem proposta na análise de riscos ambientais de um projeto de extração em baixa profundidade, localizado próximo a áreas de recifes de

corais e mangues, um cenário similar ao encontrado em Recife-PE. Na aplicação da abordagem proposta por Stejskal (2000), foram considerados dois poços de perfuração localizados a um quilometro de áreas de conservação ambiental (recifes de corais e mangues).

Stejskal (2000) utilizou em sua abordagem análise qualitativa e quantitativa dos riscos, identificando os principais perigos, determinando a freqüência e a probabilidade de ocorrência destes perigos e as conseqüências em virtude da magnitude dos efeitos indesejáveis proveniente destes acidentes.

Dentre os incidentes identificados e observados Stejskal (2000) estavam:

- Derramamento de óleo diesel durante abastecimento de embarcações.
- Ruptura nos tanques de embarcações.
- *Blowout* na superfície.

Para determinar a trajetória de transporte e o destino do óleo derramado no mar foram utilizados por Stejskal (2000) ferramentas computacionais para simular estes eventos. A determinação das conseqüências destes incidentes depende da informação sobre o transporte e o destino do óleo derramado, que determinam as partes do ambiente afetadas por este derramamento. Contudo, a quantificação das conseqüências deste óleo derramado é extremamente complexa. Considerando que não há um controle preciso sobre os níveis de população na fauna marinha, é difícil estabelecer uma relação entre o tamanho do derramamento e as conseqüências.

Dentre as ações mitigadoras propostas por Stejskal (2000), incluía que a atividade extração de petróleo deveria ocorrer apenas em estações do ano em que o vento era contrário ao sentido das áreas de preservação de maior valor, e obviamente a estruturação de medidas e planos de contingência para conter os vazamentos de óleo.

Após a etapa de análise dos riscos ambientais, é necessário o monitoramento dos efeitos provocados ao meio ambiente, para que se possa ter uma idéia do real impacto ambiental provocado e compará-lo àquilo que havia sido previsto nas análises de risco ambiental.

4 CONSTRUÇÃO DE MODELOS DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE RISCOS EM PROBLEMAS DE PETRÓLEO E GÁS

De uma forma geral, o processo de construção de modelos de decisão freqüentemente aponta para uma modelagem multicritério. Isso se deve ao fato de que a maior parte dos problemas de decisão a serem avaliados pelo homem tratarem sempre de uma renúncia entre aquilo que será preterido para possibilitar um ganho alternativo. Isto ocorre devido a existência de múltiplos objetivos conflitantes e da inviabilidade por alternativas que possam contemplar todos os objetivos sem que haja a necessidade de renúncia. Um fato que confirma esta idéia de múltiplos critérios conflitantes e a impossibilidade de satisfazê-los simultaneamente e totalmente é a característica dos seres humanos de serem insatisfeitos por natureza, que acaba levando à insatisfação por sempre sentir que existe algum dos objetivos que poderia ser melhorado.

4.1 Modelos de Avaliação e Redução de Riscos

Num contexto mais amplo de avaliação de riscos, a literatura referente à avaliação de riscos em petróleo e gás apresenta dois modelos para avaliação e análise de riscos, um encontrado no ISO / IEC Guide 51: 1999 e outro encontrado na NORSOK Standard Z-013.

Um destes modelos é descrito no ISO / IEC Guide 51: 1999, que substituiu a versão de 1990 referente a este tema. O ISO / IEC Guide 51: 1999 permanece vigente, e trata aspectos de segurança relacionada às dimensões humanas, ambientais, patrimoniais e as combinações destas dimensões. O ISO / IEC Guide 51: 1999 serve de suporte ao ISO / IEC Guide 73: 2002, que trata de aspectos referentes ao vocabulário e significados referentes à gestão de riscos dentro de vários contextos com o objetivo de consolidar terminologias.

A NORSOK Standard Z-013 é uma norma editada pelo NPD (*Norwegian Petroleum Directorate*), uma agência do governo norueguês responsável pela regulamentação das atividades da indústria petrolífera no Mar do Norte. Esta norma foi reeditada em 2001 e refere-se à análise de risco e de prontidão à emergências.

Brandsæter (2002) descreve a implementação e o uso da análise de riscos na indústria *offshore* utilizando abordagens quantitativas e qualitativas. O trabalho de Brandsæter (2002)

corresponde à resposta de questionamentos levantados pelos organizadores do *EC-JCR International Workshop on "Promotion of Technical Harmonisation on Risk-Based Decision Making"* realizado em maio de 2000, onde são discutidos os modelos de avaliação de riscos apresentados no ISO / IEC Guide 51: 1999 e na NORSOK Standard Z-013.

De acordo com o ISO / IEC Guide 51: 1999, a avaliação de risco é definida como um amplo processo de análise e estimação de risco. A análise de risco é definida neste documento com sendo o uso sistemático da informação para identificar perigos e estimar o risco, e a estimação de risco é definida como um procedimento baseado na análise de risco para determinar se os riscos são toleráveis ou não. E dessa forma, é apresentado no ISO / IEC Guide 51: 1999 modelo de processo iterativo para avaliação e redução de riscos aplicável para avaliações qualitativas e quantitativas. A Figura 4.1 ilustra o modelo apresentado pela ISO / IEC Guide 51: 1999.

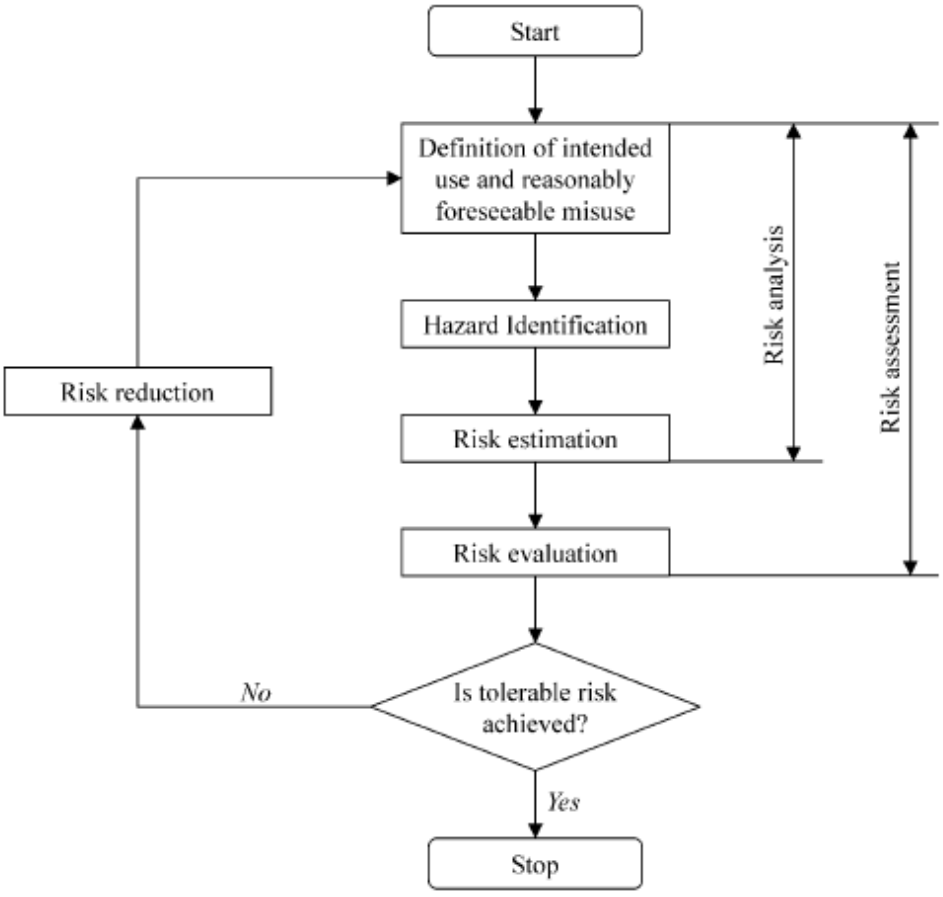

Figura 4.1 – Modelo de processo iterativo para avaliação e redução de riscos do ISO / IEC Guide 51: 1999, Fonte: ISO/IEC (1999).

No modelo de avaliação e redução de riscos do ISO / IEC Guide 51: 1999, é clara a definição de critérios limite de tolerância à risco, tais como o critério ALARP, contudo, nada é proposto uma vez que estes limites são satisfeitos, nem uma estrutura para a decisão entre alternativas não-dominadas em face a múltiplas dimensões de risco.

O modelo de estimação, análise e avaliação de riscos apresentado pela NORSOK Standard Z-013 descreve uma abordagem que se adéqua claramente à típica análise quantitativa de risco para instalações *offshore*, que utiliza uma definição de risco para a qual o risco é representado por uma probabilidade (fração no intervalo de 0 à 1) ou por uma freqüência esperada. Ambos os modelos exigem a definição de um critério de aceitação de risco, que deve considerar a probabilidade ou freqüência associada a uma conseqüência, estabelecendo-se assim um indicador de risco (critério) e um limite aceitável de risco. Para a dimensão humana, podem ser utilizados o risco ao individuo e/ou a FAR (*Fatality Accident Rate)* que devem ser comparados com os valores admitidos pelas normas regulamentadoras.

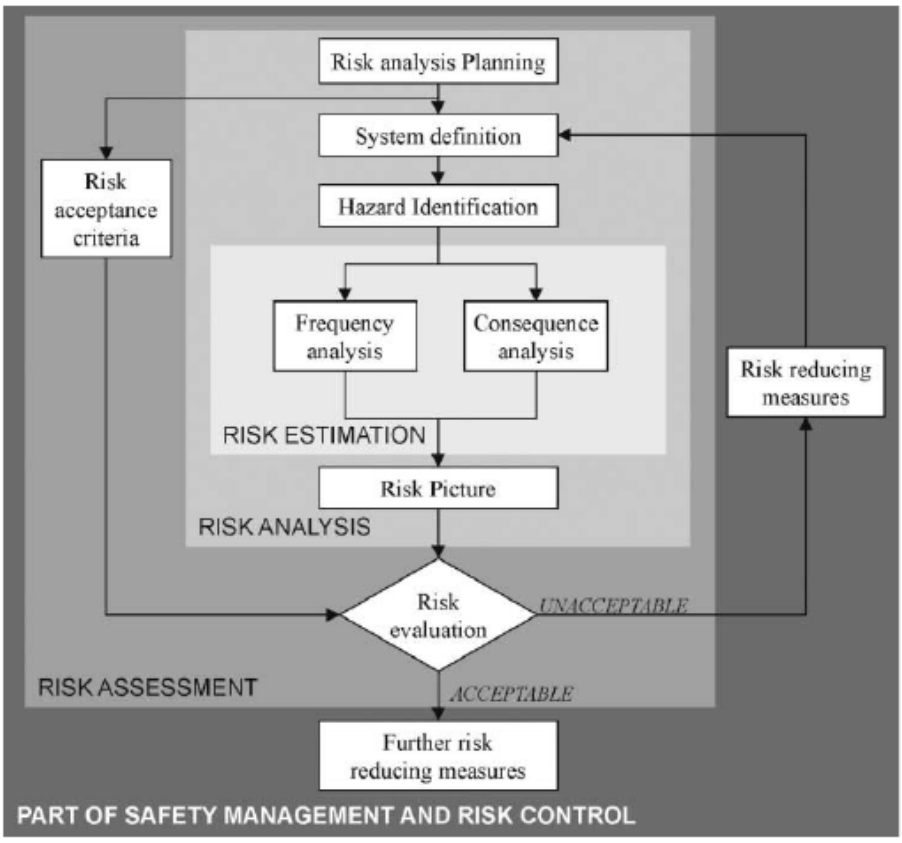

Figura 4.2 – Modelo de estimação, análise e avaliação de riscos apresentado pela NORSOK Standard Z-013, Fonte: NORSOK (2001).

Conforme a Figura 4.2, o modelo de estimação, análise e avaliação de riscos apresentado pela NORSOK Standard Z-013 apresenta maior ênfase na estimação das probabilidades e das conseqüências, diferentemente do modelo do ISO / IEC Guide 51: 1999, contudo, não há para este contexto uma estruturação de como agregar preferências sobre múltiplas dimensões de risco para a tomada de decisão uma vez que já foram atendidos os critérios de aceitação estabelecidos pelas normas vigentes.

Assim, será proposto neste trabalho um modelo que visa estruturar a forma pela qual será feita a agregação de preferências sobre múltiplas dimensões de risco e a utilização de uma métrica que possa abranger a probabilidade, o julgamento de valor humano sobre a conseqüência e o comportamento (propenso, avesso ou neutro) do decisor quanto à riscos, neste caso a medida fornecida pela teoria da utilidade.

Portanto, o modelo a ser proposto nesta tese busca a incorporação do modelo representado pela Figura 4.4 e pela Figura 4.6 na análise e avaliação de riscos explicitada no modelo da Figura 4.2, possibilitando abranger os aspectos discutidos no parágrafo anterior.

4.2 Estruturação de Problemas

O processo de estruturação e modelagem de problemas e a etapa de construção de modelos é considerado na literatura de PO (*Pesquisa Operacional*) como sendo a fase mais importante do processo, afinal é nessa fase em que ocorre a definição do problema, e uma má definição do problema implicará no questionamento da solução apontada pelo estudo, uma vez, que foi resolvido um problema diferente daquele que necessita de uma solução. Dificilmente, um problema é formulado e resolvido de forma fidedigna, contudo, se as premissas feitas na formulação não oferecem violações relevantes à realidade do problema, a solução do problema formulado não se distancia suficientemente para invalidar-se o modelo, que por si só é uma simplificação para representar a realidade. A necessidade de simplificar a realidade decorre da complexidade com que esta se manifesta, tornando inviável a solução do problema da maneira como se apresenta, utilizando-se assim a solução do modelo como a melhor solução que poderia ser recomendada. Muitas vezes, os problemas apresentam-se de forma não estruturada, dificultando o processo de formulação do mesmo. Para estes casos, vem sendo desenvolvidos na literatura uma gama de abordagens para estruturação de problemas, para que num estágio posterior de amadurecimento se possa recomendar uma solução para os mesmos.

Um exemplo de abordagem para a estruturação de um problema de decisão multicritério é apresentado por Belton & Stewart (2002), nesta abordagem é discutida a forma como o problema "se apresenta", pois de acordo com Belton & Stewart (2002) é necessária uma etapa de identificação e estruturação do problema, uma vez que dificilmente não é possível melhorar a forma como o problema "se apresenta" através de um processo amplo de estruturação e solução do problema.

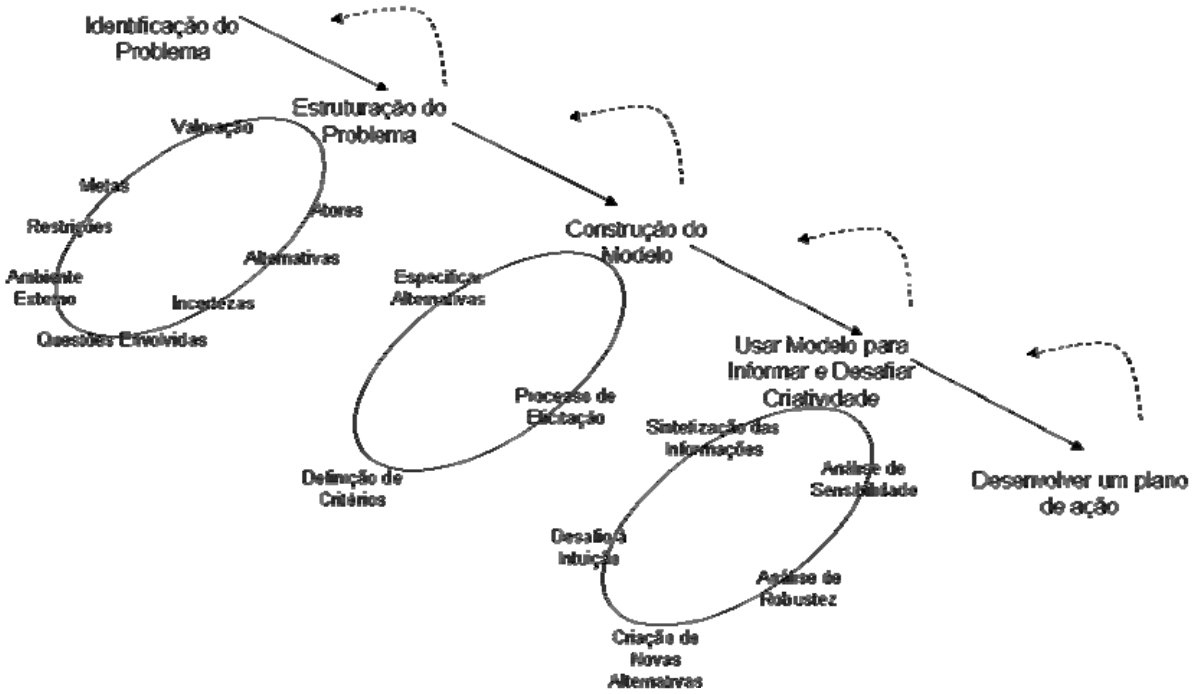

Figura 4.3 – Processo de decisão multicritério, Adaptado de Belton & Stewart (2002).

A Figura 4.3 apresenta o processo de apoio à decisão multicritério apresentado por Belton & Stewart (2002). Neste processo, são identificadas a principais etapas do processo de decisão, iniciando-se pela identificação do problema, a estruturação do problema, a construção do modelo, o uso do modelo para obter informações e desafiar a criatividade para posteriormente desenvolver um plano de ação, que pode inclusive ser simplesmente implementar uma escolha.

A fase inicial de estruturação do problema é onde são levantadas as divergências e questões que circundam o problema, quando é captada a complexidade inerente ao problema de decisão, onde é levantado o conjunto de alternativas para o problema e se começa a modelar e entender o comportamento do decisor ou dos decisores envolvidos.

Nas fases de construção e uso do modelo são fases que representam uma etapa mais convergente, onde é extraída a essência do problema através da análise da complexidade envolvida para avançar na solução deste. Pode-se observar que neste modelo apresentado por Belton & Stewart (2002) há uma ênfase maior no levantamento prévio das alternativas para a posterior solução do problema.

Contrapondo esta ênfase mais tradicional observada no modelo de Belton & Stewart (2002) existe uma linha proposta por Keeney (1992), o VFT (*Value-Focused Thinking*) onde a idéia principal é que sejam identificadas inicialmente as necessidades e aspirações para a solução do problema desejada pelo decisor, e após esta etapa seja iniciado um processo criativo de elaboração de alternativas. Desta forma, Keeney (1992) denoninou de AFT (*Alternative-Focused Thinking*) a abordagem tradicional.

A abordagem do VFT, advogada por Keeney (1992), prega que é necessário que se avalie inicialmente os objetivos e o que se deseja para o resultado desta decisão, pois desta forma o problema é transformado numa "oportunidade de decisão", permitindo-se avaliar as possibilidades e a criação de novas alternativas que possam satisfazer o decisor dentro de um escopo maior. Na próxima seção será apresentada a Figura 4.5 na qual poderá ser observado o contraste entre as duas formas de encarar um problema, verificando-se maior liberdade de ação na abordagem VFT através a busca de alternativas que atendam objetivos e dimensões sequer levantadas na abordagem AFT.

Neste trabalho será utilizada a abordagem tradicional, reformulada por Belton & Stewart (2002), contudo, é importante destacar a existência e a importância das duas abordagens, a tradicional, AFT, e da abordagem proposta por Keeney (1992), VFT, que permite a tomada de decisão de uma forma na qual podem ser consideradas alternativas que não seriam consideradas a não ser pelo processo criativo de elaboração de alternativas baseado no estabelecimento de valores do decisor. Para seguir uma abordagem VFT (Keeney, 1992), seria necessária a disposição de elementos que permitissem uma busca e elaboração de alternativas para satisfazer os objetivos para a solução do problema através de um processo criativo que não será possível neste trabalho.

4.3 Framework Proposto para Decisão em Situações de Risco Multidimensional

Com base na literatura, é proposto um *framework* para estruturar problemas de decisão dentro de um contexto de avaliação multidimensional de riscos, que pode se referir a um problema de escolha, ordenamento, classificação ou portfolio, que será aplicada adiante num problema de escolha ao qual será fornecida também uma ordenação das alternativas.

A Figura 4.4 apresenta o *framework* proposto nesta tese para um processo decisório em avaliação multidimensional de risco, onde dependendo do contexto do problema e de quão estruturado este "se apresenta", pode-se escolher uma abordagem AFT ou VFT para dar suporte ao processo decisório em questão. Observa-se a existência de pelo menos dois atores ao longo deste processo, o decisor e o analista, onde ambos influenciarão na forma pela qual o problema será resolvido. O decisor influencia o processo decisório através de seus aspectos cognitivos e sua estrutura de preferências, enquanto que o analista influencia à medida que pode viesar o processo, influenciando o decisor a considerar algum aspecto segundo sua opinião pessoal ou impondo métodos e abordagens de sua preferência.

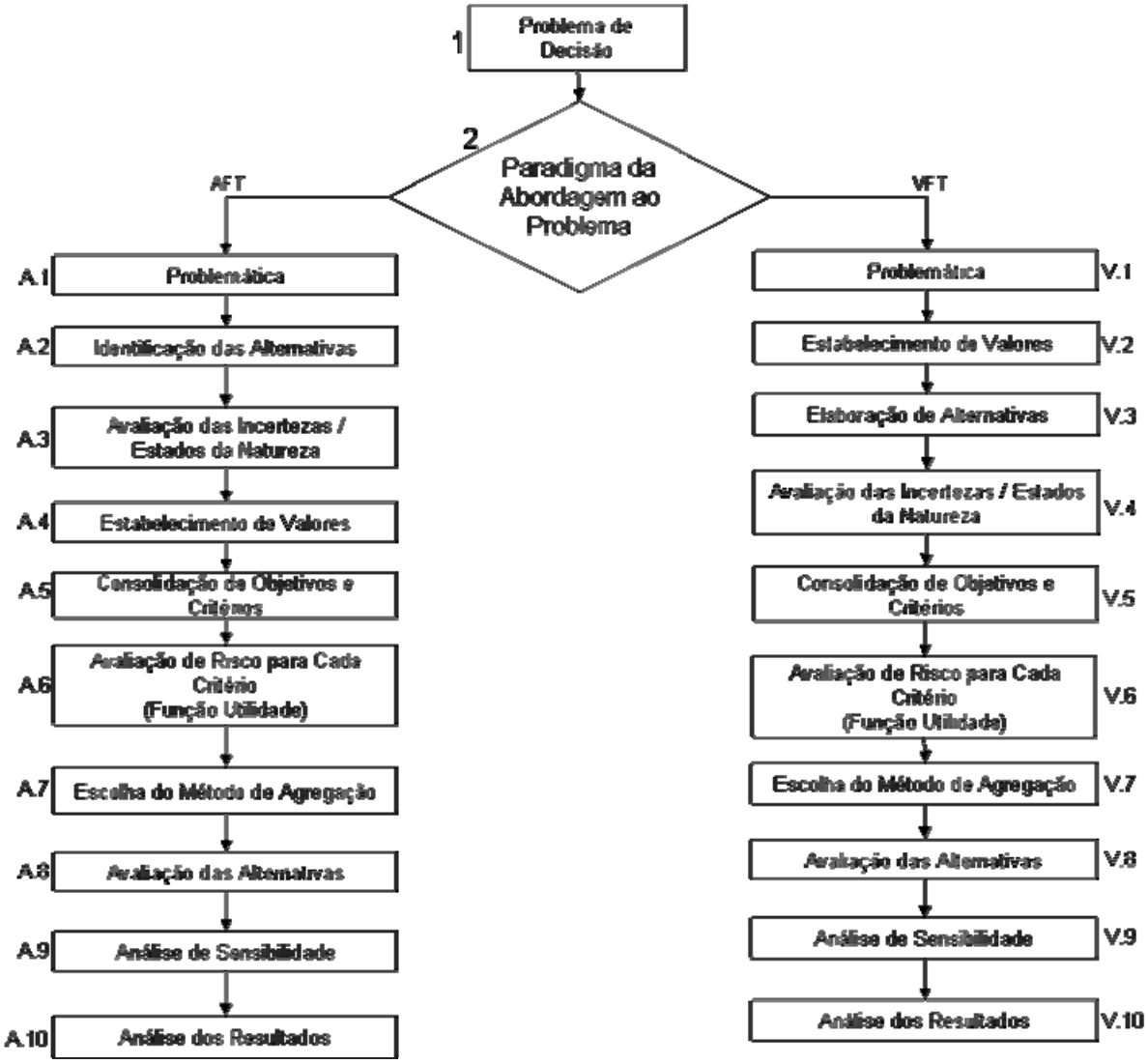

Figura 4.4 – Framework proposto para problema de decisão com risco multidimensional

Na Figura 4.4 está explicitada mais que uma diferença entre a seqüência em que é realizada a etapa de estabelecimento de valores e levantamento de alternativas, que se diferenciam pelo paradigma utilizado para análise do problema. Dessa forma, as etapas do *framework* da seguinte forma:

- **1 – Problema de Decisão:** Esta etapa representa a identificação ou o surgimento do problema de decisão.
- **2 – Nó de decisão para o paradigma da abordagem do problema(VFT e AFT):** Nesta fase há a tomada de decisão por qual paradigma será realizada a busca por uma solução para o problema, uma vez que se já se possui alguns dados do problema, é necessário que seja tomada a decisão sobre qual

paradigma seguir, se AFT ou VFT. Esta decisão deve levar em conta situação do problema de decisão considerado, para utilizar a abordagem VFT é necessário verificar se há tempo e recursos para seguir utilizando esta abordagem, que exige processos interativos de discussão e *brainstorming* para estruturar e valorar os objetivos para o problema que posteriormente serão utilizados exaustivamente num processo criativo para elaboração de alternativas que possam atender a estes objetivos. A Figura 4.5 ilustra a diferença entre a aplicação de AFT e VFT no processo decisório. As linhas pontilhadas na parte superior da figura ilustram a amplitude de escopo atingida por apenas identificar as alternativas mais óbvias e objetivos óbvios identificados pelas diferenças entre estas alternativas, sem que haja um processo criativo que permita ampliar o escopo da decisão e das alternativas, incluindo no conjunto de alternativas a região não contemplada na parte superior da Figura 4.5 (AFT), contemplada apenas na parte inferior da Figura 4.5 (VFT). Na decisão sobre qual paradigma seguir é evidente que o ideal seria seguir uma abordagem VFT, pois permitiria ampliar o escopo da decisão e possivelmente escolher uma alternativa que proporcionasse maior grau de satisfação ao decisor considerando objetivos que seriam ignorados através do paradigma AFT, contudo, o paradigma AFT prevalece como uma abordagem tradicional utilizada pela grande maioria, que evitam um processo longo de amadurecimento, aprendizado e criação, necessário para o VFT. Portanto, recomenda-se que a escolha entre estas duas abordagens ocorra através de uma avaliação sobre a viabilidade de utilizar o paradigma VFT e das desvantagens de aplicar AFT ao problema em questão avaliando questões referentes ao problema, tais como grau de complexidade do problema, pelo tempo disponível para a tomada de decisão e o custo para dedicar-se a um processo criativo de elaboração de alternativas. Mais detalhes sobre este tema podem ser encontrados em Keeney (1992).

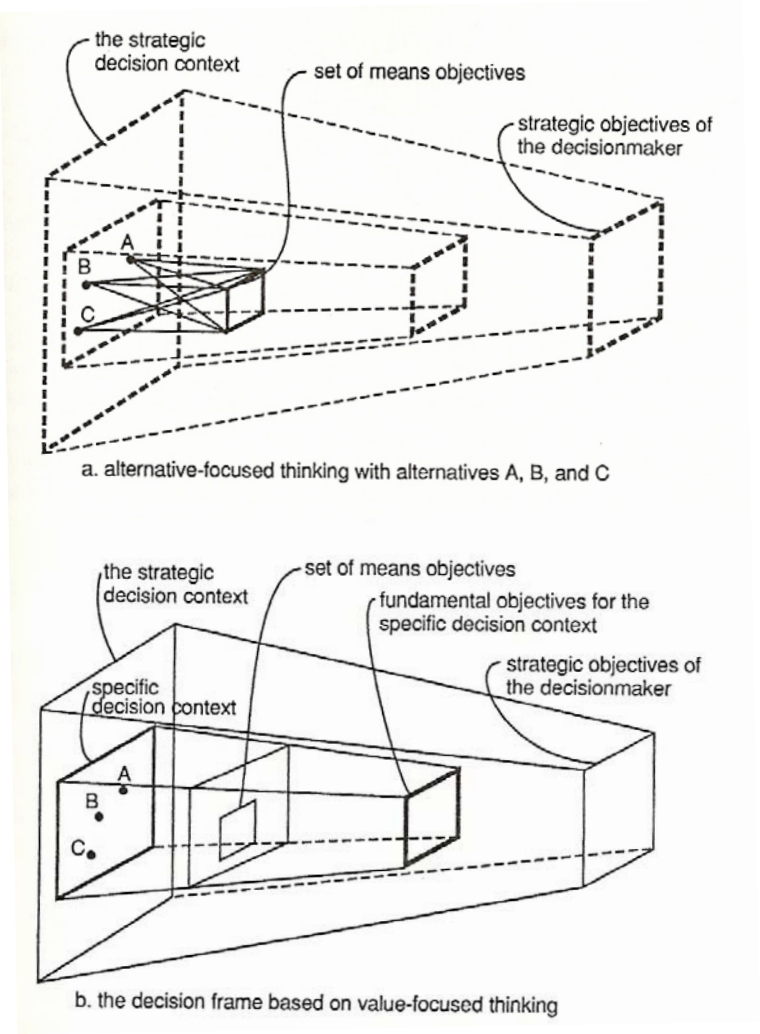

Figura 4.5 – Contraste entre abordagem AFT e VFT, Fonte: Keeney (1992).

- **A.1 – Problemática:** Nesta etapa é feita uma avaliação do problema e a que problemática este se refere que diz respeito ao tipo de estudo que será feito sob o conjunto de alternativas, para que isto seja considerado nas etapas posteriores do processo.
- **A.2 – Identificação das Alternativas:** Esta etapa negligencia processos criativos para a elaboração de alternativas, por isso as alternativas são apenas "identificadas".
- **A.3 - Avaliação das Incertezas / Estados da Natureza:** Nesta fase são avaliados e dimensionados os estados da natureza, para que sejam avaliadas as incertezas relacionadas a estes dada uma alternativa. Nesta fase podem ser utilizadas diversas técnicas para estimação destes estados da natureza, tais como

simulação e modelos de estimação de raios de destruição, por exemplo. Para a estimação das probabilidades, são utilizadas técnicas como análise de árvore de falhas, análise de árvores de eventos, elicitação de conhecimento a priori de especialistas, entre outras.

- **A.4 – Estabelecimento de Valores:** Nesta etapa são levantados os objetivos pelos quais as alternativas serão avaliadas.
- **A.5 – Consolidação de Objetivos e Critérios:** Nesta etapa é feita a consolidação dos objetivos identificados, onde é elaborada uma família coerente de critérios para avaliar as alternativas em seus atributos, tudo isto contribui para a construção de um modelo de valor.
- **A.6 – Avaliação de Risco para Cada Critério (Função Utilidade):** Nesta etapa é feita a avaliação de risco em cada critério, considerando as probabilidades de ocorrência das conseqüências na dimensão considerada e o valor atribuído a estas conseqüências através do levantamento da função utilidade, que além de fornecer uma medida para o risco, mede também o comportamento do decisor quanto a riscos, se este é avesso, propenso ou neutro a risco.
- **A.7 – Escolha do Método de Agregação:** Para a escolha do método devem ser considerados os aspectos levantados na seção 2.2.2 e discutidos adiante na seção 4.4, que se referem ao contexto analisado, à problemática e a estrutura de preferências do decisor. A Figura 4.6 denota esta etapa de escolha do método em meio ao processo decisório. Na Modelagem de Preferências é feita uma análise da estrutura de preferências do decisor, a qual é utilizada para o estabelecimento do modelo de valor inter-critério. A seguir é feita uma avaliação para encontrar o tipo de racionalidade compatível com o decisor, que vai determinar se este segue uma racionalidade compensatória ou não-compensatória. Partindo da racionalidade encontrada, deverá ser escolhido um método que atenda a este tipo de racionalidade para que seja iniciada a análise da estrutura axiomática dos métodos existentes em relação ao comportamento do decisor. A questão do viés do analista pode ser contornada seguindo o protocolo detalhado pela Figura 4.6.

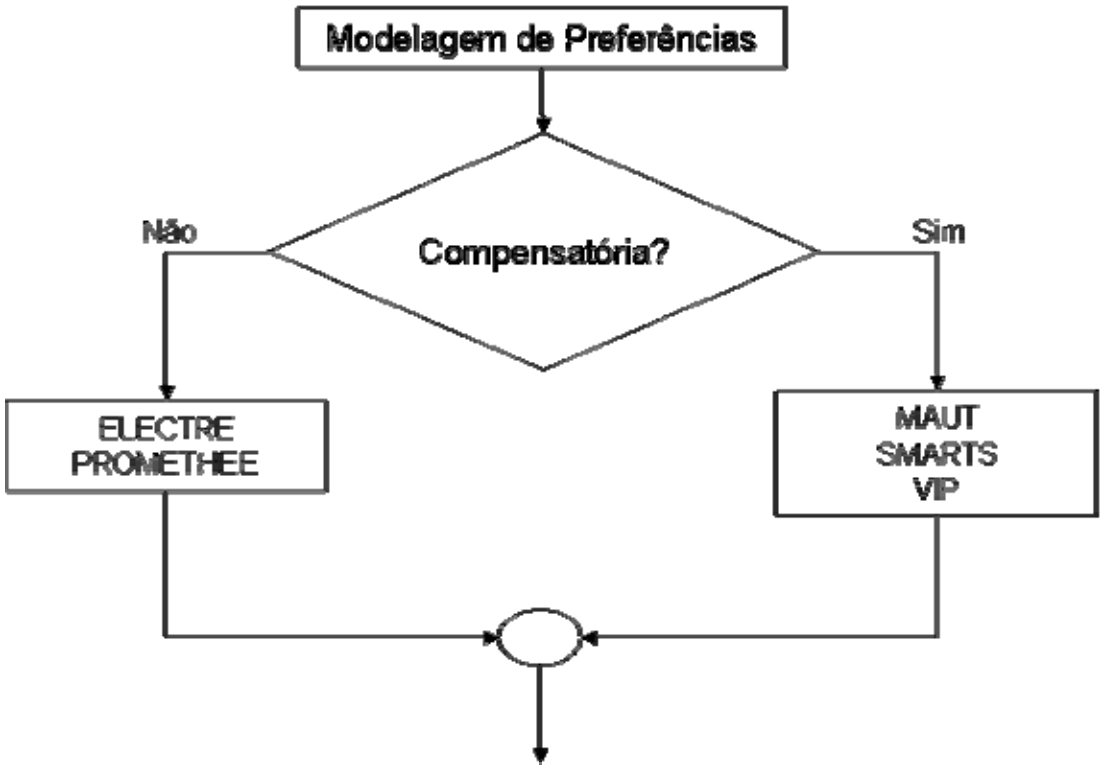

Figura 4.6 – Escolha do método de agregação.

- **A.8 – Avaliação das Alternativas:** Nesta fase é aplicada a metodologia de agregação de preferências, sendo elicitados os parâmetros referentes ao método escolhido e obtendo-se resultado da aplicação da metodologia, seja este uma escolha, um ordenamento ou uma classificação, por exemplo.
- **A.9 – Análise de Sensibilidade:** Esta etapa refere-se à verificação da robustez da solução, feita através da variação dos parâmetros utilizados onde é observada se há ou não alteração significativa na solução.
- **A.10 – Análise dos Resultados:** Uma vez verificada a robustez da solução encontrada, deve ser feita a análise e a interpretação dos resultados obtidos através do modelo, avaliando se a recomendação encontrada satisfaz às expectativas e preferências do decisor.
- **V.2 – Estabelecimento de Valores:** No contexto do VFT, esta etapa constitui na avaliação das aspirações do decisor para este problema, ou seja, o que é que ele deseja como resultado do problema. Nesta etapa é desenvolvida a identificação e

estruturação dos objetivos. Estes são classificados e analisados entre os objetivos final e objetivos meio.

- **V.3 – Elaboração de Alternativas:** Esta etapa de "elaboração de alternativas" é mais complexa, pois inclui o uso de técnicas para estimular o uso da criatividade para elaborar as alternativas e ao longo deste processo complexo de análise são avaliadas todas as implicações decorrentes das alternativas que podem ser consideradas.

A partir do momento em que as alternativas são elaboradas no VFT, o procedimento de avaliação destas é similar ao do AFT, de forma que as etapas V.1, V.4, V.5, V.6, V.7, V.8, V.9 e V.10 do VFT são similares às respectivas etapas do AFT.

Ressalta-se que a etapa de Estabelecimento de Valores (V.2) do VFT é de difícil estruturação, pois envolve um processo interativo, criativo e filosófico em torno daquilo que se anseia para a solução do problema. No entanto, salienta-se que o uso do VFT pode trazer benefícios ao processo decisório, pois estimula um processo criativo para a criação de alternativas que jamais seriam sequer avaliadas. Quanto a AFT, esta tem sido amplamente utilizada devido à maior facilidade para realizar a estruturação da etapa de estabelecimento de valores.

4.4 Escolha do Método Multicritério

De acordo com Almeida (2003; 2008), os principais fatores determinantes do método multicritério de decisão são o problema analisado, o contexto do problema, a estrutura de preferências do decisor e a problemática em questão. Segundo Roy (1996) há quatro tipos de problemáticas que são associadas ao resultado que se espera para o problema, portanto, a escolha do método pode se restringir ao conjunto de métodos que atendem o problema de decisão.

Almeida (2003; 2008) destacam um fator que surge freqüentemente na escolha do método a ser utilizado e pode provocar uma grave distorção, que é a preferência do analista por um método em particular, pois isto pode ocorrer não só por uma questão de preferência do analista apenas, e sim por restrições do analista quanto a familiaridade com outros métodos, mais que poderiam ser mais adequados para o problema de decisão em questão.

A introdução da etapa escolha do método de agregação neste modelo minimiza este problema, pois o analista deverá conduzir um estudo para avaliar qual abordagem será mais

adequada, considerando as preferências do decisor, a problemática e o contexto do problema, portanto a execução desta etapa conduz à redução do viés do analista ao longo do processo. O que geralmente ocorre é que o analista inicia o estudo do problema com o método multicritério já previamente estabelecido, sem que nenhuma avaliação tenha sido feita com o decisor (ALMEIDA, 2008).

Um fator predominante na escolha do método é a estrutura de preferências do decisor, pois dentre outros aspectos a facilidade e a simplicidade de aplicação dos métodos podem ser considerados na escolha do método, pois dependendo do contexto do problema que se deseja solucionar, podem existir aspectos que inviabilizem o uso de determinados métodos devido a sua complexidade e dificuldade de aplicação, por exemplo, o tempo para solucionar o problema ou até mesmo a impaciência do decisor.

No que tange às preferências do decisor, além das relações de preferência que este admite para comparar as alternativas, deve-se verificar a existência da transitividade, de ser capaz de estabelecer uma relação de preferência sobre todas as alternativas ou se a relação de incomparabilidade entre as alternativas poderá ser admitida.

Também entram em questão as discussões sobre a racionalidade do decisor, portanto deve ser escolhido o método mais apropriado para a racionalidade do decisor. O decisor pode possuir uma racionalidade compensatória ou não compensatória.

4.4.1 Abordagem Compensatória

A abordagem compensatória, também conhecida como escola americana, admite uma função de agregação dos critérios como um critério único de síntese, eliminando a relação de incomparabilidade (VINCKE, 1992).

A abordagem compensatória mais tradicional é a da teoria da utilidade multiatributo (MAUT), porém, esta pode ser utilizada como método. Diz-se utilizada como método, pois a aplicação da teoria só é válida se as hipóteses e a estrutura axiomática da teoria forem verificadas verdadeiras, caso não haja esta preocupação, diz-se que a teoria da utilidade multiatributo foi aplicada como método (ALMEIDA , 2003; GOMES et al, 2002).

Dentro do paradigma compensatório, admite-se que o decisor aceita compensar perdas em um critério ou objetivo por um ganho em outro objetivo. A taxa a qual o decisor aceita fazer estas trocas (compensação) chama-se *trade-off* , e são representadas pelas constantes de escala do modelo. Ao propor melhorias no método SMARTS, Edwards & Barron (1994)

deram importantes contribuições para os métodos de abordagem compensatória. Edwards & Barron (1994) ressaltaram a importância das constantes de escalas, os pesos na abordagem compensatória. Eles incorporaram ao método SMARTS um procedimento para elicitação das constantes de escala, levando em consideração o que estas representam. As constantes de escala representam duas dimensões, a primeira dimensão é o grau de importância do critério, e a segunda refere-se à amplitude da escala na qual este critério está sendo mensurado. Portanto, é necessário que o processo de elicitação das constantes de escala considere o seu real significado.

Na teoria da utilidade multiatributo a elicitação das constantes de escala é feita utilizando um processo de elicitação através de loterias, que considera as duas dimensões mencionadas no parágrafo anterior. Edwards & Barron (1994) propuseram um procedimento que faz a ancoragem da escala e do grau de importância do critério através de um processo de "swing" onde é aplicado um protocolo de elicitação e o decisor faz escolhas que determinam o valor das constantes de escala.

Outro exemplo de método compensatório é o VIP proposto por Dias & Clímaco (2000), este método permite avaliar as alternativas sem que seja necessária a especificação de valores para as constantes de escala. Neste método, as alternativas são avaliadas para um espaço de pesos, ou seja, as n constantes de escala são um subconjunto de $\Re^n$, exigindo menos informações do decisor, este método encaixa-se no conjunto de métodos aplicados a um contexto de informações parciais ou imprecisas. Portanto, dentro de um paradigma compensatório, pode-se escolher dentre os métodos VIP, SMARTS ou MAUT, por exemplo, aquele mais adequado para a situação.

4.4.2 Abordagem Não-Compensatória

A abordagem não-compensatória, também conhecida como escola francesa, é composta pelos métodos que utilizam uma relação de sobreclassificação, subordinação ou superação, uma relação que admite a relação de incomparabilidade dentro da estrutura de preferências do decisor (VINCKE, 1992; ROY, 1996).

Nesta abordagem, os pesos possuem um significado diferente do utilizado pela abordagem compensatória, onde estes são de fato constantes de escala. Na abordagem não-compensatória os pesos representam apenas o grau de importância entre os critérios.

No paradigma não compensatório, os pesos significam mais que uma simples representação da ordem de importância ou hierarquia entre os critérios. Uma forma de ilustrar isto pode ser feita pelo Método de Condorcet, proposto pelo marquês de Condorcet em 1785 e considerado o predecessor dos métodos não compensatórios. O método de Condorcet considera que uma alternativa *a* sobreclassifica uma alternativa *b* se o número de critérios (votos) para os quais *a* é melhor do que *b* é maior do que o número de critérios em que *b* é melhor do que *a*. Portanto, os pesos neste caso significam o número de votos para que *a* seja melhor do que *b* para os critérios em que *a* é melhor do que *b* e o mesmo para os critérios em que *b* é melhor do que *a*, eliminando assim a relação de compensação pela diferença intra-critério nos critérios em que *b* é melhor que *a* para justificar a preferência por *b* e não por *a*, que possui um número maior de "votos" (VINCKE, 1992).

Portanto, na abordagem não compensatória os pesos representam a importância dos critérios, tal que, se a alternativa *a* sobreclassifica a alternativa *b* no conjunto de critérios *F* e a alternativa *b* sobreclassifica a alternativa *a* no conjunto de critérios *G*, e *a* sobreclassifica globalmente *b* , isto quer dizer que o conjunto de critérios *F* é mais importante que o conjunto de critérios *G*, portanto o peso dos critérios *F* é maior que o peso dos critérios *G* (VINCKE, 1992).

Na escola francesa, se destacam duas famílias de métodos de sobreclassificação, a família de métodos PROMETHEE (BRANS & MARESCHAL, 2002) e a família de métodos ELECTRE (ROY, 1996).

Portanto, dentro do paradigma não-compensatório, pode ser utilizado tanto um método da família PROMETHEE quanto da família ELECTRE, que se diferenciam na forma em que agregam a preferências e no número de parâmetros a serem elicitados.

4.5 Diferencial do Modelo Proposto

No modelo proposto nesta tese é possível agregar o julgamento humano de valor para múltiplas dimensões de risco, utilizando-se métodos de apoio multicritério à decisão. Dentro da estrutura proposta, a teoria da utilidade permite a medição do risco através de uma cardinalidade fraca para cada critério, considerando o comportamento do decisor em relação ao risco.

Após a mensuração dos riscos, as características do problema balizarão a escolha da abordagem a ser utilizada para agregação das múltiplas dimensões de risco consideradas, podendo ser escolhida uma abordagem compensatória ou não compensatória.

Assim, a riqueza do enfoque multicritério de apoio a decisão para agregar as múltiplas dimensões de riscos e o uso da teoria da utilidade para medir os riscos utilizando o julgamento humano de valor e o comportamento do decisor permitem obter conclusões mais completas que o simples uso de árvores de falha, análise das probabilidades de ocorrência de um cenário, avaliação de freqüências, a simples estimação da dimensão dos danos provocados por uma catástrofe e a avaliação da freqüência com que ocorrem estes danos.

4.6 Conclusões

Conforme visto, foi proposto nesta tese um *framework* para preencher a lacuna existente na literatura quanto à decisão num contexto de análise de riscos tecnológicos, especificamente, o contexto de petróleo e gás, que por si só difere de outros contextos tais como a análise de riscos em finanças ou gestão de projetos. O contexto de riscos tecnológicos apresenta uma grande complexidade para o levantamento e estimação de cenários, conseqüências e probabilidades, fazendo com que as decisões sejam tomadas sem o uso de uma abordagem mais adequada que considere as incertezas, o julgamento de valor humano sobre as conseqüências e o comportamento do decisor com relação a risco e a agregação de múltiplas dimensões de risco, inerentes à estas situações.

Diferentemente do contexto de análise de risco em finanças, onde as conseqüências ocorrem basicamente na dimensão financeira, e de análise de risco em gestão de projetos, onde há dimensões de prazo, financeira e outras, no contexto de riscos tecnológicos devem ser considerados pelo menos riscos humanos, ambientais e patrimoniais, para os quais é necessário um complexo processo de estimação de conseqüências e probabilidades decorrentes da manifestação de um cenário catastrófico.

Buscando o atendimento dos objetivos desta tese, será contextualizado no Capítulo 5 um problema de decisão numa plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás baseado no estudo de Khan et al. (2002) referente à identificação de perigos na estrutura da plataforma *offshore* e proposição de melhorias. Assim, foi aplicado o *framework* proposto neste trabalho para a tomada de decisão quanto à escolha de quais projetos de melhoria deveriam ser implementados no processo de extração de petróleo e gás desta plataforma *offshore*.

5 MODELO DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE RISCOS EM UNIDADES DE PROCESSO DE EXTRAÇÃO OFFSHORE

Nesta seção será apresentada a modelagem de um problema de decisão para implementação de melhorias no projeto das instalações de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás considerando os riscos envolvidos para essa tomada de decisão.

Serão tratados aspectos referentes a implementação de melhorias dentro do processo primário de uma plataforma *offshore*, buscando um compromisso entre a redução de riscos desta operação e as noções de valor referente ao montante a ser investido nestas melhorias e de fato o quanto é que estas melhorias podem oferecer em termos de redução de riscos através da redução das probabilidades de eventos catastróficos, comparando-se de fato a relação entre o valor a ser investido em melhorias e o potencial de redução de riscos.

5.1 Apresentação do Problema

Dentro de uma plataforma de extração *offshore* existem inúmeras fontes de perigos, podendo-se verificar na literatura algumas análises sobre as possíveis conseqüências destas fontes de perigo.

Assim, podem ser confrontados os indicadores de destruição com a densidade demográfica da região, urbanização ou propriedade dos indivíduos e o meio ambiente afetado pelo evento catastrófico.

Considerando o ambiente de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás, observa-se um contexto bastante particular quanto aos fatores citados no parágrafo anterior, pois a densidade da região está restrita aos funcionários da empresa de extração que estão trabalhando naquela estrutura, não há urbanização ou propriedades ao redor, no entanto, há um grande potencial de danos ao meio ambiente, não só aquele ambiente ao redor, mas outros locais que podem ser atingidos em virtude do deslocamento no mar de óleo e demais produtos químicos.

À medida que as alterações no meio ambiente são percebidas pela humanidade, o que tem se intensificado devido às alterações climáticas percebidas nas últimas décadas, a preocupação com o meio ambiente tem se tornado cada vez maior, aumentando as restrições e regulamentações quanto aos riscos ambientais.

Apesar de diversas medidas de segurança adotada e da existência de normas de segurança bastante restritivas, a incerteza se faz presente, e se manifesta freqüentemente em acidentes, tais como os ocorridos:

- Acidente na plataforma Enchova 1 (operada pela Petrobrás) em 1984, também na bacia de Campos.
- Acidente na plataforma de produção Piper Alpha (operada pela Occidental Petroleum Ltd. e Texaco) em 6 de julho de 1988, decorrente de um vazamento de condensado de gás natural que se formou sobre a plataforma incendiou-se, causando uma explosão enorme que resultou na morte de 167 pessoas.
- A ruptura do "Duto PE-II da Petrobrás", que resultou no vazamento de 1,3 milhões de litros de óleo combustível MF 380, ocorrido em 18 de janeiro de 2000.
- Acidente na plataforma P-36 (operada pela Petrobras), resultando na morte de 11 funcionários e no prejuízo de aproximadamente R$ 1 bilhão.
- Acidente na plataforma P-7 (operada pela Petrobras), causado por alterações na pressão do poço (*kick*) que lançou uma bolha à superfície, resultando no vazamento de 26 mil litros de óleo bruto no mar que em pouco tempo já alcançava uma mancha de 43 quilômetros quadrados no mar.
- Acidente na plataforma P-9 (operada pela Petrobras) em 19 de maio de 2005, resultando no vazamento de 5 mil litros de óleo no campo de Corvina.
- Acidente na plataforma petrolífera Statfjord A (operada pela StatoilHydro) situada no Mar do Norte ocorrido em 24 de maio de 2008, resultando no bombeamento de cerca de 1,2 mil metros cúbicos água com petróleo para o oceano por questões de segurança.

5.1.1 A Estrutura de uma Plataforma *Offshore*

Considerando a estrutura de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás, observa-se o propósito desta estrutura, que é operar os poços de petróleo e separar os fluidos obtidos destes poços de petróleo em óleo (petróleo cru), gás condensado, gás e água. Posteriormente, a plataforma *offshore* bombeia o óleo, o gás condensado e o gás para uma unidade *onshore* que pode armazenar e/ou fazer atividades de refino.

Portanto, o processo de extração de uma plataforma *offshore* pode ser dividido de forma genérica em três partes principais:

- Cabeça do poço (*Wellhead*): é composta por um conjunto de engrenagens, válvulas e diversos adaptadores que executam o controle da pressão num poço de extração de petróleo e gás.
- Separadores: é formado pelos equipamentos responsáveis por dividir o material extraído do poço entre os componentes de interesse, afinal, o fluido proveniente da extração é composto por óleo, água, gás natural e gás liquefeito de petróleo.
- Compressão de gás: são diversas unidades de compressão responsáveis por auxiliar o processo primário, pelo bombeamento e pressurização do gás para tanques de armazenamento, dutos de distribuição, etc.

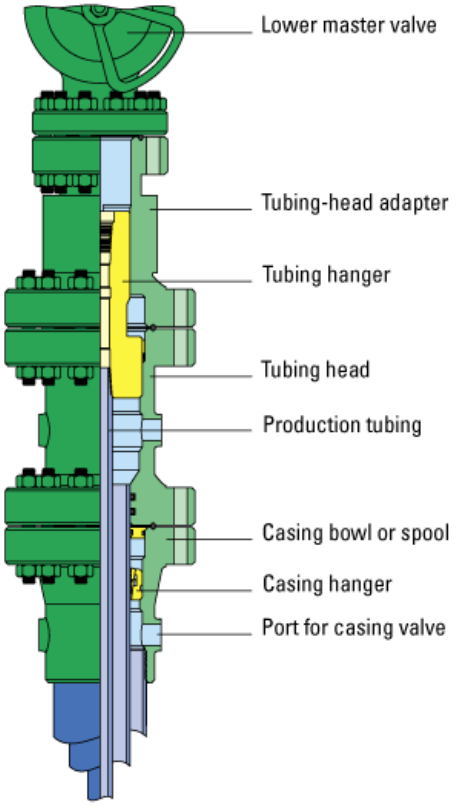

Figura 5.1 – Ilustração da cabeça do poço (Wellhead), Fonte: Schlumberger (2008a).

O funcionamento do processo de extração duma plataforma *offshore* funciona da seguinte forma:

A cabeça do poço, conforme Figura 5.1, controla a pressão no poço e alimenta o *riser*, ilustrado na Figura 5.2, que constituí em um sistema de tubulações submersas para transportar

o material extraído do poço até a superfície (plataforma) e dar suporte às atividades da cabeça do poço. Dentro do *riser* existe a movimentação de fluidos em dois sentidos, é feito a injeção de fluidos para ocupar o espaço do material extraído do poço e assim, é feita a extração do material do poço no sentido contrário. Na parte inferior do *riser* existe um equipamento acoplado para prevenir a ocorrência de *blowout*, chamado de BOP (*BlowOut Preventer*), o BOP serve para prevenir contra uma liberação excessiva de gás repentina de forma a evitar o aumento de pressão com grande potencial de se tornar um *blowout*, esse evento é conhecido como *kick*.

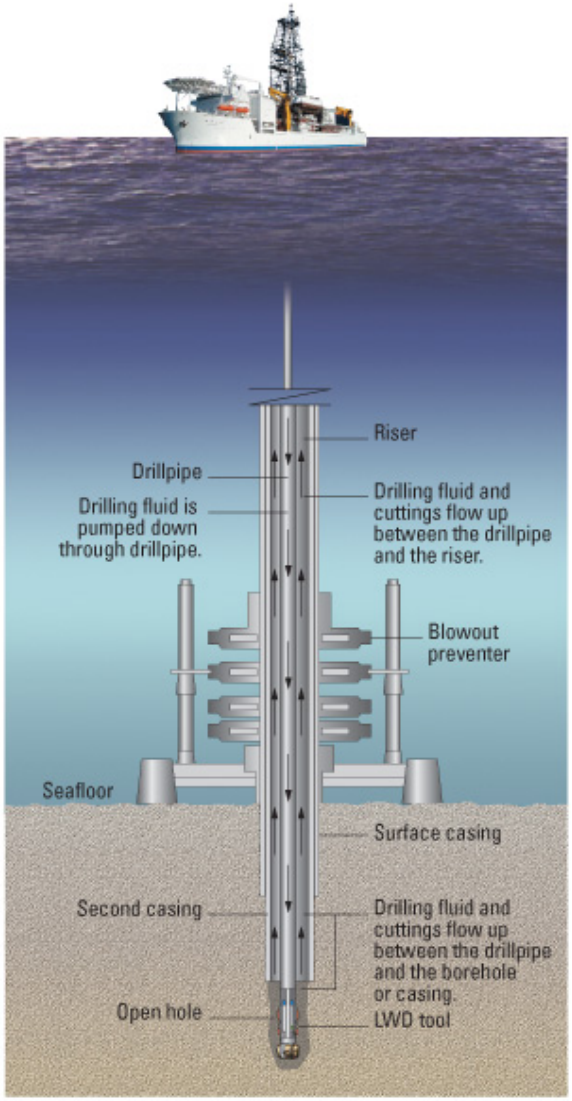

Figura 5.2 – Ilustração do riser, Fonte: Schlumberger (2008b).

Quando o material atinge à superfície, ele é processado na plataforma para separação entre água, óleo, gás natural e gás liquefeito de petróleo. Este processo também é conhecido como processo primário (THOMAS, 2004; NEIVA, 1993).

5.1.2 O Processo Primário

Para entender melhor a estrutura de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás e o que representa o processo primário, a Figura 5.3 ilustra o layout típico de uma planta de processo primário numa plataforma *offshore*, indicando a disposição compacta das unidades do processo em questão.

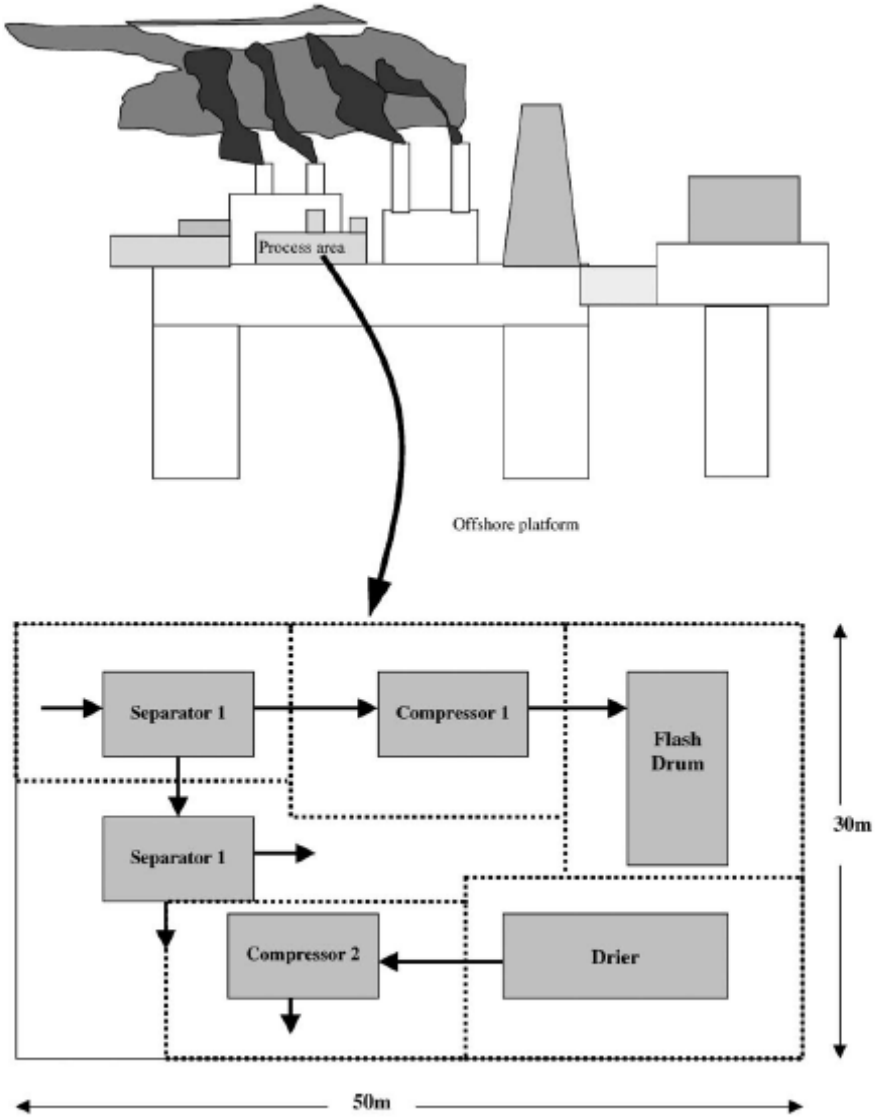

Figura 5.3 – Layout da planta de processo primário de um plataforma de extração offshore, Fonte: Khan et al. (2002).

O fluxo do processo primário ocorre da seguinte forma, inicialmente o fluido proveniente do poço é bombeado para um separador de óleo. Este é o primeiro separador, o separador 1. Pode-se ter uma idéia do processo que ocorre no separador 1 através da Figura 5.4 que ilustra como ocorre esta separação.

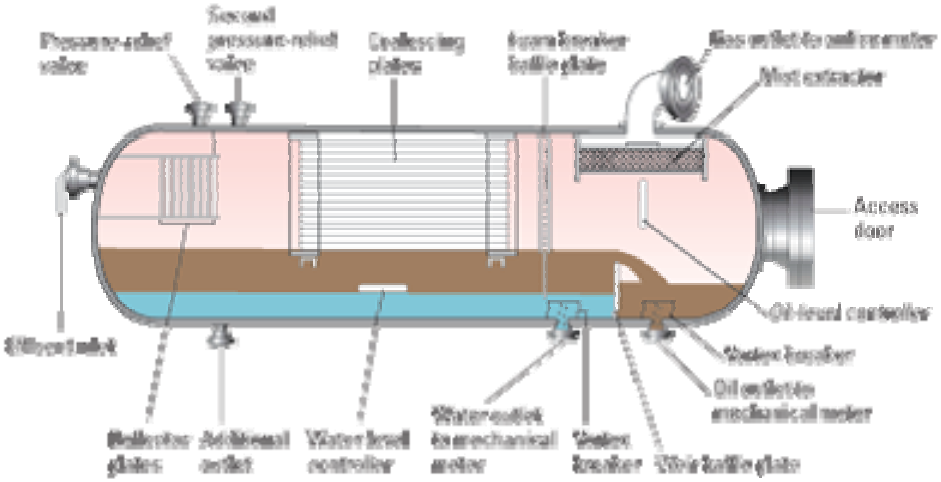

Figura 5.4 – Ilustração do separador de óleo (separador 1), Fonte: Schlumberger (2008c).

O separador 1 é constituído por um recipiente cilíndrico ou esférico utilizado para dividir o fluido do poço entre óleo, gás e água. Existem dois tipos de separador de óleo, de duas fases e de três fases, onde o separador de duas fases lida apenas com óleo e gás, enquanto o de três fases lida com água, óleo e gás. O separador de óleo a ser considerado neste trabalho é o de três fases.

A separação inicia com a entrada do fluido do poço no recipiente do separador horizontal descrito na Figura 5.4, que se choca com uma série de placas perpendiculares, resultando na concentração dos líquidos no fundo do recipiente enquanto o gás (vermelho) se concentra na parte superior do recipiente. A ação da gravidade é o principal fator a provocar a separação, os fluidos mais pesados acomodam-se na parte inferior, enquanto os mais leves se acomodam no topo. Assim, pela diferença de densidade dos fluidos e pela ação da força da gravidade os líquidos são separados em óleo (marrom) e água (azul).

Contudo, eficiência do processo de separação entre gás e líquido vai depender da pressão em que esse separador opera, o tempo médio que o fluido fica dentro do separador e o

tipo de fluxo que o fluido segue, um fluxo turbulento permitirá a formação de um número maior de bolhas que um fluxo laminar.

A medição das quantidades de gás, óleo e água separadas são feitas individualmente à medida em que estes fluidos saem da unidade de separação para as tubulações subseqüentes do processo. Portanto, periodicamente se faz necessária a re-calibração dos processos de medição líquida e gasosa.

A seqüência do fluxo do processo primário pode ser vista na Figura 5.5, que apresenta a descrição deste processo. O óleo separado pelo separador 1 pode ser transportado para uma instalação *onshore* ou transportado através de dutos para alguma unidade de armazenamento temporária até que seja transportado para a instalação *onshore*. A água resultante do processo de separação 1 passa por um segundo processo de separação, o separador 2, para remover o gás ainda misturado na água.

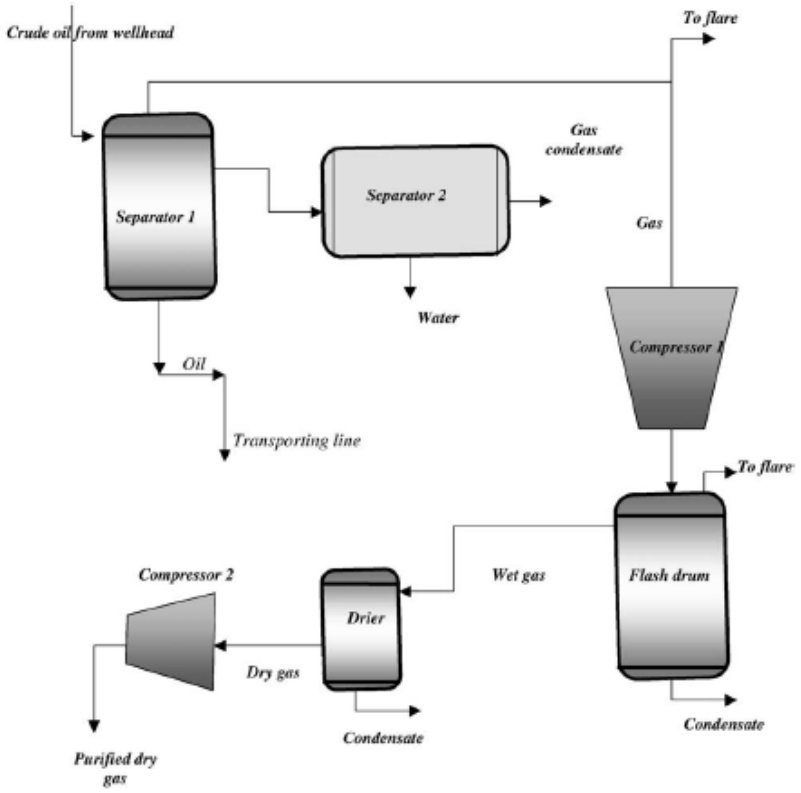

Figura 5.5 – Fluxo da operação do processo primário em uma plataforma de extração de petróleo e gás, Fonte: Khan et al. (2002).

O gás resultante dos processos de separação pode seguir para um processo de separação entre o gás natural (seco) e o gás liquefeito de petróleo, comumente chamado de GLP. O GLP condensa a uma pressão muito inferior à necessária para condensar o gás natural, daí a

atribuição da sigla ao nome do gás. Portanto, à medida que este gás condensa, a sua retirada pode ser feita ao longo de quase todas as etapas do processo primário. O compressor 1 bombeia os gases para o *flash drum*, onde estes são comprimidos, possibilitando a remoção de grande quantidade de gás condensado nesta etapa. Posteriormente, o gás passa pelo secador onde é feito o último estágio para remoção do gás liquefeito para que o gás natural possa ser bombeado através dos dutos para instalações *onshore* ou para tanques onde será armazenado temporariamente antes de ser transportado para instalações *onshore*. Este gás também pode ser utilizado na geração de energia para o funcionamento da plataforma ou para ser injetado dentro do poço ajudando no controle da pressão dentro do poço. Quando o gás é considerado desnecessário ou indesejado, este é queimado no *flare*, conforme ilustrado na Figura 5.6. O mesmo destino é dado ao gás liquefeito de petróleo.

Infelizmente, boa parte do gás extraído é desperdiçado e queimado no *flare*, poluindo o meio ambiente. O que ocorre é que pelas características do gás, seu transporte é mais arriscado e mais custoso, devido à pressão utilizada para comprimi-lo. O gás também possui uma margem de lucro menor que a do óleo que pode ser utilizado em diversos setores da economia.

Além disso, à falta de infra-estrutura para o transporte e armazenamento deste gás e a distância entre o local onde é extraído e o mercado consumidor fazem com que a opção mais econômica seja queimá-lo. Estima-se que a quantidade de gás natural queimada anualmente nos *flares* seja de aproximadamente 170 bilhões de metros cúbicos (WORLDWATCH, 2008), o que representaria cerca de 40 bilhões de dólares se vendidos no mercado americano.

Figura 5.6 – Flare, gás indesejado sendo queimado, Fonte: Britannica (2008).

5.1.3 Identificação de Perigos numa Plataforma *Offshore*

Para identificar, classificar e ordenar estas fontes de perigo são analisados parâmetros referentes ao grau de dano de uma eventual explosão ou incêndio, as quantidades de material armazenado ou existente no processo que podem liberar energia durante resultando em fatalidades durante uma catástrofe e as conseqüências provocadas pelo grau de toxicidade liberada pelos materiais envolvidos. Khan et al. (2002) apresentam um estudo sobre a identificação destes perigos, identificando em função do grau de dano das conseqüências a severidade destas fontes de perigo.

A análise de todos estes parâmetros é conseqüentemente complexa e exige o uso de ferramentas computacionais que permitam simular os efeitos de uma catástrofe, considerando o cenário na qual ocorre e traduzindo as conseqüências esperadas em indicadores que reflitam o potencial de destruição causado para que esta informação possa ser confrontada com a realidade do local onde ocorre o evento catastrófico.

De acordo com os resultados obtidos por Khan et al. (2002) para o estudo entre as principais fontes de perigo numa plataforma *offhore*, foram apontados como principais fontes de risco as seguintes unidades da plataforma:

- Dutos de óleo.
- Dutos de gás.
- Separador de óleo (separador 1).
- Separador de condensação (separador 2).
- Unidades de bombeamento.
- Unidade de *flash drum*.
- Secador.
- Unidades de compressão.

Khan et al. (2002) classificaram estas unidades de acordo com o índice de destruição por explosão e incêndio calculado durante a etapa de identificação dos perigos (*FEDI – Fire and Explosion Damage Index*).

Este índice é composto pela análise de parâmetros de destruição e conseqüências negativas resultantes da materialização de um evento catastrófico. Na Figura 5.7 pode-se observar a severidade das conseqüências provenientes de cada uma destas fontes de perigo em virtude do valor do índice FEDI atribuído ao perigo que cada unidade representa. Pode-se observar que as unidades de dutos de óleo, dutos de gás e unidades de bombeamento

representam um grau de perigo moderado, enquanto que o separador de óleo, o separador de condensação, a unidade de *flash drum*, o secador e as unidades de compressão representam um alto grau de perigo.

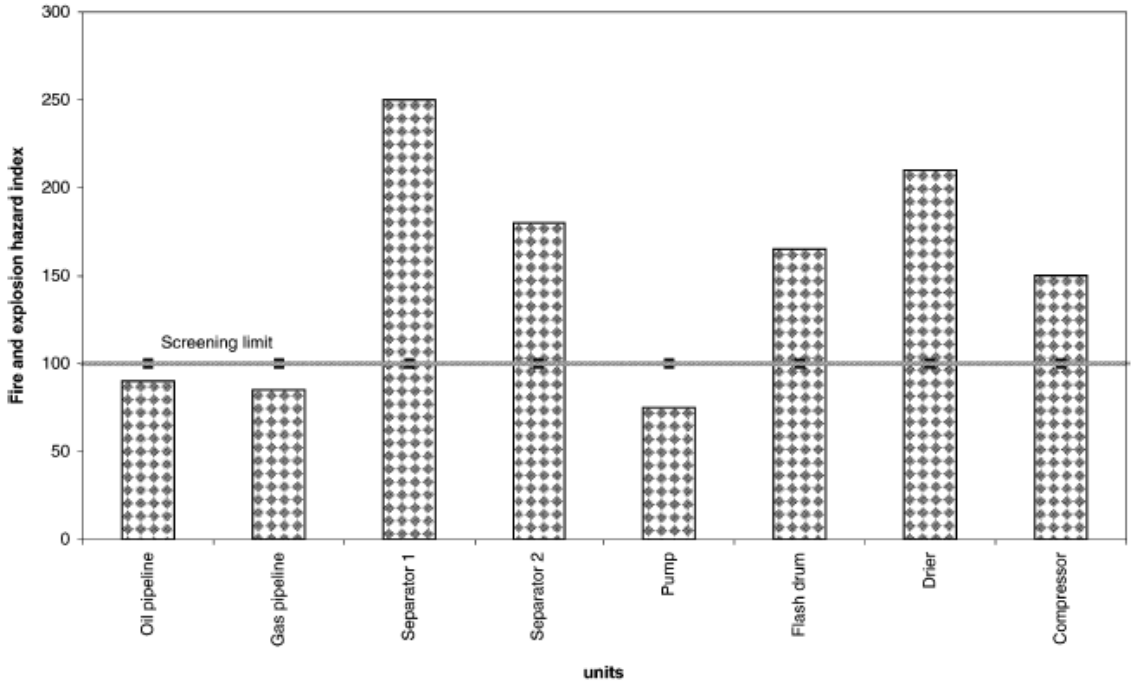

Figura 5.7 - Resultados obtidos da etapa de identificação dos perigos da plataforma, Fonte: Khan et al. (2002).

Estes resultados servem principalmente para dar uma idéia da prioridade que estas unidades possuem no que tange ao desenvolvimento de medidas para redução de risco que serão formuladas a partir desta informação sobre a identificação do grau de perigo destas unidades.

Portanto, baseado neste estudo de identificação de perigos foram apresentados por Khan et al. (2002) cinco projetos de melhoria das instalações do processo primário de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo. Com base nas performances destes projetos de melhoria das instalações em termos de redução de risco, será modelada e apresentada uma abordagem para priorizar estes projetos de melhoria

5.2 Modelagem do Problema

O problema a ser modelado é uma conseqüência da identificação do quadro de riscos atual de uma instalação de processamento composta por diversas fontes de perigo. Dentre

estas fontes, foram escolhidas aquelas que superavam patamares de perigo considerados críticos e a partir daí serão analisadas as soluções de melhoria nas instalações.

Como pode ser visto a partir da Figura 5.7, as unidades que superam o patamar de perigo crítico são:

- Separador de óleo (separador 1).
- Separador de condensação (separador 2).
- Unidades de compressão.
- Unidade de *flash drum*.
- Secador.

Para cada uma destas unidades, buscou-se analisar as conseqüências da implementação de respectivos projetos de melhoria, visando uma análise que contemplasse a redução de riscos inerente à implementação de melhorias em cada unidade e que contemplasse também o montante a ser investido para implementação das melhorias.

5.2.1 Conjunto de Alternativas

Uma vez que existe a possibilidade de implementar apenas uma parte dos projetos de melhoria, ou seja, implementar apenas o projeto de melhoria no separador de óleo ou implementar apenas os projetos de melhoria para o secador e para as unidades de compressão, por exemplo. Para simplificação do texto, estas unidades de processo serão chamadas de unidade 1 (separador de óleo ou separador 1), unidade 2 (separador de condensação), unidade 3 (unidades de compressão), unidade 4 (unidade de *flash drum*) e unidade 5 (secador). Da mesma forma, os projetos de melhoria relativos a estas unidades serão designados por projeto unidade 1, projeto unidade 2, projeto unidade 3, projeto unidade 4 e projeto unidade 5, respectivamente.

Foi elaborada uma matriz de alternativas referente às ações a serem executadas quanto às unidades a serem contempladas por melhorias, inclusive com a alternativa de não implementar nada. Portanto, essa matriz de alternativas é composta por todas as combinações de ações quanto a implementar ou não implementar cada um dos projetos, que resulta em 32 alternativas conforme Tabela 5.1. Esta tabela apresenta as ações a serem executadas nas 32 alternativas em termos de uma matriz booleana, onde para cada alternativa as ações a serem executadas estão indicadas por zero ou um, onde o zero significa não implementar o projeto

de melhoria referente àquela unidade e um significa a implementação do projeto de melhoria na unidade.

Tabela 5.1 – Conjunto de alternativas

Alternativas	Ação (projetos a implementar)	Proj. Unid 1	Proj. Unid 2	Proj. Unid. 3	Proj. Unid.4	Proj. Unid. 5
1	Nenhum	0	0	0	0	0
2	Proj. 5	0	0	0	0	1
3	Proj. 4	0	0	0	1	0
4	Proj. 4 e 5	0	0	0	1	1
5	Proj. 3	0	0	1	0	0
6	Proj. 3 e 5	0	0	1	0	1
7	Proj. 3 e 4	0	0	1	1	0
8	Proj. 3, 4 e 5	0	0	1	1	1
9	Proj. 2	0	1	0	0	0
10	Proj. 2 e 5	0	1	0	0	1
11	Proj. 2 e 4	0	1	0	1	0
12	Proj. 2, 4 e 5	0	1	0	1	1
13	Proj. 2 e 3	0	1	1	0	0
14	Proj. 2, 3 e 5	0	1	1	0	1
15	Proj. 2, 3 e 4	0	1	1	1	0
16	Proj. 2, 3, 4 e 5	0	1	1	1	1
17	Proj. 1	1	0	0	0	0
18	Proj. 1 e 5	1	0	0	0	1
19	Proj. 1 e 4	1	0	0	1	0
20	Proj. 1, 4 e 5	1	0	0	1	1
21	Proj. 1 e 3	1	0	1	0	0
22	Proj. 1, 3 e 5	1	0	1	0	1
23	Proj. 1, 3 e 4	1	0	1	1	0
24	Proj. 1, 3, 4 e 5	1	0	1	1	1
25	Proj. 1 e 2	1	1	0	0	0
26	Proj. 1, 2 e5	1	1	0	0	1
27	Proj. 1, 2 e 4	1	1	0	1	0
28	Proj. 1, 2, 4 e 5	1	1	0	1	1
29	Proj. 1, 2 e 3	1	1	1	0	0
30	Proj. 1, 2, 3 e 5	1	1	1	0	1
31	Proj. 1, 2, 3 e 4	1	1	1	1	0
32	todos	1	1	1	1	1

5.2.2 Estados da Natureza e Probabilidades (θ e $P(\theta)$)

Dentre os estados da natureza, foram considerados os eventos mais factíveis apontados por Khan et al. (2002) para cada unidade considerada do processo primário de uma plataforma de extração de petróleo e gás *offshore*.

A cada um destes eventos, estão relacionadas conseqüências apresentadas em Khan et al. (2002) que foram obtidas utilizando-se ferramentas computacionais para estimação de

danos provenientes deste tipo de acidentes em plataformas. Os possíveis estados da natureza considerados são:

- **Cenário 0**: não há acidente.
- **Cenário 1**: acidente no separador de óleo (separador 1), *BLEVE* seguido de incêndio.
- **Cenário 2**: acidente no separador de condensação (separador 2), *VCE* seguido de incêndio.
- **Cenário 3**: acidente nos compressores (compressor 1 ou compressor 2), liberação de gás combustível com grande probabilidade de se tornar um *jet fire*.
- **Cenário 4**: acidente no *flash drum, VCE* seguido de incêndio.
- **Cenário 5**: acidente no secador, *BLEVE* seguido de incêndio.

Os cenários considerados são obtidos da literatura, que neste caso já apresenta as conseqüências e os danos causados pelos incêndios, não sendo considerada a ocorrência de um cenário em virtude da ocorrência de outro devido, pois todas as implicações da ocorrência de um determinado cenário já estão computadas na conseqüência do cenário, que considera a existência de paredes corta-fogo, das proteções contra incêndios e dos sistemas de segurança do processo, tais como válvulas e sensores para interromper o processo, de forma a evitar uma maior catástrofe devido a um efeito dominó de acidentes ao longo da estrutura da plataforma.

A probabilidade de ocorrência de cada um destes cenários pode ser calculada a partir das árvores de falha apresentadas em Khan et al. (2002), onde também são apresentadas as probabilidades dos eventos de cada árvore de falha. A probabilidade de ocorrência do cenário 0 (não há acidentes) é igual a 1 menos a soma das probabilidades dos demais cenários.

As árvores de falha são compostas por uma combinação de eventos que, ocorridos dentro de uma seqüência descrita pela árvore resultarão na ocorrência do evento topo, neste caso o acidente que compõe cada cenário (estado da natureza). A cada um destes eventos que compõe a árvore de falha estará associada uma probabilidade de ocorrência, ou seja, a probabilidade de ocorrência do evento e_i, $P(e_i)$, no caso da árvore de falhas para o cenário 2, por exemplo, tem-se $1 \leq i \leq 21$ como pode-se observar na árvore de falhas ilustrada pela Figura 5.8.

Para que o cenário 2, descrito pela árvore de falhas da Figura 5.8, se manifeste é necessário que ocorram os seguintes eventos:

- Vazamento nas juntas (e_1).

- Vazamento no duto principal (e_2).
- Vazamento nas juntas (e_3).
- Vazamento no duto principal (e_4).
- Vazamento no recipiente do separador (e_5).
- Vazamento de uma ruptura, junta ou fenda (e_6).
- Vazamento nas conexões dos canos (e_7).
- Vazamento na válvula de segurança (e_8).
- Vazamento na válvula de pressão (e_9).
- Vazamento nas válvulas de controle (e_{10}).
- Obstrução da tubulação de saída (e_{11}).
- Aumento da pressão na tubulação de abastecimento (e_{12}).
- Mudança repentina de fase (e_{13}).
- Absorção de calor externo resultando no aumento da pressão (e_{14}).
- Ignição devido à energia explosiva (e_{15}).
- Ignição devido ao calor da vizinhança externa (e_{16}).
- Ignição devido à faísca elétrica (e_{17}).
- Liberação da tubulação após explosão (e_{18}).
- Liberação do recipiente em conseqüência da explosão (e_{19}).
- Ignição devido a energia explosiva externa (e_{20}).
- Ignição devido ao acúmulo de calor (e_{21}).

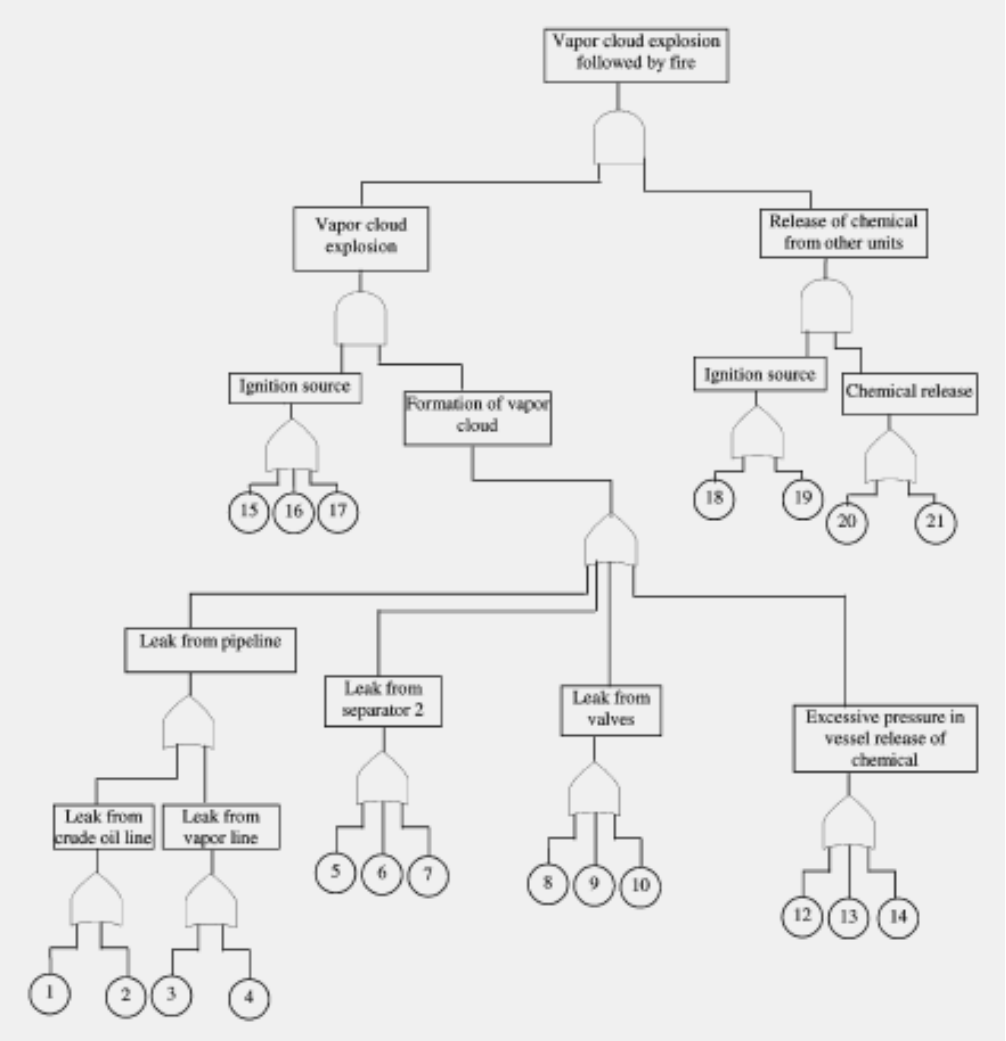

Figura 5.8 – Árvore de falha para cenário 2 (acidente no separador 2), Fonte: Khan et al. (2002).

Após a implementação do projeto de melhorias 2 (unidade 2), pode-se observar as mudanças ocorridas na árvore de falhas para o cenário 2 conforme a Figura 5.9.

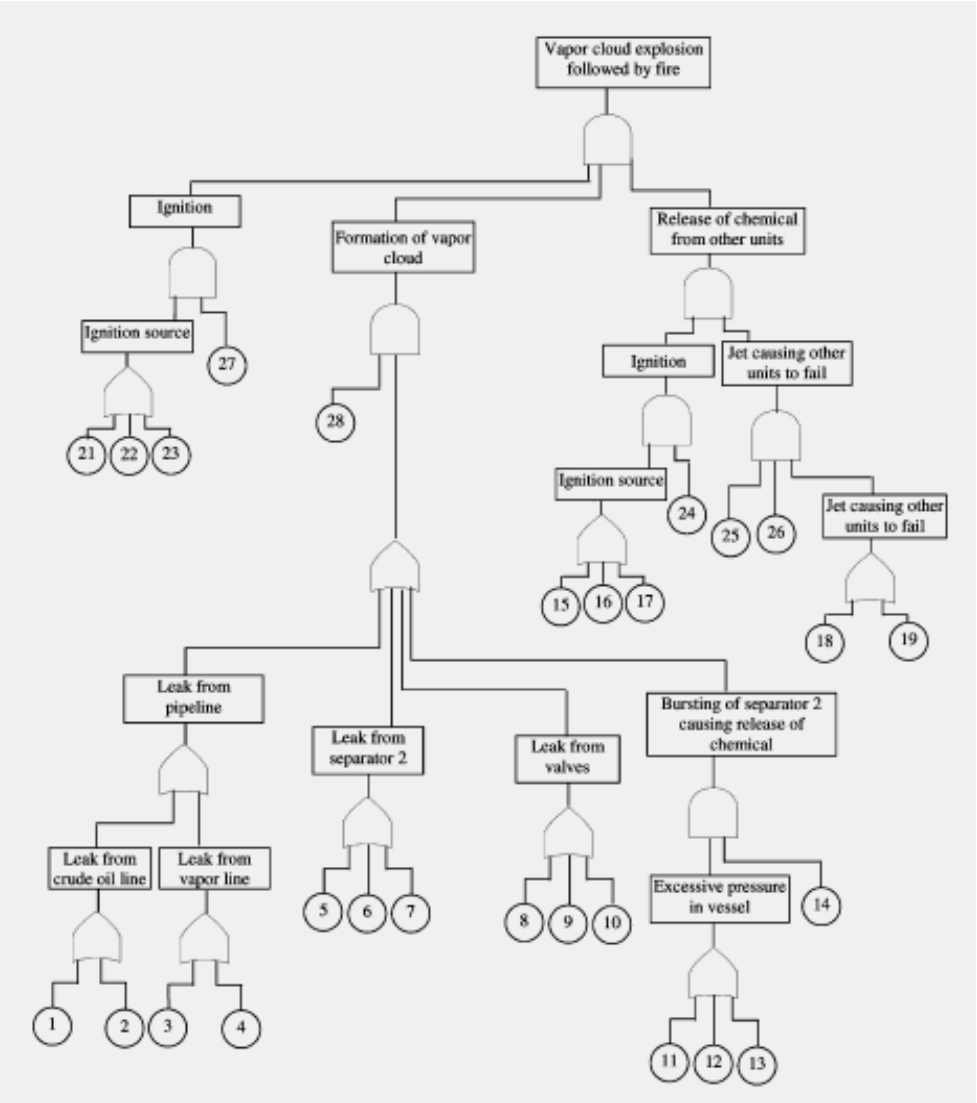

Figura 5.9 – Árvore de falha modificada para cenário 2 (acidente no separador 2), Fonte: Khan et al. (2002).

Pode-se perceber o aumento do número de eventos necessários para que se concretize o evento topo da árvore de falha descrita pela Figura 5.9, o segundo cenário catastrófico, o cenário 2. As mudanças devido à implementação do projeto de melhoria 2 resultaram em um maior controle na operação, fazendo com que seja necessário um maior número de falhas para que o evento catastrófico se materialize, de uma forma geral, isso faz com que a probabilidade de ocorrência do cenário catastrófico 2 seja menor para a instalação melhorada.

As árvores de falha dos demais eventos catastróficos podem ser encontradas em Khan et al. (2002), que apresenta estas árvores antes e depois dos projetos de melhoria, que foram omitidas, uma vez que a informação principal a ser considerada no trabalho são as

probabilidades de ocorrência dos cenários catastróficos obtidas através das árvores de falha, e não a seqüência de eventos que leva a materialização destes cenários.

Tabela 5.2 – Tabela das probabilidades de ocorrência dos cenários catastróficos em um ano, Adaptado de Khan et al. (2002)

Cenário (Estado da Natureza)	Probabilidade antes da melhoria na unidade	Probabilidade depois da melhoria na unidade
C0	0,9844930690	0,9999985423
C1	0,0000107000	0,0000000179
C2	0,0009474000	0,0000000155
C3	0,0136400000	0,0000013110
C4	0,0009060000	0,0000000786
C5	0,0000028310	0,0000000347

A Tabela 5.2 refere-se às chances de materialização dos cenários (estados da natureza), descritos anteriormente, ao longo de um ano. Observa-se claramente que há forte redução nas probabilidades de ocorrência dos cenários catastróficos, contudo, esta informação não é suficiente para que nenhuma decisão seja tomada.

Considerando as ações descritas anteriormente na Tabela 5.1, observa-se que a probabilidade de ocorrência de um cenário catastrófico na instalação dependerá de quais projetos de melhoria foram escolhidos para ser implementados.

A Tabela 5.3 apresenta estas probabilidades para cada uma das alternativas de ação, é interessante observar na coluna referente à probabilidade do cenário 0 se manifestar durante o ano, que à medida que mais projetos são implementados esta probabilidade aumenta bastante, passando de 0,984493 para 0,999999.

Tabela 5.3 – Probabilidade dos estados da natureza dada a ação tomada

Alternativas	Ação	Prob. Cenário 0	Prob. Cenário 1	Prob. Cenário 2	Prob. Cenário 3	Prob. Cenário 4	Prob. Cenário 5
1	Nenhum	0,984493	0,0000107	0,000947	0,01364	0,000906	2,83E-06
2	Proj. 5	0,984496	0,0000107	0,000947	0,01364	0,000906	3,47E-08
3	Proj. 4	0,985399	0,0000107	0,000947	0,01364	7,86E-08	2,83E-06
4	Proj. 4 e 5	0,985402	0,0000107	0,000947	0,01364	7,86E-08	3,47E-08
5	Proj. 3	0,998132	0,0000107	0,000947	1,31E-06	0,000906	2,83E-06
6	Proj. 3 e 5	0,998135	0,0000107	0,000947	1,31E-06	0,000906	3,47E-08
7	Proj. 3 e 4	0,999038	0,0000107	0,000947	1,31E-06	7,86E-08	2,83E-06
8	Proj. 3, 4 e 5	0,99904	0,0000107	0,000947	1,31E-06	7,86E-08	3,47E-08
9	Proj. 2	0,98544	0,0000107	1,55E-08	0,01364	0,000906	2,83E-06
10	Proj. 2 e 5	0,985443	0,0000107	1,55E-08	0,01364	0,000906	3,47E-08
11	Proj. 2 e 4	0,986346	0,0000107	1,55E-08	0,01364	7,86E-08	2,83E-06
12	Proj. 2, 4 e 5	0,986349	0,0000107	1,55E-08	0,01364	7,86E-08	3,47E-08

13	Proj. 2 e 3	0,999079	0,0000107	1,55E-08	1,31E-06	0,000906	2,83E-06
14	Proj. 2, 3 e 5	0,999082	0,0000107	1,55E-08	1,31E-06	0,000906	3,47E-08
15	Proj. 2, 3 e 4	0,999985	0,0000107	1,55E-08	1,31E-06	7,86E-08	2,83E-06
16	Proj. 2, 3, 4 e 5	0,999988	0,0000107	1,55E-08	1,31E-06	7,86E-08	3,47E-08
17	Proj. 1	0,984504	1,79E-08	0,000947	0,01364	0,000906	2,83E-06
18	Proj. 1 e 5	0,984507	1,79E-08	0,000947	0,01364	0,000906	3,47E-08
19	Proj. 1 e 4	0,98541	1,79E-08	0,000947	0,01364	7,86E-08	2,83E-06
20	Proj. 1, 4 e 5	0,985412	1,79E-08	0,000947	0,01364	7,86E-08	3,47E-08
21	Proj. 1 e 3	0,998142	1,79E-08	0,000947	1,31E-06	0,000906	2,83E-06
22	Proj. 1, 3 e 5	0,998145	1,79E-08	0,000947	1,31E-06	0,000906	3,47E-08
23	Proj. 1, 3 e 4	0,999048	1,79E-08	0,000947	1,31E-06	7,86E-08	2,83E-06
24	Proj. 1, 3, 4 e 5	0,999051	1,79E-08	0,000947	1,31E-06	7,86E-08	3,47E-08
25	Proj. 1 e 2	0,985451	1,79E-08	1,55E-08	0,01364	0,000906	2,83E-06
26	Proj. 1, 2 e5	0,985454	1,79E-08	1,55E-08	0,01364	0,000906	3,47E-08
27	Proj. 1, 2 e 4	0,986357	1,79E-08	1,55E-08	0,01364	7,86E-08	2,83E-06
28	Proj. 1, 2, 4 e 5	0,98636	1,79E-08	1,55E-08	0,01364	7,86E-08	3,47E-08
29	Proj. 1, 2 e 3	0,99909	1,79E-08	1,55E-08	1,31E-06	0,000906	2,83E-06
30	Proj. 1, 2, 3 e 5	0,999093	1,79E-08	1,55E-08	1,31E-06	0,000906	3,47E-08
31	Proj. 1, 2, 3 e 4	0,999996	1,79E-08	1,55E-08	1,31E-06	7,86E-08	2,83E-06
32	todos	0,999999	1,79E-08	1,55E-08	1,31E-06	7,86E-08	3,47E-08

5.2.3 Descrição dos Critérios

Conforme apresentado no capítulo anterior, na Figura 4.4, é necessário escolher que abordagem será seguida. Para seguir uma abordagem VFT (Keeney, 1992), seria necessária a disposição de elementos que permitissem uma busca e elaboração de alternativas para satisfazer os objetivos para a solução do problema através de um processo criativo, custoso e que poderia demandar tempo acima do disponível para a tomada de decisão. Portanto, será utilizada nesta aplicação uma abordagem AFT (tradicional).

Avaliando o problema, observa-se claramente a existência de múltiplos objetivos, assim como na maioria dos problemas. Como critérios mais latentes observam-se os critérios relativos a perdas humanas, danos ambientais, perdas financeiras e o custo das alternativas.

Um critério, ou atributo como alguns autores preferem, pode ser compreendido como um indicador, um índice ou até mesmo uma função que permita estabelecer um julgamento de preferência entre as alternativas. A escolha dos critérios é fundamental para a validade dos resultados, eles servem como base para comparação, julgamento ou apreciação para o

processo de tomada de decisão, de forma que cada critério expressa com maior ou menor precisão as preferências de um agente de decisão com respeito a um determinado atributo.

Segundo Gomes et al. (2002) os critérios são os elementos-chave sobre os quais se constroem as preferências globais, portanto é necessário que se defina uma família coerente de critérios, assim, seja $F = \{g_1, g_2, \ldots g_j, \ldots g_n\}$ uma família de n critérios $(n > 1)$, definida por um conjunto de ações potenciais A. Logo, F associa a cada ação potencial A_i, n números $g_j(A_i)$, constituindo o vetor de performances de A.

Para que uma família de critérios F possa desempenhar adequadamente sua função de apoiar um processo decisório, estabelecendo preferências sobre um conjunto de ações potenciais, os três axiomas básicos de coerência precisam ser respeitados:

- **Axioma da exaustividade:** Segundo este axioma, a família de critérios deve possuir todos os pontos de vista julgados importantes, de forma que a quantidade de critérios deve ser completa e exaustiva, contendo todos os critérios julgados relevantes para a decisão final. No entanto estes critérios devem ser operacionais, permitindo o manuseio pelos algoritmos utilizados (GOMES et al., 2002).
- **Axioma da coesão:** A família de critérios deve ser legítima e consistente, representando de forma clara e correta o juízo de valores dos decisores e estar de acordo com o objetivo deles. De forma que as preferências parciais modeladas em cada critério devem estar de acordo com as preferências globais (GOMES et al., 2002).
- **Axioma da não-redundância:** A família de critérios não deve permitir a redundância, pois um aspecto abordado por um critério não poderá aparecer em outro critério. Para que os critérios possam apresentar independência é necessário evitar a contagem dupla (GOMES et al., 2002).

Estes três axiomas são levados em consideração durante o levantamento dos critérios, para que fosse constituída uma família coerente de critérios. Ao avaliar os critérios de custo das alternativas e das perdas financeiras, concluiu-se que as perdas financeiras poderiam ser desconsideradas como critério. Uma vez que a probabilidade de ocorrência dos cenários catastróficos é muito pequena, e pelo fato destas perdas estarem cobertas por seguro, este critério referente a perdas financeiras foi eliminado da família de critérios.

Contudo, mesmo sendo pequenas as probabilidades de catástrofes, tratando-se de vidas humanas e de danos ambientais, o fato de haver a possibilidade é suficiente para que haja uma preocupação em torno destes fatores de risco, sendo assim considerados os objetivos de redução de risco a vidas humanas, redução de riscos de danos ambientais e o custo das alternativas.

5.2.4 Descrição das Conseqüências

Apenas o cenário 0 (não há acidente) não oferece conseqüências com impactos negativos a serem minimizados, contudo, todos os demais cenários estão associados a conseqüências negativas que ocorrem em virtude do acidente na respectiva unidade do processo.

Todos os cenários catastróficos levam a ocorrência de incêndios, que podem seguir a ocorrência de uma explosão. Dependendo do que ocorre em cada um destes cenários, o grau de danos pode ser maior ou menor, portanto nesta seção serão discutidos estes danos causados pela ocorrência destes cenários.

A Tabela 5.4 apresenta as conseqüências dos impactos causados pelos acidentes, o grau de impacto destes acidentes é mensurado na literatura pelo raio afetado (em metros). Pode-se observar que são apresentados na Tabela 5.4 diversos várias colunas referentes ao raio afetado. Cada coluna se refere a uma dimensão considerada e à origem que causou a destruição.

Dentre estes cenários, apenas o cenário provocado pelo acidente nas unidades de compressão não resulta numa explosão. Todos os demais cenários levam à ocorrência de uma explosão.

Tabela 5.4 – Conseqüências dos impactos causados pelos acidentes, Adaptado de Khan et al. (2002)

		Danos pela pressão da explosão			Danos do Incêndio					
Cenário	Possíveis Acidentes	Raio (m) p/ 100% Destruição	Raio (m) p/ 100-50% Destruição	Raio (m) p/100-25% Destruição	Raio (m) p/ 100% Destruição	Raio (m) p/ 100-50% Destruição	Área sob Incêndio m2	Raio (m) p/100% Queimadura 3 grau	Raio (m) p/ 50% Queimadura 3 grau	Possibilidade de Vazamento de oleo
C1	Acidente no separador 1	61	93	138	230	288	79	333	428	sim
C2	Acidente no separador 2	53	74	86	34	55	265	69	78	sim
C3	Acidente nas unidades de compressão	0	0	0	24	35	792	44	57	remota
C4	Acidente no *flash drum*	23	35	47	25	42	358	56	77	sim
C5	Acidente no secador	36	55	81	73	92	79	106	136	sim

A magnitude da explosão é quantificada pelo grau de destruição em volta desta. Portanto, a primeira coluna amarela refere-se a um raio onde tudo é destruído, na segunda coluna, é apresentado um raio onde ocorre um grau de destruição de 50 a 100%, idem para a terceira coluna amarela, a Figura 5.10 ilustra o que essas três colunas amarelas da Tabela 5.4 significam.

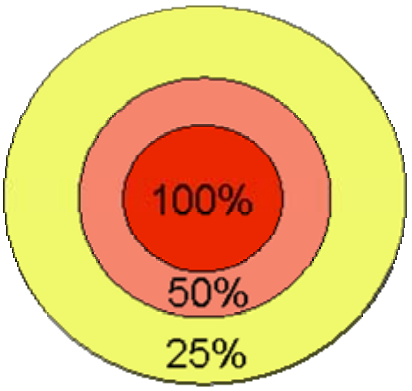

Figura 5.10 – Raio de destruição

De forma análoga, as colunas alaranjadas referem-se aos raios de destruição. Sendo as duas primeiras colunas alaranjadas referentes a destruição causada pelo incêndio, assim, para

analisar o grau de destruição, deve ser considerado o maior entre os raios causados pelo incêndio e pela explosão.

A terceira coluna alaranjada refere-se a área que provavelmente será tomada pelo incêndio, em alguns casos formada por um estágio conhecido por *pool fire*, proveniente do ao derramamento de fluido combustível. A quarta e a quinta coluna alaranjada dizem respeito ao raio no qual uma pessoa terá 100% ou até 50% do corpo queimado por queimaduras de terceiro grau.

A última coluna da Tabela 5.4 reflete o potencial de poluição ambiental devido a um vazamento proveniente do acidente. Em cenários onde ocorre o *pool fire*, verifica-se as grandes chances de ocorrência de derramamento no mar em virtude do líquido estar sendo derramado enquanto queima ao mesmo tempo, dificultando o trabalho para contenção deste líquido.

5.2.5 Função Utilidade para Conseqüência Humana

Cada alternativa de ação representará uma diferente instalação *offshore*, que por sua vez estará mais ou menos propensa à materialização dos cenários levantados. Portanto, a elicitação da utilidade que cada alternativa apresenta para um decisor deve considerar o valor das conseqüências humanas daqueles cenários que representam os estados da natureza, bem como as chances de materialização destes estados da natureza, tendo em vista a obtenção da utilidade de cada uma das alternativas de ação.

Para facilitar o procedimento de elicitação da utilidade dos cenários no que tange à dimensão de conseqüências humanas, foi considerada a materialização de todos os cenários, de forma que pudesse ser feita a elicitação através do procedimento de avaliação direta da utilidade destas conseqüências para o decisor ponto a ponto, uma vez que o número de cenários é pequeno. Além deste procedimento de avaliação direta ponto a ponto, outros procedimentos de elicitação de utilidade podem ser encontrados na literatura (KEENEY & RAIFFA, 1976; GOMES et al., 2002).

Antes da aplicação do questionário, é feita uma preparação para que o decisor possa compreender o procedimento, onde são explicados ao decisor alguns dos conceitos básicos da teoria da utilidade.

Baseado em sua experiência em instalações de plataformas *offshore*, em seu conhecimento sobre as possibilidades de fuga e protocolos de segurança o decisor responde a

um questionário referente à sua preferência entre o Cenário 0 (C0), Cenário 1 (C1), Cenário 2 (C2), Cenário 3 (C3), Cenário 4 (C4) e Cenário 5 (C5). Ao examinar estes cenários, o decisor avalia o potencial para conseqüências na dimensão humana de acordo com as informações na Tabela 5.4.

Um exemplo das perguntas a serem feitas no questionário, pode ser a que probabilidade (*p*) que o decisor estaria indiferente entre uma loteria composta pelo pior e pelo melhor cenário e um outro cenário ocorrendo com certeza? Este tipo de pergunta é descrito na literatura como a loteria representada pela Figura 5.11.

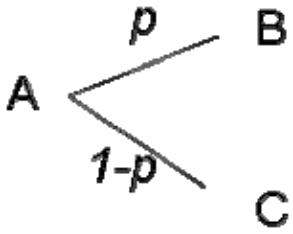

Figura 5.11 – Exemplo de loteria

Aplicando o questionário referente às preferências do decisor com relação aos cenários, são obtidos os valores da Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Utilidade para dimensão humana

Cenário / (Estado da Natureza)	Utilidade Dimensão Humana
C0	1
C1	0,52
C2	0,8
C3	0
C4	0,31
C5	0,73

Após a obtenção destas utilidades, é feita uma análise de consistência com o decisor, onde verifica-se além da consistência a concordância com os axiomas da teoria da utilidade.

O axioma da ordenabilidade ou completeza equivale a dizer que o decisor é capaz de estabelecer uma relação de preferência completa para todos os elementos aos quais se deseja obter sua preferência. Ou seja, quer dizer que o decisor é capaz de estabelecer um

ordenamento entre os elementos de interesse, atribuindo relações do tipo $P \succ Q$, $P \sim Q$ ou $Q \succ P$, o que respectivamente quer dizer que *P é preferível a Q, P é tão preferível quanto Q* ou *Q é preferível a P*.

O axioma da transitividade quer dizer que de acordo com as preferências do decisor, se *P é preferível a Q,* e *Q é preferível a R* então pode-se concluir através da transitividade que *P é preferível a R,* ou seja, se $P \succ Q$ e $Q \succ R$, então $P \succ R$. O mesmo raciocínio pode ser feito para a relação de indiferença.

Quanto ao axioma da substitutabilidade ou dominância, este quer dizer que uma extensão daquilo que o decisor prefere a uma condição relacionada à incerteza deve manter aquilo que o decisor afirmou preferir previamente, ou seja, se *P é preferível a Q* ($P \succ Q$), então qualquer que seja λ, dentro do intervalo $0 < \lambda \leq 1$ e um elemento *R*, assim como $P \succ Q$, $\lambda P + (1-\lambda)R \succ \lambda Q + (1-\lambda)R$, ou seja, a loteria *P com probabilidade* λ *e R com probabilidade* $(1-\lambda)$ é preferível a loteria *Q com probabilidade* λ *e R com probabilidade* $(1-\lambda)$. O mesmo raciocínio pode ser feito para a relação de indiferença.

O axioma da continuidade ou do arquimediano afirma a existência de um elemento intermediários, ou seja, a mesma propriedade verificada pelos números reais, onde entre dois números quaisquer sempre existirá um outro número real, isto é, se *x>y*, então existe *z* tal que *x>z>y*. Para a teoria da utilidade isto pode ser observado da seguinte forma, para *P, Q e R* existe a seguinte relação de preferência $P \succ Q \succ R$, *P é preferível a Q e Q é preferível a R.* Então, existem números λ e μ tais que $1 > \lambda > \mu > 0$ e tais que $\lambda P + (1-\lambda)R \succ Q \succ \mu P + (1-\mu)R$.

Portanto, uma vez que estes axiomas não são violados pelo decisor, esta função utilidade é válida.

A propriedade da linearidade para as funções utilidade quer dizer que $u[\lambda P + (1-\lambda)Q] = \lambda u(P) + (1-\lambda)u(Q)$. Ou seja, que a utilidade da loteria composta por *P* e *Q* é igual à utilidade esperada de *P* e *Q*.

Portanto, utilizando a propriedade da linearidade, calculou-se a utilidade esperada de cada alternativa para a dimensão humana, considerando as probabilidades dadas na Tabela 5.3, que refletem as probabilidades de ocorrência dos cenários C0, C1, C2, C3, C4 e C5 para cada uma das alternativas de ação, a utilidade de cada alternativa de ação será portanto a

utilidade da loteria composta pelos cenários C0, C1, C2, C3, C4 e C5 e suas respectivas probabilidades de ocorrência ao longo do ano, conforme Equação 5.1.

$$u_H(A_i) = u_H[P(C0)C0 + P(C1)C1 + P(C2)C2 + P(C3)C3 + P(C4)C4 + P(C5)C5] \quad \textbf{Equação 5.1}$$

Então, através da propriedade da linearidade, a utilidade das alternativas será obtida através da expressão Equação 5.2, que representa a utilidade da loteria em termos dos cenários C0, C1, C2, C3, C4 e C5.

$$\begin{aligned} u_H(A_i) = {} & P(C0)u_H(C0) + P(C1)u_H(C1) + P(C2)u_H(C2) \\ & + P(C3)u_H(C3) + P(C4)u_H(C4) + P(C5)u_H(C5) \end{aligned} \quad \textbf{Equação 5.2}$$

As utilidades para os cenários C0, C1, C2, C3, C4 e C5 foram obtidas conforme o procedimento descrito previamente e estas utilidades, apresentadas conforme Tabela 5.5.

A utilidade destas alternativas de ação é apresentada na Tabela 5.6, através da utilidade esperada para a dimensão humana, que representa a utilidade da loteria entre os cenários C0, C1, C2, C3, C4 e C5 dadas as respectivas probabilidades de ocorrência em cada alternativa de ação.

Tabela 5.6 – Utilidade esperada para dimensão humana

Alternativas	Ação	Utilidade esperada para dimensão humana
1	Nenhum	0,99513276
2	Proj. 5	0,99513388
3	Proj. 4	0,99559478
4	Proj. 4 e 5	0,9955959
5	Proj. 3	0,9988152
6	Proj. 3 e 5	0,99881632
7	Proj. 3 e 4	0,99927722
8	Proj. 3, 4 e 5	0,99927834
9	Proj. 2	0,9958433
10	Proj. 2 e 5	0,99584441
11	Proj. 2 e 4	0,99630532
12	Proj. 2, 4 e 5	0,99630643
13	Proj. 2 e 3	0,99952574
14	Proj. 2, 3 e 5	0,99952686
15	Proj. 2, 3 e 4	0,99998776
16	Proj. 2, 3, 4 e 5	0,99998888
17	Proj. 1	0,99514344

18	Proj. 1 e 5	0,99514456
19	Proj. 1 e 4	0,99560546
20	Proj. 1, 4 e 5	0,99560658
21	Proj. 1 e 3	0,99882589
22	Proj. 1, 3 e 5	0,998827
23	Proj. 1, 3 e 4	0,99928791
24	Proj. 1, 3, 4 e 5	0,99928902
25	Proj. 1 e 2	0,99585398
26	Proj. 1, 2 e5	0,9958551
27	Proj. 1, 2 e 4	0,996316
28	Proj. 1, 2, 4 e 5	0,99631712
29	Proj. 1, 2 e 3	0,99953642
30	Proj. 1, 2, 3 e 5	0,99953754
31	Proj. 1, 2, 3 e 4	0,99999844
32	todos	0,99999956

Conforme pode-se observar, os valores obtidos para a escala de utilidade das alternativas apresenta-se numa faixa de valores muito altos devido à elevada probabilidade de ocorrência do cenário C0, contudo, numericamente é possível perceber as diferenças de utilidade entre estas alternativas conforme será mostrado adiante.

Desta forma, pode ser observada a diferença entre as utilidades das alternativas, que variam de 0,99513275 a 0,999999562. É interessante observar que existe uma coerência no sentido em que quando nenhum projeto de melhoria é implementado, ou seja, nada é feito para reduzir as probabilidades de materialização dos eventos catastróficos o valor de utilidade desta alternativa assume o menor valor na escala, e quando todos os projetos de melhoria são implementados, ou seja, são executadas todas as possíveis ações para redução das probabilidades de materialização dos eventos catastróficos, o valor de utilidade assume o valor máximo.

5.2.6 Função Utilidade para Conseqüência Ambiental

Similarmente ao procedimento para elicitar a utilidade para as conseqüências na dimensão humana, é feito o procedimento com o decisor para elicitar as utilidades das conseqüências na dimensão ambiental.

Nesta dimensão, o decisor avalia baseado em sua experiência e em seu conhecimento sobre o funcionamento das instalações *offshore* e o grau de dano ambiental causado em virtude da materialização de algum dos cenários catastróficos descritos na seção 5.2.4.

Similarmente ao processo descrito na seção anterior, é efetuado um protocolo de elicitação da utilidade do decisor para as conseqüências descritas na seção 5.2.4 quanto a

materialização dos cenários catastróficos descritos para cada unidade do processo primário da unidade *offshore.*

Tabela 5.7 – Utilidade para dimensão ambiental

Cenário / (Estado da Natureza)	Utilidade Dimensão Ambiental
C0	1
C1	0,4
C2	0,2
C3	0,7
C4	0
C5	0,4

Portanto, como resultado do protocolo de elicitação das utilidades do decisor, obtém-se a Tabela 5.7, que apresenta a utilidade na dimensão ambiental para cada cenário.

Identicamente à seção anterior, é efetuada uma análise de consistência, onde são verificados os axiomas da teoria da utilidade nas preferências do decisor, que avalia de acordo com cada cenário as possíveis conseqüências ambientais destas catástrofes, onde obviamente, o cenário mais preferido é aquele onde não ocorre nenhuma catástrofe ao longo do ano. As conseqüências ambientais consideradas mais severas foram as resultantes da materialização do Cenário 4, onde há acidente no *flash drum* ao meio ambiente, que apresenta grande potencial de derramamento de óleo resultante do cenário de explosões seguido de *pool fire*.

Devido à incerteza quanto a materialização dos cenários, é necessário fazer um procedimento idêntico ao feito para a utilidade na dimensão humana, onde foi calculada a utilidade esperada para a loteria de cenários referente à cada uma das alternativas de ação.

Dessa forma, a Tabela 5.8 apresenta os valores calculados para as utilidades das alternativas de ação na dimensão ambiental.

Tabela 5.8 – Utilidade esperada para a dimensão ambiental

Alternativas	Ação	Utilidade esperada para dimensão ambiental
1	Nenhum	0,994236
2	Proj. 5	0,994238
3	Proj. 4	0,995142
4	Proj. 4 e 5	0,995144
5	Proj. 3	0,998328
6	Proj. 3 e 5	0,998329
7	Proj. 3 e 4	0,999233

8	Proj. 3, 4 e 5	0,999235
9	Proj. 2	0,994994
10	Proj. 2 e 5	0,994996
11	Proj. 2 e 4	0,9959
12	Proj. 2, 4 e 5	0,995901
13	Proj. 2 e 3	0,999085
14	Proj. 2, 3 e 5	0,999087
15	Proj. 2, 3 e 4	0,999991
16	Proj. 2, 3, 4 e 5	0,999993
17	Proj. 1	0,994242
18	Proj. 1 e 5	0,994244
19	Proj. 1 e 4	0,995148
20	Proj. 1, 4 e 5	0,99515
21	Proj. 1 e 3	0,998334
22	Proj. 1, 3 e 5	0,998336
23	Proj. 1, 3 e 4	0,99924
24	Proj. 1, 3, 4 e 5	0,999242
25	Proj. 1 e 2	0,995
26	Proj. 1, 2 e5	0,995002
27	Proj. 1, 2 e 4	0,995906
28	Proj. 1, 2, 4 e 5	0,995908
29	Proj. 1, 2 e 3	0,999092
30	Proj. 1, 2, 3 e 5	0,999094
31	Proj. 1, 2, 3 e 4	0,999998
32	todos	0,999999

Assim como na utilidade para a dimensão humana, as utilidades das alternativas para a dimensão ambiental assumem valores muito altos, devido a elevada probabilidade de ocorrência do Cenário 0 (nenhuma catástrofe ocorre ao longo do ano).

5.2.7 Função Utilidade para Custo das Alternativas

Foi assumido como verdadeira a hipótese sobre a neutralidade a risco do decisor quanto a dimensão financeira. A conclusão disto é que a função utilidade a ser assumida para os custos de implementação dos projetos de melhoria pode ser uma função de utilidade linear, que representa o comportamento de neutralidade a risco.

Considerando a hipótese de que o comportamento da indústria petrolífera no que diz respeito a investimentos de melhoria para redução de acidentes é neutro a riscos, ou seja, não há hesitação (aversão a risco) no que tange ao gasto financeiro para melhoria das instalações e redução de riscos. Isto pode ser validado, pois não se verifica o comportamento de propensão ao gasto financeiro uma vez que não sejam evidentes as compensações destes gastos, afinal para uma empresa que possui uma visão de lucros, quaisquer investimentos que não sejam traduzidos em termos de compensações necessárias são evitados, portanto verifica-se que seja

verossímil considerar que não há propensão a riscos. Portanto, foi elicitada uma função de utilidade linear para dinheiro para representar a dimensão do custo das alternativas de ação. Os resultados deste processo de elicitação são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Utilidade para o custo das alternativas

Alternativas	Ação	Utilidade linear para o custo das alternativas
1	Nenhum	1,00
2	Proj. 5	0,83
3	Proj. 4	0,87
4	Proj. 4 e 5	0,70
5	Proj. 3	0,93
6	Proj. 3 e 5	0,77
7	Proj. 3 e 4	0,80
8	Proj. 3, 4 e 5	0,63
9	Proj. 2	0,70
10	Proj. 2 e 5	0,53
11	Proj. 2 e 4	0,57
12	Proj. 2, 4 e 5	0,40
13	Proj. 2 e 3	0,63
14	Proj. 2, 3 e 5	0,47
15	Proj. 2, 3 e 4	0,50
16	Proj. 2, 3, 4 e 5	0,33
17	Proj. 1	0,67
18	Proj. 1 e 5	0,50
19	Proj. 1 e 4	0,53
20	Proj. 1, 4 e 5	0,37
21	Proj. 1 e 3	0,60
22	Proj. 1, 3 e 5	0,43
23	Proj. 1, 3 e 4	0,47
24	Proj. 1, 3, 4 e 5	0,30
25	Proj. 1 e 2	0,37
26	Proj. 1, 2 e5	0,20
27	Proj. 1, 2 e 4	0,23
28	Proj. 1, 2, 4 e 5	0,07
29	Proj. 1, 2 e 3	0,30
30	Proj. 1, 2, 3 e 5	0,13
31	Proj. 1, 2, 3 e 4	0,17
32	todos	0,00

5.2.8 Utilidade Multiatributo

A grande maioria dos problemas de decisão diz respeito a questões com vários atributos que devem ser considerados na avaliação do problema. Na teoria da utilidade mutiatributo

observa-se uma abordagem que permite considerar múltiplos atributos na análise de um problema pela teoria da utilidade.

Portanto, o conceito central é a compensação, o decisor enfrenta o problema de compensar uma perda por não conseguir atingir plenamente um objetivo através de um ganho, ou aumento que deixa de ser alcançado para a satisfação de outro objetivo.

A forma como é feita esta compensação determinará a forma da função utilidade multiatributo. Keeney & Raiffa (1976) apresentam uma série de testes para escolher a forma mais adequada para representar a função utilidade multiatributo.

Esta função utilidade multiatributo é formada pelas funções de utilidade unidimensionais, ou seja, as utilidades que representam apenas um atributo, que são arranjadas numa expressão de forma a representar a função utilidade multiatributo (KEENEY & RAIFFA, 1976; GOMES et al, 2002).

Para determinar a forma da função de utilidade multiatributo, é necessário que algumas hipóteses sejam verificadas. A independência em utilidade é uma propriedade que possibilita melhor estruturação do problema para fins de análise de sensibilidade, pois a parametrização é obtida através de formas analíticas para a utilidade das conseqüências (KEENEY & RAIFFA, 1976; GOMES et al, 2002).

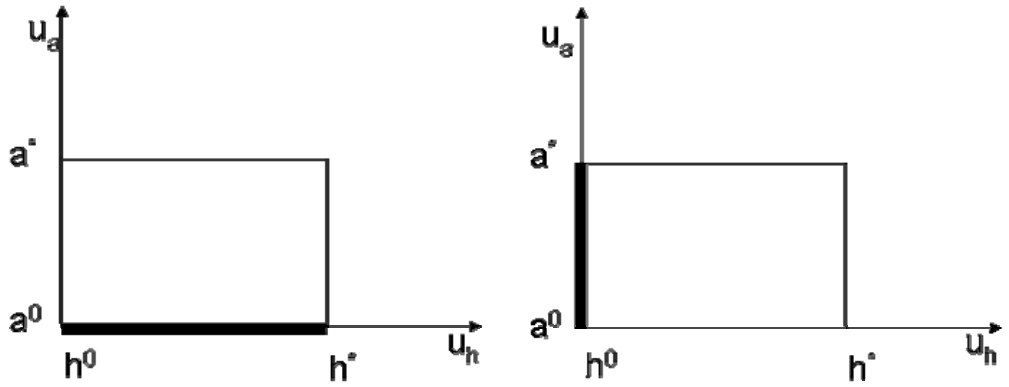

Figura 5.12 – Preferências para níveis de h dado a^0 e preferências para níveis de a dado h^0

Para testar a independência em utilidade para os atributos referentes às conseqüências ambientais, conseqüências humanas e para o custo referente às alternativas de ação, é necessário que seja avaliado o comportamento das preferências do decisor diante dos atributos considerados. O processo de avaliar a independência em utilidade do atributo ambiental em relação ao atributo humano consiste inicialmente em avaliar as preferências do decisor na linha escura, ou seja, em (h, a^0) e em (h^0, a), conforme Figura 5.12.

Esse processo corresponde a avaliar a utilidade unidimensional ambiental e humana, ou melhor, a utilidade condicional de *h* e de *a*, pois corresponde à utilidade de *h* condiciona da a $a=a^0$ e à utilidade de *a* condicionada a $h=h^0$. Uma vez que a utilidade unidimensional de *h* não se altera para diferentes níveis de *a* , pode-se afirmar que para este decisor, o atributo *h* é independente em utilidade do atributo *a*. Quando o mesmo se verifica para *a*, então pode-se afirmar que para este decisor observa-se a independência mútua em utilidade para os atributos *a* e *h*. Ao verificar as preferências do decisor, concluiu-se haver independência mútua em utilidade para os atributos das conseqüências ambientais e das conseqüências humanas.

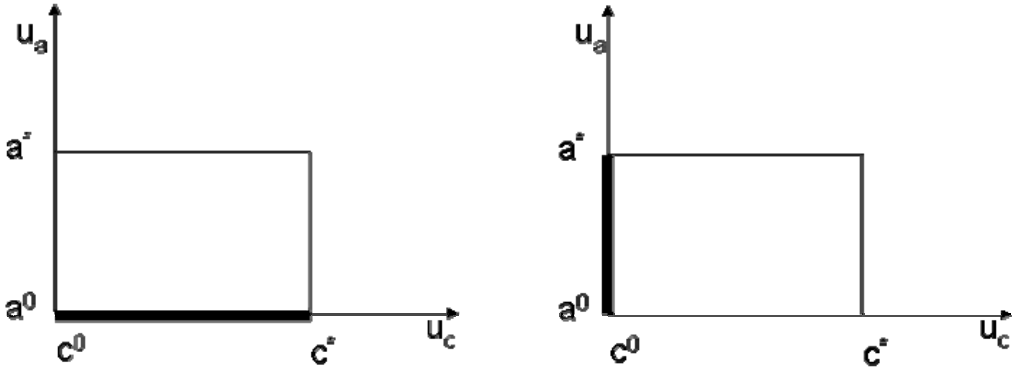

Figura 5.13 – Preferências para níveis de c dado a^0 e preferências para níveis de a dado c^0

Utilizando o mesmo procedimento, também é verificada a independência mútua em utilidade para os atributos das conseqüências ambientais e dos custos das alternativas (Figura 5.13) e para os atributos das conseqüências humanas e dos custos das alternativas (Figura 5.14).

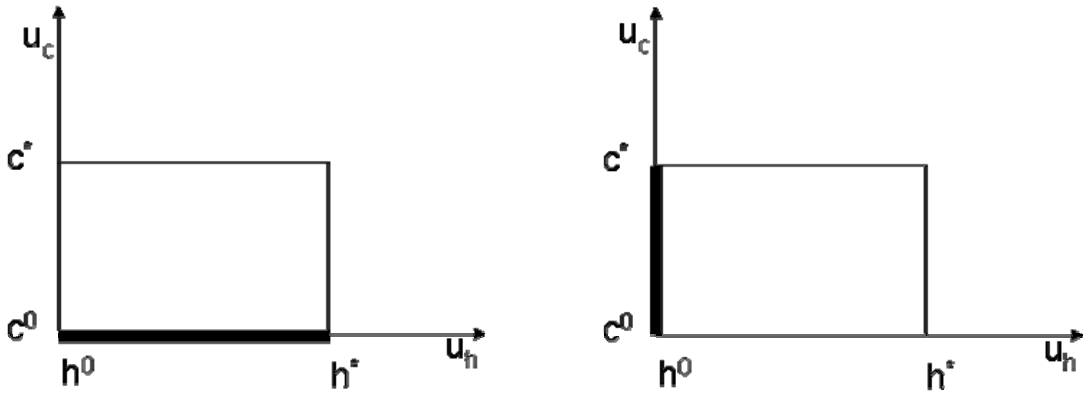

Figura 5.14 – Preferências para níveis de h dado c^0 e preferências para níveis de c dado h^0

A independência aditiva é outra propriedade que pode ser verificada para definir o formato da função de utilidade multiatributo (KEENEY & RAIFFA, 1976; GOMES et al, 2002). Para verificar esta propriedade, é necessário avaliar se os atributos são mutuamente independentes, visto isso, se para quaisquer pontos A, B e D, conforme a Figura 5.15, o decisor é indiferente às loterias representadas pela Figura 5.16.

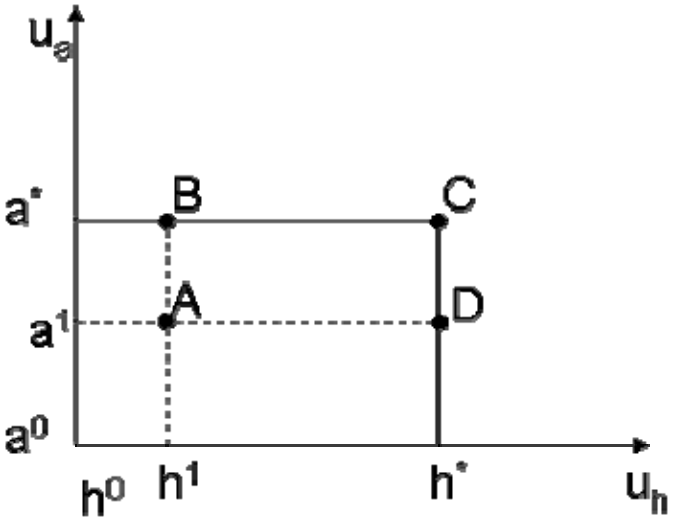

Figura 5.15 – Acessando a função u(h,a) quando a e u são mutuamente independentes em utilidade

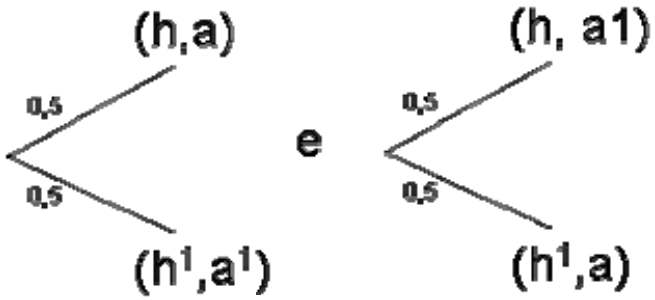

Figura 5.16 – Loterias igualmente preferíveis

Uma vez que estas condições são verificadas verdadeiras pelo decisor para todos os atributos, serão consideradas verdadeiras estas hipóteses (independência em utilidade e aditiva) para os atributos e será assumida a função de utilidade aditiva multiatributo, que assume o formato da Equação 5.3.

$$u(a,h,c) = k_1 u(a) + k_2 u(h) + k_3 u(c) \qquad \textbf{Equação 5.3}$$

A função de utilidade multiatributo linear é um dos formatos mais utilizados na aplicação da teoria da utilidade multiatributo, contudo, outro formato bastante utilizado é a função de utilidade multiatributo multilinear, que para três atributos assumiria a forma da Equação 5.4.

$$u(a,h,c) = k_1 u(a) + k_2 u(h) + k_3 u(c) + k_4 u(a)u(h) + k_5 u(a)u(c) + k_6 u(h)u(c) + k_7 u(a)u(h)u(c) \quad \textbf{Equação 5.4}$$

5.3 Resultados da Aplicação do Modelo

Para a aplicação do modelo, são elicitados do decisor os parâmetros a serem utilizados na função utilidade multiatributo aditiva. Para isso, são consideradas as utilidades unidimensionais já elicitadas em etapas anteriores do processo decisório.

Os parâmetros obtidos para o modelo, as constantes de escala, tem por objetivo representar o binômio importância do objetivo e a ancoragem de escala das avaliações das conseqüências na dimensão destes objetivos.

Como resultado disto, foi obtido um valor pequeno para a constante do objetivo custo. Isto ocorreu devido à maior dispersão das avaliações e a menor importância deste objetivo tendo em face os objetivos da minimização de riscos humanos e ambientais.

A elicitação dos parâmetros, k_1, k_2 *e* k_3 da função utilidade multiatributo é feita conforme o procedimento descrito em Keeney & Raiffa (1976). Os resultados obtidos da elicitação das constantes de escala são $k_1 = 0{,}49$ (ambiental), $k_2 = 0{,}5$ (humano) e $k_3 = 0{,}01$ (custo).

Obtendo-se estes parâmetros, a função utilidade multiatributo é representada pela Equação 5.5.

$$u(a,h,c) = 0{,}49_1 u(a) + 0{,}5u(h) + 0{,}01u(c) \quad \textbf{Equação 5.5}$$

5.3.1 Análise das Alternativas

Ao aplicar os resultados do modelo na avaliação das alternativas, pôde-se finalmente obter a utilidade multiatributo de cada alternativa, que reflete e representa o valor desta

alternativa em termos dos custos dos projetos de melhoria a serem investidos e da situação de riscos ambientais e humanos que a instalação passa a apresentar.

Estas utilidades são apresentadas na Tabela 5.10, onde a melhor alternativa sob essa perspectiva é a alternativa 5, que sugere a implementação do projeto de melhoria 3, referente às melhorias nas unidades de compressão.

Tabela 5.10 – Utilidade multiatributo das alternativas

Alternativas	Utilidade multiatributo da alternativa
5	0,997921
7	0,997263
6	0,996256
13	0,995648
8	0,995598
15	0,99499
1	0,994742
21	0,994597
3	0,994084
14	0,993983
23	0,993938
16	0,993324
2	0,993077
22	0,992931
9	0,992469
4	0,992418
29	0,992323
24	0,992273
11	0,99181
31	0,991665
17	0,991417
10	0,990803
19	0,990759
30	0,990658
12	0,990145
32	0,99
18	0,989752
25	0,989144
20	0,989093
27	0,988485
26	0,987479
28	0,98682

É interessante observar, que a unidade contemplada pela alternativa 5, as unidades de compressão, é uma das alterações que apresentam maiores reduções nas probabilidades de ocorrência do cenário catastrófico na unidade. O resultado aqui obtido é diferente do resultado

obtido por Khan et al (2002), que recomendavam alterações na unidade do separador de condensação, nas unidades de compressão e na unidade do *flash drum*.

Os resultados aqui obtidos refletem a consideração dos múltiplos objetivos, entre estes os custos de implementação das melhorias, não considerados por Khan et al (2002), que considerou apenas as reduções de probabilidade.

5.3.2 Análise de Sensibilidade

Para verificar a consistência e a robustez dos resultados obtidos, foi efetuada uma análise de sensibilidade para verificar se haviam alterações nos resultados.

Na análise de sensibilidade foram feitas variações de 10% em todos os parâmetros da função de utilidade multiatributo aditiva, mantendo-se em primeiro lugar a alternativa 5 para todas as variações nos parâmetros, ou seja, o projeto de melhoria das unidades de compressão que são associados ao Cenário 3.

5.3.3 Discussão de Resultados

Uma das vantagens do uso da teoria da utilidade multiatributo é a unidade de medida de risco fornecida pela utilidade das alternativas. Uma escala de razão é aquela escala na qual podem ser feitas operações aritméticas, portanto esta é a escala mais completa e sofisticada das escalas numéricas. Isto se dá devido à quantificação produzida a partir da identificação de um ponto zero que é fixo e absoluto, que representa de fato um ponto de nulidade, ausência e/ou mínimo, tais como numa escala de peso, distância ou de idade. Em uma escala de razão a unidade de medida é definida em termos da diferença entre o ponto zero e uma unidade conhecida. A escala obtida pela teoria da utilidade é uma escala intervalar, e portanto não podem ser feitas operações aritméticas dentro dos valores desta escala.

Numa escala intervalar é possível obter ordenações baseando-se nos valores da escala, contudo, há uma informação adicional que pode ser obtida desta escala que muitas vezes é negligenciada. Esta informação é referente a quanto valem exatamente as diferenças entre os objetos aos quais foram atribuídos valores nesta escala. Pelo fato de o zero não existir naturalmente numa escala intervalar e ser determinado arbitrariamente, não pode ser afirmado o quanto um objeto é melhor que outro baseando-se nesta categoria, mas pode-se avaliar o quanto a diferença entre dois objetos é maior que a diferença entre outros dois. Um exemplo clássico de uma grandeza medida numa escala intervalar é a temperatura, que pode ser medida em Celsius ou Fahrenheit, por exemplo, duas unidades onde o zero é determinado

arbitrariamente, que no caso da escala Celsius é o valor em que a água congela. A temperatura de 40 graus não é duas vezes maior que a temperatura de 20 graus, contudo, a diferença entre 40 graus e 20 graus é a mesma entre 60 graus e 40 graus.

Portanto ao utilizar a teoria da utilidade, não faz sentido estabelecer uma razão entre intensidades de preferência, pois a utilidade é dada numa escala intervalar. Contudo, faz sentido avaliar a razão entre as diferenças de preferência, tal como numa escala de temperatura, sendo esta uma grande vantagem da aplicação da teoria da utilidade multiatributo por fornecer esta informação de diferença entre as alternativas, que não pode ser observada em abordagens mais tradicionais, tal como aplicado por Khan et al (2002).

Na Tabela 5.11 são apresentadas estas diferenças de preferência entre as alternativas, onde são também apresentadas as razões entre as diferenças de preferência. Uma informação que pode ser obtida desta tabela é que a diferença da alternativa 5 para a alternativa 7 em relação a diferença entre a alternativa 7 para a alternativa 1 é de quase 0,7 vezes. Já a diferença da alternativa 7 para a alternativa 1 em relação a diferença da alternativa 1 para a alternativa 6 é de 1,65 vezes, e a diferença da alternativa 6 para a alternativa 13 em relação à diferença da alternativa 13 para a 8 é de quase 12 vezes.

Portanto, com o uso da teoria da utilidade multiatributo é possível medir o quanto a alternativa apontada como a melhor, difere-se da alternativa apontada como a melhor no estudo de Khan et al (2002) e esta, apontada como melhor por Khan et al (2002) difere-se das demais.

Tabela 5.11 – Avaliação das diferenças de preferência quanto às alternativas

Ranking	Alternativas	Diferença de utilidade (U_i-U_{i+1})	Razão da diferença de utilidade ((U_i-U_{i+1})/ (U_{i+1}-U_{i+2}))
1	5	0,000658422	0,653934
2	7	0,001006863	1,655833
3	6	0,000608071	12,07661
4	13	5,03511E-05	0,082805
5	8	0,000608071	2,454878
6	15	0,000247699	1,703865
7	1	0,000145375	0,283374
8	21	0,000513014	5,090641
9	3	0,000100776	2,257916
10	14	4,46323E-05	0,072716
11	23	0,00061379	2,478299
12	16	0,000247666	1,703245
13	2	0,000145408	0,314285
14	22	0,000462663	9,188731

15	9	5,03511E-05	0,529694
16	4	9,5057E-05	1,887884
17	29	5,03511E-05	0,108829
18	24	0,000462663	3,181822
19	11	0,000145408	0,587115
20	31	0,000247666	0,403502
21	17	0,00061379	13,75215
22	10	4,46323E-05	0,442886
23	19	0,000100776	0,196439
24	30	0,000513014	3,528096
25	12	0,000145408	0,587115
26	32	0,000247666	0,407297
27	18	0,000608071	12,07661
28	25	5,03511E-05	0,082805
29	20	0,000608071	0,603926
30	27	0,001006863	1,529207
31	26	0,000658422	-
32	28	-	-

5.4 Aplicação Considerando Função Utilidade para Custo com Propensão a Risco

Para contrapor esta posição de neutralidade a risco, foi sugerida a elicitação de uma função utilidade para dinheiro com propensão a risco, para efeito de simulação, visando ilustrar o comportamento de uma empresa que prefere não arriscar reduzindo este tipo de gastos, colocando como meta maior a redução de custos.

Para isto, o formato de função utilidade escolhido para representar este tipo de comportamento foi o de uma função exponencial, conforme a Equação 5.6 que está ilustrada na Figura 5.17, que resultou na recomendação da alternativa 7, uma alternativa com maior custo, pois refere-se à implementação de dois projetos, referentes às unidades de compressão e ao *flash drum*. Onde a diferença da alternativa 7 para a alternativa 5 em relação à diferença da alternativa 5 para 13 é de 2,27 vezes.

$$u(c) = e^{-0,01c}$$ **Equação 5.6**

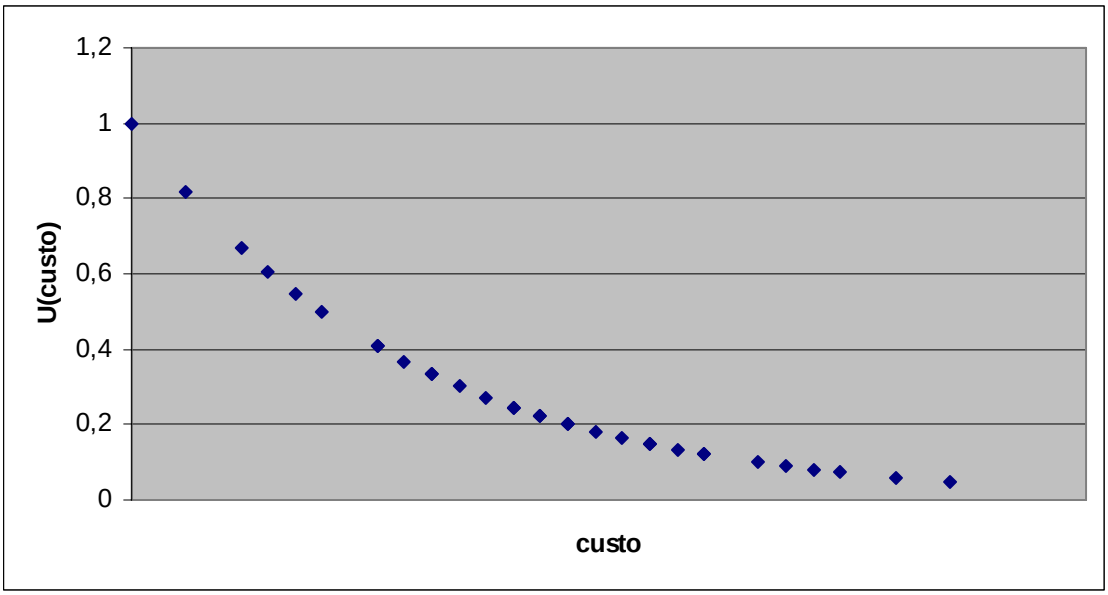

Figura 5.17 - Gráfico da função de utilidade propensa a risco para o custo.

Também é interessante observar que a alternativa 1, não implementar nenhum projeto de melhoria, cai da sétima posição no ranking que considera neutralidade a riscos na dimensão custo para a décima sexta posição no ranking que considera propensão a risco na dimensão custo.

Tabela 5.12 – Utilidade multiatributo das alternativas considerando propensão a risco para o custo

Alternativas	Utilidade multiatributo da alternativa considerando propensão a risco para o custo
7	0,998852
5	0,998477
13	0,998313
8	0,998262
15	0,998249
6	0,998083
21	0,997437
14	0,99734
23	0,997295
16	0,996797
22	0,996361
29	0,99574
24	0,99569
3	0,995171
11	0,994809
1	0,994742
9	0,994739

4	0,994688
2	0,994419
31	0,994407
10	0,993942
19	0,993898
17	0,993891
12	0,99362
30	0,993093
18	0,993011
25	0,992634
20	0,992584
27	0,991665
26	0,990467
32	0,990457
28	0,988431

5.5 Vantagens do uso de MAUT para avaliar riscos

Observando o procedimento executado para decisão sob riscos e a análise dos resultados são visíveis os benefícios da aplicação da teoria da utilidade multiatributo para tomada de decisão e avaliação de riscos.

O uso da teoria da utilidade multiatributo permite avaliar o risco dentro das dimensões consideradas, permitindo também avaliar o comportamento do decisor perante os riscos. Afinal, de acordo com o comportamento deste, pode-se verificar através da função utilidade do decisor sua propensão ou aversão a riscos, que representam o quanto o decisor aceita dentro de sua estrutura de preferências correr ou não correr riscos e quantificar o quanto é que este decisor é propenso ou avesso a risco.

Utilizando esta abordagem é possível avaliar através do uso de loterias a tendência do decisor em relação a risco. Portanto, o comportamento das preferências do decisor em relação as loterias e seu equivalente certo definem seu perfil em relação a risco.

É interessante também observar que o comportamento do decisor quanto a risco pode mudar ao longo da escala de valor das conseqüências. Para dados níveis, o decisor pode ser propenso a risco, pois para aqueles níveis de conseqüência o decisor admite correr um risco maior, pois o valor das conseqüências naquele nível são aceitáveis dentro de determinadas proporções. A partir de determinados níveis isso pode se alterar, o decisor pode já não aceitar mais correr riscos em função no nível considerado para as conseqüências.

De acordo com Keeney & Raiffa (1976), um decisor é avesso a risco se sua função utilidade é côncava e propenso a risco se sua função utilidade é convexa. Portanto, um decisor pode ter uma função convexa até determinado nível de conseqüência, e a partir de certo nível ter a função utilidade côncava. Isto denota um comportamento propenso a risco para baixos valores de conseqüência e avesso a riscos para elevados valores de conseqüência. Para fazer um paralelo a este comportamento, tem-se as apostas em máquinas de caça níqueis, que mesmo sabendo que a utilidade esperada daquele jogo é nula devido às baixas probabilidades de ganhar, as pessoas jogam devido ao baixo valor representado pelas conseqüências de perder aquela moeda. No entanto, este mesmo decisor provavelmente não entraria no mesmo jogo caso o valor a ser apostado fosse igual ao seu salário mensal, pois neste caso o valor representado pelas conseqüências é bastante representativo.

Portanto, geralmente existem faixas para as quais um decisor é propenso ou avesso a riscos, e o uso de função utilidade permite explicitar essas características dos decisores através de uma medida de aversão a riscos. Esta medida é representada pela Equação 5.7, que representa uma medida local de aversão a risco para este nível *x* de conseqüências.

$$r(x) \equiv -\frac{u''(x)}{u'(x)} \qquad \textbf{Equação 5.7}$$

Assim, dentro de um problema que considere a análise de riscos, como o apresentado neste trabalho, diferentes estilos gerenciais podem apresentar diferentes comportamentos quanto a riscos, ou até, num caso mais amplo de decisão em grupo que envolva diversos atores do processo decisório, tais como sindicato dos trabalhadores da operação *offshore*, ministério do trabalho e direção da empresa por exemplo, poder-se-ia esperar que a representação dos trabalhadores apresente uma maior aversão a risco que a direção da empresa no que diz respeito ao atributo de conseqüências humanas, e comportamento oposto no que diz respeito à conseqüências financeiras, por exemplo.

Diferentemente de muitas abordagens encontradas na literatura, que apenas consideram as probabilidades de ocorrência dos acidentes, percebe-se a clara contribuição do emprego da teoria da utilidade para a avaliação de riscos, permitindo incorporar aos valores de probabilidade o julgamento de valor humano, que pode fazer grande diferença em virtude do comportamento do decisor no que tange às suas preferências e seu comportamento a risco.

Na análise de riscos ambientais é clara a diferença entre o comportamento dos seres humanos quanto a risco, grupos de pessoas avessas a riscos na dimensão ambiental apresentam uma atitude que reflete este comportamento, ao procurar por alternativas que ofereçam menores riscos ambientais, mesmo que estas alternativas apresentem em contra partida custos mais elevados ou condições de conforto reduzido.

O uso da teoria da utilidade para medir impactos ambientais permite quantificar essa dimensão em termos daquilo que o julgamento humano de valor considera aceitável ou não dentro de uma racionalidade baseada nas conseqüências referentes a estes impactos.

Quanto à dimensão de conseqüências humanas, as vantagens do uso da teoria da utilidade mostram-se mais evidentes. O contraste com o tradicional critério ALARP (MELCHERS & STEWART, 1993) utilizado na literatura de análise de riscos é evidente, o critério ALARP é feito baseado de acordo com normas que variam de país para país e apenas relacionam níveis de probabilidade de fatalidades por ano referentes a diversas atividades, de forma a estabelecer uma faixa para a qual as fatalidades são toleráveis. Contudo, os níveis de tolerância dos indivíduos ao risco de morte não pode ser definido de forma simplória através de faixas, pois as pessoas apresentam níveis de aversão ou propensão a riscos diferentes. Por exemplo, pessoas que praticam esportes radicais, alpinismo sem o suporte de oxigênio, manobras perigosas no trânsito e corredores de fórmula 1 apesar de terem um comportamento propenso ao risco de morte, estes possuem distintos graus de propensão ao risco, considerando os avessos a risco, pode-se observar o exemplo de um casal que evita viajar de avião ao mesmo tempo com o objetivo de reduzir a probabilidade de deixar seus filhos órfãos. Fica óbvio que além de avessos a risco, estes dois possuem um comportamento particular no que diz respeito à tolerância ao risco de morte. Portanto, fica óbvio que não só há diferença de tolerância ao risco de morte entre os propensos e os avessos a risco, como também há diferença de tolerância entre os elementos desses grupos, que apesar de se exporem ao risco como um corredor de formula 1, este conta também com sua habilidade, o que pode fazê-lo correr um “risco de morte controlado”.

Para quantificar essa diferença entre os níveis de tolerância ao risco, a teoria da utilidade permite que seja avaliado o grau de aversão a risco através de um indicador de aversão a risco, já apresentado na Equação 5.7, ficando clara a riqueza da abordagem da teoria da utilidade sobre conseqüências na dimensão humana sobre o critério ALARP, que pode ser utilizado para adequação às normas de segurança adotadas no país, ou simplesmente para

satisfazer uma questão burocrática da explicitação do critério utilizado para tolerar as taxas de fatalidade admitidas, mas não para quantificar a tolerância ao risco de morte vista a pobreza desta abordagem.

Ao final da análise, o escore de utilidade permite avaliar a diferença de atratividade entre as alternativas, permitindo ter uma noção da diferença de risco oferecida pelas alternativas.

5.6 Considerando uma Racionalidade Não Compensatória

Para ilustrar a utilização de uma abordagem não-compensatória para este mesmo problema, serão discutidos os resultados da aplicação do método ELECTRE I, que se refere à problemática de escolha, tal como o problema em questão.

Nos métodos ELECTRE a relação de preferência sobre as alternativas é constituída por uma relação de sobreclassificação, determinada pelos Índices de Concordância (IC, *C(a,b)*) e de Discordância (ID, *D(a,b)*). O primeiro descreve a crença de que *a* sobreclassifica *b*, e o segundo a crença de que a alternativa *a* é sobreclassificada pela alternativa *b* (ROY, 1996; VINCKE, 1992; BELTON & STEWART, 2002).

O procedimento de escolha da alternativa mais preferida no ELECTRE I ocorre através da determinação do conjunto KERNEL, composto pelas alternativas que não são sobreclassificadas e que sobreclassificam alguma outra alternativa, e estas alternativas pertencentes ao KERNEL são consideradas incomparáveis (BELTON & STEWART, 2002).

A vantagem de aplicar o ELECTRE I a este problema em particular, é a possibilidade de estabelecer limites de veto, que são representados pelos parâmetros *p* e *q*. Dessa forma, ocorre uma relação de sobreclassificação se $C(a,b) \geq p$ e se $D(a,b) \leq q$, então é dito que *a* sobreclassifica *b*.

Várias expressões vem sendo utilizadas na literatura para o cálculo do IC, contudo, neste trabalho será utilizada a expressão apresentada por Belton & Stewart (2002), conforme a Equação 5.8, onde $Q(a,b)$ representa o subconjunto dos critérios nos quais *a* é pelo menos tão preferível quanto *b* e w_i representa o valor dos pesos destes critérios, e w_j os pesos de todos os critérios.

$$C(a,b) = \frac{\sum_{i \in Q(a,b)} w_i}{\sum_{j=1}^{m} w_j}$$ **Equação 5.8**

Para o ID utilizou-se também a expressão adotada por Belton & Stewart (2002), conforme a Equação 5.9, onde $R(a,b)$ é o subconjunto dos critérios onde *b* é estritamente preferível a *a*, *A* é o conjunto de alternativas e $z_i(a)$ é o valor da avaliação de *a* no critério *i*.

$$D(a,b) = \frac{\max_{i \in R(a,b)} [w_i (z_i(b) - z_i(a))]}{\max_{j=1}^{m} \max_{c,d \in A} [w_j \mid z_j(c) - z_j(d) \mid]}$$ **Equação 5.9**

Na literatura podem ser encontrados alguns trabalhos que utilizam a teoria da utilidade para prover avaliações intra-critério a serem utilizadas em métodos ELECTRE, tais como Almeida (2002), Almeida (2005) e Brito (2007). Isso é possível, pois a teoria da utilidade oferece uma medida de escala intervalar, que possui uma cardinalidade fraca e pelo método ELECTRE utilizar uma abordagem não-compensatória para a agregação dos objetivos, o uso desta medida como avaliação intra-critério é viabilizado pela abordagem de coalizão de votos utilizada no ELECTRE, que permite inclusive o uso de uma escala ordinal de avaliação inter-critério (VINCKE, 1992; ROY, 1996; BELTON & STEWART, 2002).

Tabela 5.13 – Utilidades unidimensionais das alternativas

Alternativas	Ação (projetos a implementar)	Utilidade esperada para dimensão humana	Utilidade esperada para dimensão ambiental	Utilidade linear para o custo das alternativas
1	Nenhum	0,99513276	0,994236	1,00
2	Proj. 5	0,99513388	0,994238	0,83
3	Proj. 4	0,99559478	0,995142	0,87
4	Proj. 4 e 5	0,9955959	0,995144	0,70
5	Proj. 3	0,9988152	0,998328	0,93
6	Proj. 3 e 5	0,99881632	0,998329	0,77
7	Proj. 3 e 4	0,99927722	0,999233	0,80
8	Proj. 3, 4 e 5	0,99927834	0,999235	0,63
9	Proj. 2	0,9958433	0,994994	0,70
10	Proj. 2 e 5	0,99584441	0,994996	0,53
11	Proj. 2 e 4	0,99630532	0,9959	0,57
12	Proj. 2, 4 e 5	0,99630643	0,995901	0,40

13	Proj. 2 e 3	0,99952574	0,999085	0,63
14	Proj. 2, 3 e 5	0,99952686	0,999087	0,47
15	Proj. 2, 3 e 4	0,99998776	0,999991	0,50
16	Proj. 2, 3, 4 e 5	0,99998888	0,999993	0,33
17	Proj. 1	0,99514344	0,994242	0,67
18	Proj. 1 e 5	0,99514456	0,994244	0,50
19	Proj. 1 e 4	0,99560546	0,995148	0,53
20	Proj. 1, 4 e 5	0,99560658	0,99515	0,37
21	Proj. 1 e 3	0,99882589	0,998334	0,60
22	Proj. 1, 3 e 5	0,998827	0,998336	0,43
23	Proj. 1, 3 e 4	0,99928791	0,99924	0,47
24	Proj. 1, 3, 4 e 5	0,99928902	0,999242	0,30
25	Proj. 1 e 2	0,99585398	0,995	0,37
26	Proj. 1, 2 e5	0,9958551	0,995002	0,20
27	Proj. 1, 2 e 4	0,996316	0,995906	0,23
28	Proj. 1, 2, 4 e 5	0,99631712	0,995908	0,07
29	Proj. 1, 2 e 3	0,99953642	0,999092	0,30
30	Proj. 1, 2, 3 e 5	0,99953754	0,999094	0,13
31	Proj. 1, 2, 3 e 4	0,99999844	0,999998	0,17
32	todos	0,99999956	0,999999	0,00

É interessante observar que no método ELECTRE, os pesos referem-se a importância do critério, portanto, pode ser feita uma observação quanto à evolução do pensamento e da importância dada a estes critérios ao longo do tempo. Há pouco mais de um século, o custo seria o critério mais importante, senão o único a ser considerado (peso 1). Contudo, com o passar de algumas décadas, as relações humanas passaram a ter mais importância, então poderiam ser considerados custo e humano, este último com menor importância ainda. Com as mudanças que ocorreram no final do século XX, questões humanas e ambientais passaram a ter maior destaque, fazendo com que estas duas tenham maior importância que o custo.

Para o método ELECTRE, os pesos representam apenas a relação de importância dos critérios, portanto, os pesos normalizados a serem utilizados na aplicação do método ELECTRE I são: *0,19* para o custo, *0,45* para a dimensão humana e *0,36* para a dimensão ambiental. Estes pesos diferem daqueles utilizados na aplicação de MAUT devido às características particulares destas duas abordagens que levam a diferentes interpretações dos pesos. Os limiares *p* e *q* utilizados foram respectivamente *0,7* e *0,3*. Assim, foram obtidas as matrizes de concordância e discordância, conforme Tabela 5.14, Tabela 5.15, Tabela 5.16 e Tabela 5.17 apresentadas nas páginas a seguir.

Tabela 5.14 – Matriz de concordância

	Alternativas																			
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
1	-	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
2	0,818	-	0,000	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
3	0,818	1,000	-	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182	0,545	0,545	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	0,182	0,182
4	0,818	0,818	0,818	-	0,000	0,000	0,000	0,182	0,545	0,545	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	0,182	0,182
5	0,818	1,000	1,000	1,000	-	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000
6	0,818	0,818	0,818	1,000	0,818	-	0,000	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000
7	0,818	0,818	0,818	1,000	0,818	1,000	-	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,545	0,545	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000
8	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	-	0,818	1,000	1,000	1,000	0,545	0,545	0,182	0,182	0,818	1,000	1,000	1,000
9	0,818	0,818	0,455	0,636	0,000	0,000	0,000	0,182	-	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	0,636	0,636
10	0,818	0,818	0,455	0,455	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	-	0,000	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182	0,818	1,000	0,636	0,636
11	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	1,000	-	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182	0,818	1,000	1,000	1,000
12	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	-	0,000	0,000	0,000	0,182	0,818	0,818	0,818	1,000
13	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,455	0,636	0,818	1,000	1,000	1,000	-	0,182	0,182	0,182	0,818	1,000	1,000	1,000
14	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,455	0,455	0,818	0,818	0,818	1,000	0,818	-	0,000	0,182	0,818	0,818	0,818	1,000
15	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	1,000	0,818	1,000	-	0,182	0,818	1,000	0,818	1,000
16	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	-	0,818	0,818	0,818	0,818
17	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	-	0,182	0,182	0,182
18	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182	0,818	-	0,000	0,182
19	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,364	0,545	0,000	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182	0,818	1,000	-	0,182
20	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,364	0,364	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,182	0,818	0,818	0,818	-
21	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,818	1,000	1,000	1,000	0,000	0,182	0,182	0,182	0,818	1,000	1,000	1,000

22	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	1,000	0,000	0,000	0,000	0,182	0,818	0,818	0,818	1,000
23	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	1,000	0,364	0,545	0,000	0,182	0,818	0,818	0,818	1,000
24	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,364	0,364	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	0,818
25	0,818	0,818	0,455	0,455	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,182	0,818	0,818	0,455	0,636
26	0,818	0,818	0,455	0,455	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,455	0,455
27	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	0,818
28	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	0,818
29	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,455	0,455	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	0,818
30	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,455	0,455	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	0,818
31	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818
32	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818

Tabela 5.15 – Continuação da matriz de concordância

	Alternativas											
	21	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**
1	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
2	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
3	0,182	0,182	0,182	0,182	0,545	0,545	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
4	0,182	0,182	0,182	0,182	0,545	0,545	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
5	0,182	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182
6	0,182	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182
7	1,000	1,000	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,545	0,545	0,182	0,182
8	1,000	1,000	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,545	0,545	0,182	0,182
9	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
10	0,000	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182

11	0,000	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
12	0,000	0,000	0,000	0,182	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
13	1,000	1,000	0,636	0,636	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182
14	0,818	1,000	0,636	0,636	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182
15	0,818	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182
16	0,818	0,818	0,818	1,000	0,818	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182
17	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
18	0,000	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
19	0,000	0,182	0,182	0,182	0,545	0,545	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
20	0,000	0,000	0,000	0,182	0,545	0,545	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
21	-	0,182	0,182	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182
22	0,818	-	0,000	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,182	0,182	0,182	0,182
23	0,818	1,000	-	0,182	1,000	1,000	1,000	1,000	0,545	0,545	0,182	0,182
24	0,818	0,818	0,818	-	0,818	1,000	1,000	1,000	0,545	0,545	0,182	0,182
25	0,000	0,000	0,000	0,182	-	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
26	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	-	0,000	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182
27	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	1,000	-	0,182	0,000	0,182	0,182	0,182
28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,818	0,818	0,818	-	0,000	0,000	0,000	0,182
29	0,818	0,818	0,455	0,636	0,818	1,000	1,000	1,000	-	0,182	0,182	0,182
30	0,818	0,818	0,455	0,455	0,818	0,818	0,818	1,000	0,818	-	0,000	0,182
31	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	1,000	0,818	1,000	-	0,182
32	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	-

Tabela 5.16 – Matriz de discordância

	Alternativas																			
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
1	-	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006	0,000	0,000	0,001	0,001
2	0,167	-	0,033	0,001	0,100	0,004	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006	0,000	0,000	0,001	0,001
3	0,133	0,000	-	0,000	0,067	0,003	0,004	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,300	0,133	0,167	-	0,233	0,067	0,100	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,067	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,233	0,067	0,100	0,000	0,167	-	0,033	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,200	0,033	0,067	0,000	0,133	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,367	0,200	0,233	0,067	0,300	0,133	0,167	-	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,033	0,000	0,000	0,000
9	0,300	0,133	0,167	0,000	0,233	0,067	0,100	0,004	-	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,467	0,300	0,333	0,167	0,400	0,233	0,267	0,100	0,167	-	0,033	0,001	0,100	0,004	0,005	0,005	0,133	0,000	0,000	0,000
11	0,433	0,267	0,300	0,133	0,367	0,200	0,233	0,067	0,133	0,000	-	0,000	0,067	0,003	0,004	0,004	0,100	0,000	0,000	0,000
12	0,600	0,433	0,467	0,300	0,533	0,367	0,400	0,233	0,300	0,133	0,167	-	0,233	0,067	0,100	0,004	0,267	0,100	0,133	0,000
13	0,367	0,200	0,233	0,067	0,300	0,133	0,167	0,000	0,067	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,001	0,001	0,033	0,000	0,000	0,000
14	0,533	0,367	0,400	0,233	0,467	0,300	0,333	0,167	0,233	0,067	0,100	0,000	0,167	-	0,033	0,001	0,200	0,033	0,067	0,000
15	0,500	0,333	0,367	0,200	0,433	0,267	0,300	0,133	0,200	0,033	0,067	0,000	0,133	0,000	-	0,000	0,167	0,000	0,033	0,000
16	0,667	0,500	0,533	0,367	0,600	0,433	0,467	0,300	0,367	0,200	0,233	0,067	0,300	0,133	0,167	-	0,333	0,167	0,200	0,033
17	0,333	0,167	0,200	0,033	0,267	0,100	0,133	0,005	0,033	0,001	0,002	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006	-	0,000	0,001	0,001
18	0,500	0,333	0,367	0,200	0,433	0,267	0,300	0,133	0,200	0,033	0,067	0,002	0,133	0,005	0,006	0,006	0,167	-	0,033	0,001
19	0,467	0,300	0,333	0,167	0,400	0,233	0,267	0,100	0,167	0,000	0,033	0,001	0,100	0,004	0,005	0,005	0,133	0,000	-	0,000
20	0,633	0,467	0,500	0,333	0,567	0,400	0,433	0,267	0,333	0,167	0,200	0,033	0,267	0,100	0,133	0,005	0,300	0,133	0,167	-
21	0,400	0,233	0,267	0,100	0,333	0,167	0,200	0,033	0,100	0,000	0,000	0,000	0,033	0,001	0,002	0,002	0,067	0,000	0,000	0,000

22	0,567	0,400	0,433	0,267	0,500	0,333	0,367	0,200	0,267	0,100	0,133	0,000	0,200	0,033	0,067	0,002	0,233	0,067	0,100	0,000
23	0,533	0,367	0,400	0,233	0,467	0,300	0,333	0,167	0,233	0,067	0,100	0,000	0,167	0,000	0,033	0,001	0,200	0,033	0,067	0,000
24	0,700	0,533	0,567	0,400	0,633	0,467	0,500	0,333	0,400	0,233	0,267	0,100	0,333	0,167	0,200	0,033	0,367	0,200	0,233	0,067
25	0,633	0,467	0,500	0,333	0,567	0,400	0,433	0,267	0,333	0,167	0,200	0,033	0,267	0,100	0,133	0,005	0,300	0,133	0,167	0,000
26	0,800	0,633	0,667	0,500	0,733	0,567	0,600	0,433	0,500	0,333	0,367	0,200	0,433	0,267	0,300	0,133	0,467	0,300	0,333	0,167
27	0,767	0,600	0,633	0,467	0,700	0,533	0,567	0,400	0,467	0,300	0,333	0,167	0,400	0,233	0,267	0,100	0,433	0,267	0,300	0,133
28	0,933	0,767	0,800	0,633	0,867	0,700	0,733	0,567	0,633	0,467	0,500	0,333	0,567	0,400	0,433	0,267	0,600	0,433	0,467	0,300
29	0,700	0,533	0,567	0,400	0,633	0,467	0,500	0,333	0,400	0,233	0,267	0,100	0,333	0,167	0,200	0,033	0,367	0,200	0,233	0,067
30	0,867	0,700	0,733	0,567	0,800	0,633	0,667	0,500	0,567	0,400	0,433	0,267	0,500	0,333	0,367	0,200	0,533	0,367	0,400	0,233
31	0,833	0,667	0,700	0,533	0,767	0,600	0,633	0,467	0,533	0,367	0,400	0,233	0,467	0,300	0,333	0,167	0,500	0,333	0,367	0,200
32	1,000	0,833	0,867	0,700	0,933	0,767	0,800	0,633	0,700	0,533	0,567	0,400	0,633	0,467	0,500	0,333	0,667	0,500	0,533	0,367

Tabela 5.17 - Continuação da matriz de discordância

	21	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**
1	0,004	0,004	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006
2	0,004	0,004	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006
3	0,003	0,003	0,004	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005
4	0,003	0,003	0,004	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005
5	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002
6	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
9	0,003	0,003	0,004	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005
10	0,067	0,003	0,004	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005

11	0,033	0,003	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,004	0,004
12	0,200	0,033	0,067	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,004	0,004
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
14	0,133	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
15	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,267	0,100	0,133	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,004	0,004	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006
18	0,100	0,004	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006
19	0,067	0,003	0,004	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005
20	0,233	0,067	0,100	0,004	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005
21	-	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002
22	0,167	-	0,033	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002
23	0,133	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
24	0,300	0,133	0,167	-	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
25	0,233	0,067	0,100	0,004	-	0,000	0,001	0,001	0,004	0,004	0,005	0,005
26	0,400	0,233	0,267	0,100	0,167	-	0,033	0,001	0,100	0,004	0,005	0,005
27	0,367	0,200	0,233	0,067	0,133	0,000	-	0,000	0,067	0,003	0,004	0,004
28	0,533	0,367	0,400	0,233	0,300	0,133	0,167	-	0,233	0,067	0,100	0,004
29	0,300	0,133	0,167	0,000	0,067	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,001	0,001
30	0,467	0,300	0,333	0,167	0,233	0,067	0,100	0,000	0,167	-	0,033	0,001
31	0,433	0,267	0,300	0,133	0,200	0,033	0,067	0,000	0,133	0,000	-	0,000
32	0,600	0,433	0,467	0,300	0,367	0,200	0,233	0,067	0,300	0,133	0,167	-

5.6.1 Análise dos Resultados e Conclusões

Como resultado da aplicação do método ELECTRE I, foi obtido um Kernel com cinco alternativas, ou seja, alternativas a serem recomendadas para avaliação pelo decisor. Assim, as alternativas do Kernel são 32, 16, 13, 8 e 5. Entre estas alternativas não é possível estabelecer uma relação de preferência, portanto, o método ELECTRE I recomenda estas alternativas como candidatas a recomendação. Dentre estas alternativas, apenas a 32 não foi sobreclassificada por nenhuma alternativa, contudo, ela não sobreclassifica as alternativas 16, 13, 8 e 5, e como não há nenhuma outra alternativa no Kernel que sobreclassifique estas quatro alternativas, estas alternativas passam a fazer parte do Kernel.

Isto ocorre porque neste método não há a compensação inter-critério, fazendo com que o custo reduzido das outras alternativas não seja suficiente para compensar os índices mais elevados de risco humano e ambiental, obtendo-se assim alternativas que não seriam tão bem avaliadas caso fosse utilizada uma abordagem compensatória.

Quanto a robustez dos resultados, variando-se os parâmetros, apenas as alternativas 32 e 16 se mantêm no Kernel, demonstrando-se assim a diferença entre estes dois tipos de racionalidade (compensatória e não-compensatória).

6 MODELO DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE RISCOS EM GASODUTOS

Neste capítulo será contextualizado um problema e construído um modelo de decisão multicritério, conforme o *framework* apresentado no capítulo 4. Portanto, será contextualizado um problema a partir da análise para avaliação de riscos de trechos de um gasoduto apresentada por Brito & Almeida (2008), que apresentam uma análise multidimensional de risco para doze trechos de um gasoduto.

6.1 Contexto do Problema

Os gasodutos de transporte de gás são modais de transporte considerados econômicos, contudo, ao cortar regiões urbanas, industriais ou de uma reserva de proteção ambiental, por exemplo, estes oferecem um risco adicional a estas regiões e este risco deve ser avaliado criteriosamente e, portanto, ações de melhoria para redução dos riscos devem ser analisadas. O problema abordado por Brito & Almeida (2008) restringia-se à avaliação dos riscos dos trechos dos gasodutos, com o objetivo de obter uma relação entre o grau de risco que cada trecho gasoduto oferecia.

Assim, é evidente que é necessária uma análise freqüente de possíveis medidas para a redução de riscos, mesmo que já tenham sido atendidas as exigências das especificações técnicas, uma avaliação sobre o grau de propensão a riscos pode fazer com que se busque ultrapassar o simples atendimento das normas vigentes, buscando assim uma maior redução dos riscos associados.

O custo para a construção de um gasoduto pode variar bastante, e sendo muito difícil estimar um preço padrão para um quilômetro de gasoduto construído. Na licitação para a construção do gasoduto Recife-Caruaru em Pernambuco, foram orçados inicialmente R$ 95 milhões para a construção de 120 quilômetros de gasoduto, resultando em média em R$ 791 mil por quilometro de gasoduto. Durante a construção deste gasoduto, foram descobertas rochas a serem removidas de determinados trechos que não haviam sido previstas durante a etapa de orçamento, o que resultou num acréscimo de R$ 47 milhões de reais ao custo da obra (LICITAÇÃO, 2008; JORNAL DO COMMERCIO, 2008). Portanto, pode-se observar que os custos para construção de gasodutos podem ser um tanto quanto heterogêneos, a depender da região onde será construído cada trecho. No entanto, pode-se assumir a hipótese de que da

mesma forma em que o custo de construção dos gasodutos seja variável, as ações para redução de riscos também o serão, e sua implementação devem ser avaliada separadamente para cada trecho, uma vez que estes possuem níveis de risco diferenciado e custos diferenciados, se justificando assim a importância e a relevância deste problema.

Portanto, o problema a ser aqui abordado refere-se à avaliação e decisão quanto a alternativas para reduzir os riscos em gasodutos. Para simplificação deste tipo de análise, é comum na literatura dividir-se o gasoduto em trechos definidos a partir das particularidades e características comuns, referentes às variáveis técnicas (diâmetro, pressão e vazão) e à condições do ambiente externo, que se referem a localidade por onde o gasoduto passa, tal como a densidade populacional, densidade patrimonial a ser indenizada em caso de acidentes e densidade ambiental (fauna e flora) passível de destruição. Dessa forma, dentro de uma malha de distribuição de gás conforme a Figura 6.1, cada gasoduto pode ser dividido em trechos conforme as características particulares do trecho mencionadas anteriormente.

Figura 6.1 – Rede de gasoduto, Fonte: Copergás (2008).

6.2 Modelagem do Problema

O problema aqui é avaliar alternativas para redução dos riscos de cada trecho do gasoduto. Para isto, podem ser consideradas as dimensões de risco utilizadas por Brito & Almeida (2008), referentes ao risco de fatalidades humanas, risco de destruição ambiental e risco de perdas financeiras provenientes da destruição do patrimônio de terceiros, do lucro cessante da interrupção do fornecimento do gás e multas contratuais pela interrupção do fornecimento, por exemplo.

Uma vez que observada a existência do problema de decisão, é necessário avaliar a luz de qual paradigma será estruturado o problema. Para a modelagem do problema através do *framework* apresentado no Capítulo 4 serão avaliadas as possíveis alternativas e a formulação do problema de decisão.

Portanto, a estrutura do texto a seguir seguirá as etapas descritas no *framework* apresentado no Capítulo 4, que serão discutidas a seguir conforme as etapas de formulação e estruturação do problema.

6.2.1 Problemática e Identificação de Alternativas

Observando o contexto do problema, observa-se que se trata da escolha de uma alternativa que possa satisfatoriamente reduzir os riscos ao longo do gasoduto. Contudo, imagina-se que os objetivos do decisor para este problema não sejam apenas a redução de riscos. Portanto, das alternativas levantadas apenas uma será escolhida. O processo de identificação de alternativas corresponde a um processo onde são identificadas alternativas que possam representar uma recomendação para solucionar o problema.

Este processo de identificação de alternativas pode ser feito através de seminários para avaliação de possíveis soluções para o problema, a serem examinadas pelos setores de engenharia e análise de desempenho, de forma que se possa avaliar os possíveis custos das implementações destas alternativas e o desempenho destas em termos de redução das probabilidades das árvores de eventos / falhas que possam resultar em cenários catastróficos e / ou alterações nos mecanismos representados por estas árvores de forma a reduzir as probabilidades de ocorrência dos cenários catastróficos no trecho em que foi implementada a ação. A Figura 6.2 apresenta a árvore de eventos identificada por Sklavounos & Rigas (2006), adaptada posteriormente por Brito & Almeida (2008) para avaliação de riscos num gasoduto.

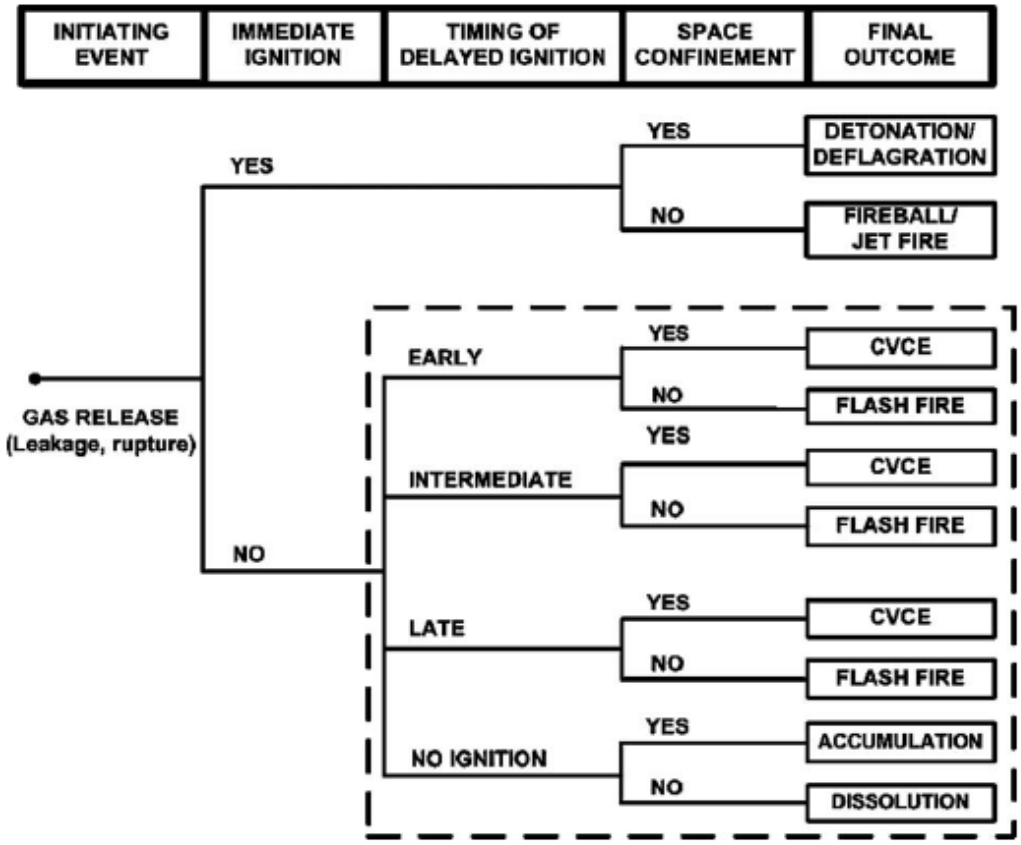

Figura 6.2 – Árvore de eventos de um vazamento acidental de gás, Fonte: Sklavounos & Rigas (2006).

Baseados nas probabilidades de materialização de cada um destes cenários catastróficos, Brito & Almeida (2008) avaliaram as conseqüências relativas a múltiplas dimensões de risco, sendo estas dimensões de perdas humanas, perdas ambientais e perdas financeiras sob um enfoque de teoria da decisão para cada um destes estados da natureza (cenário catastrófico). Portanto, o mesmo tipo de análise deve ser feita para avaliar o desempenho das alternativas a serem implementadas ao longo do gasoduto para redução de riscos, estimando as probabilidades referentes aos eventos desencadeadores de uma catástrofe.

Assim, como resultado deste processo, algumas classes de ações de melhoria podem levantadas. Poder-se-ia considerar então três classes de alternativas:

- Alteração na política de inspeção / manutenção do trecho.
- Implementação de dispositivos de controle, que alterariam as árvores de eventos / falhas que possam resultar em cenários catastróficos.
- Mudança do tipo de material utilizado no trecho, excedendo parâmetros exigidos pelas normas técnicas vigentes que resultem em maior segurança.

Considerando uma situação na qual há apenas uma ação de melhoria não dominada por trecho, as alternativas poderiam ser representadas por uma tabela similar à Tabela 5.1, com todas as combinações possíveis com relação a implementar ou não implementar a ação de melhoria de cada trecho, o que resulta em 2^n alternativas para *n* trechos de um gasoduto, por exemplo, para um gasoduto com 8 trechos ter-se-iam 256 alternativas. Contudo, o número de ações de melhoria não dominadas por trecho representará apenas o número de alternativas para aquele trecho, assim, caso o número de alternativas não dominadas difira entre os trechos, basta que sejam listadas todas as combinações possíveis de implementação de melhoria para todo o gasoduto, assim, o conjunto de alternativas resume-se à esta listagem de combinações.

6.2.2 Avaliação das Incertezas e dos Estados da Natureza

Para cada alternativa, devem ser levantadas as probabilidades a *priori* para a materialização dos estados da natureza, normalidade ou quando ocorre uma seqüência de eventos desencadeadora de um evento catastrófico, exemplificados na Figura 6.2. A diferença entre estas probabilidades a *priori* para a materialização dos eventos catastróficos é uma medida de desempenho tradicionalmente utilizada na literatura para avaliar a ação de melhoria. Como resultado disto, obtém-se uma tabela similar a Tabela 5.2 utilizada para construir uma tabela similar a Tabela 5.3.

Após a elaboração das alternativas para cada trecho, da definição dos estados da natureza e do cálculo das probabilidades relacionadas a cada um destes estados da natureza dada uma ação, para efeito de simplificação da análise, pode-se eliminar alternativas ineficientes, ou seja, aquelas que possuem redução inferior das probabilidades de materialização de catástrofes a um custo superior ao de outra alternativa, dessa forma, a eliminação de alternativas superadas.

6.2.3 Valoração

Nesta etapa, são avaliadas as aspirações do decisor quanto a solução desejada para este problema. Portanto, o decisor deve ser entrevistado para que sejam identificados os objetivos ou critérios que serão utilizados na avaliação das alternativas.

Para este problema específico, o decisor deseja encontrar uma solução para o problema de forma a minimizar as perdas humanas, minimizar as perdas ambientais, minimizar as

perdas financeiras e minimizar gastos adicionais, ou seja, maximizar as utilidades unidimensionais para cada uma destas dimensões.

A partir daí observa-se a existência de objetivos conflitantes, pois não é possível minimizar as perdas sem que sejam realizados gastos adicionais. Tendo em vista estes objetivos, o problema passa a ser estruturado de uma maneira que possa contemplar todas estas aspirações do decisor. Sabe-se previamente que dificilmente será encontrada uma alternativa que possa contemplar todas estas aspirações do decisor, levando à procura daquilo que represente uma solução de compromisso para o decisor, dadas as suas preferências sobre os objetivos.

Sob a ótica da otimização multiobjetivo, este problema assumiria a formulação da Equação 6.1, onde poderiam ser incluídas restrições no que diz respeito aos níveis mínimos que devem ser considerados para estes objetivos, tais como o critério ALARP para as perdas humanas, um limite superior a ser definido para as perdas ambientais e um limite da disponibilidade orçamentária, por exemplo.

$$
\begin{aligned}
&\max U(p_{hum} \mid a) \\
&\max U(p_{amb} \mid a) \\
&\max U(p_{fin} \mid a) \\
&\max U(C(a_i)) \\
&sa \\
&\quad p_{hum\,i} \le ALARP \qquad , \quad i = 1,..,n \\
&\quad p_{amb\,i} \le C_{amb} \\
&\quad \sum_{i=1}^{n} C(a_i) \le Orc
\end{aligned}
$$

Equação 6.1

Conforme a avaliação feita na seção 5.2.3 deve-se avaliar os axiomas de uma família coerente de critérios, de forma a agrupar os objetivos redundantes, de forma a simplificar a análise do problema ao longo do processo decisório. Posteriormente, devem ser elicitadas as funções de utilidade unidimensionais do decisor para a família coerente de critérios do decisor para este problema.

Portanto, de posse de todas alternativas para o gasoduto (todos os trechos) e dos objetivos a serem considerados, é necessário calcular os desempenhos de todas as alternativas para o gasoduto. A partir deste momento, o desempenho é medido em termos das utilidades

unidimensionais esperadas do decisor para todos os objetivos considerados. É importante salientar que independentemente da racionalidade do decisor quanto a forma de agregação dos objetivos, se compensatória ou não, as utilidades servem para agregar os aspectos probabilísticos, de preferência do decisor e seu comportamento a riscos.

Neste processo de valoração, é identificada também a hierarquia existente entre os objetivos do decisor. Neste caso, a hierarquia ofertará prioridade à minimização de perdas humanas, em segundo lugar à minimização de perdas financeiras, em terceiro lugar a minimização de perdas ambientais e em quarto lugar a minimização dos gastos adicionais. É importante atentar, que esta hierarquia representa apenas a importância destes objetivos para o decisor. Caso numa etapa posterior do processo decisório seja identificada uma racionalidade compensatória para este decisor, deve-se considerar os fatores relacionados às constantes de escala, que dizem respeito ao binômio importância do critério e a escala da avaliação unicritério, conforme mencionado anteriormente ao longo do trabalho.

Como última etapa do processo de valoração, identifica-se a racionalidade do decisor quanto à agregação de seus objetivos. Caso este aceite a troca entre ganhos em um objetivo e perdas em outro a título de compensação para o valor de uma alternativa, este decisor possui uma racionalidade compensatória, caso isto não ocorra o decisor possui uma racionalidade não-compensatória. A partir do momento que é identificada a racionalidade do decisor, deve-se optar por uma abordagem de agregação das preferências do decisor quanto aos seus objetivos. Portanto, devem ser observadas as considerações feitas na seção 4.4 para que seja escolhido o método mais adequado para a situação.

6.2.3.1 Assumindo a Hipótese de Racionalidade Compensatória

Assumindo esta hipótese, considera-se o caso particular onde pode ser assumida a hipótese de uma racionalidade compensatória, ou seja, é possível através de uma abordagem multicritério obter um critério único de síntese através de uma função de agregação de valor. Dessa forma, este problema também pode ser modelado como um problema do tipo saco mochila, considerando-se assim restrições, tais como as restrições da Equação 6.2, otimizando-se o critério único de síntese para escolha da alternativa a ser implementada.

$$\max \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{k_j} [U(a_{ji}=1) - U(a_{ji}=0)] a_{ji}$$

sa

$$p_{hum\,i} \le ALARP \quad , \quad i = 1,..,k_j \, , \, j = 1,..n$$
$$p_{amb\,i} \le C_{amb} \quad a_{ji} = 0,1 \qquad \textbf{Equação 6.2}$$
$$\sum_{i=1}^{n} C(a_i) \le Orc$$
$$\sum_{i=1}^{k_j} a_{ji} \le 1$$

No problema de otimização da Equação 6.2, são consideradas todas as k_j alternativas de melhoria para cada trecho *j* do gasoduto, das quais, será assumida a hipótese de que estas alternativas de melhoria são excludentes, ou seja, para cada trecho será admitida a implementação de apenas uma ação de melhoria, onde estas podem contemplar mudanças na política de manutenção, implementação de sistemas de controle, alteração nos materiais utilizados ao longo do trecho do gasoduto ou até uma combinação destas três classes de mudanças.

A função objetivo é composta por todas as melhorias de cada trecho, onde são avaliadas pelo incremento de utilidade proporcionado da implementação de cada alternativa. Portanto são avaliadas as vantagens da implementação destas alternativas em cada trecho para escolher o que deve ser implementado ao longo de todo o gasoduto.

No entanto, muitas vezes pode ser mais interessante utilizar algum método de apoio multicritério a decisão que atenda a esta racionalidade, tal como MAUT, SMARTS ou VIP, por fornecerem procedimentos estruturados para a elicitação dos parâmetros de modelagem e proverem resultados que permitem identificar uma relação de ordem ou simplesmente apontar a (s) melhor (es) alternativa (s) sem levar em conta as restrições.

Uma vez que podem ser enumeradas todas as combinações de alternativas de melhoria para cada trecho do gasoduto, o uso da teoria da utilidade multiatributo pode permitir avaliar as diferenças entre as alternativas, possibilitando avaliar também o relaxamento de alguma restrição, seguindo a estruturação proposta por Zeleny (1986) através do DeNovo Programming, ou simplesmente, escolher a alternativa viável com a melhor posição no ranking.

6.2.3.2 Assumindo a Hipóteses de Racionalidade Compensatória e de Apenas uma Alternativa Não-dominada para Redução de Riscos em Cada Trecho

Considerando o caso particular, onde existe apenas uma alternativa não-dominada para redução de riscos em cada trecho, há uma redução drástica no número de alternativas para o gasoduto como um todo, ou seja, apenas 2^n alternativas ou combinações de melhorias para serem implementadas num gasoduto com *n* trechos. Para um decisor que segue uma racionalidade compensatória, tem-se a modelagem do problema em termos da otimização de um problema de saco mochila com variáveis binárias, similarmente a um problema de portfólio. Portanto, neste caso são consideradas apenas *n* variáveis binárias.

$$\max \sum_{i=1}^{n} [U(a_i = 1) - U(a_i = 0)] a_i$$

$$sa$$

$$p_{hum\,i} \le ALARP \quad , \quad i = 1,..,n$$
$$p_{amb\,i} \le C_{amb} \quad a_i = 0,1$$
$$\sum_{i=1}^{n} C(a_i) \le Orc$$

Equação 6.3

Na Equação 6.3, os coeficientes da função objetivo são representados pelo incremento em utilidade multiatributo obtido pela implementação da ação de melhoria naquele trecho do gasoduto.

6.2.3.3 Assumindo a Hipótese de Racionalidade Não-Compensatória

Uma vez considerada esta hipótese, deve-se buscar um método não-compensatório de apoio multicritério a decisão que se adéqüe ao contexto do problema e a estrutura de preferências do decisor, conforme discutido na seção 4.4. Uma vez escolhido este método, devem ser elicitados parâmetros de entrada do método, tais como o valor de importância dos pesos, limiares de indiferença e outros que vão depender do método escolhido.

Uma vez aplicado o método, podem ser obtido como resultado um ordenamento das alternativas ou apenas a alternativa recomendada pelo método caso este seja de escolha. Se utilizado um método de escolha, é necessária a remoção das alternativas que violam as restrições para garantir que a recomendação seja viável.

Caso seja utilizado um método de ordenamento, podem ser mantidas todas as alternativas, contanto que seja escolhida a alternativa que possua melhor posição no ranking e respeite as restrições. Para este caso, pode também ser avaliado o relaxamento de alguma restrição, seguindo a estruturação proposta por Zeleny (1986) através do DeNovo Programming.

6.2.4 Seleção da Alternativa, Análise de Sensibilidade e Discussão dos Resultados

Nesta etapa é aplicado o método de agregação escolhido, para o qual foram elicitados parâmetros e as utilidades unidimensionais esperadas das alternativas que foram utilizadas como *input*.

Da aplicação do método de agregação, é possível obter uma recomendação da melhor alternativa, ou até um ordenamento destas de acordo com as preferências do decisor, o tipo de resultado a ser obtido dependerá do método escolhido. Para o caso da problemática de escolha, como neste problema, podem ser escolhidos tanto métodos de escolha quanto de ordenamentos.

A análise de sensibilidade deve ser feita para os parâmetros utilizados no modelo, tais como os parâmetros do método de agregação, freqüentemente os pesos. A análise de sensibilidade deve ser feita para observar a robustez da recomendação obtida através do modelo, que quando se mantém a mesma é considerada robusta.

Na discussão dos resultados são avaliados a qualidade do modelo e das conclusões proporcionadas por este para o problema. Nesta etapa podem ser avaliadas também as implicações das hipóteses admitidas para a construção do modelo e como a veracidade das hipóteses podem afetar a veracidade da solução encontrada para o problema.

6.3 Conclusões

Neste capítulo foi contextualizado um problema de decisão no contexto específico do transporte de gás a partir do trabalho de avaliação de risco apresentado por Brito & Almeida (2008), sobre o qual foi feita uma avaliação de como seria realizada a aplicação do *framework* proposto nesta tese, considerando algumas hipóteses e suas implicações.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido, assim como algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros que dêem continuidade à linha deste trabalho.

7.1 Conclusões

Devido à necessidade de executar as atividades de extração, processamento e transporte de petróleo e gás, uma das principais fontes energéticas da humanidade, são realizadas em larga escala atividades que possuem elevado potencial de materialização de catástrofes. Portanto, com o objetivo de contribuir para a forma como são tomadas decisões em relação a estas situações de risco, foi proposto um *framework* para modelagem de problemas dentro destas condições.

Conforme pôde ser observado no problema abordado neste trabalho e na maior parte destas situações, é necessário que sejam considerados mais de um objetivo, seja este numa dimensão monetária ou visando minimizar riscos humanos, ambientais ou de perdas financeiras.

Visando isto, foi proposta uma abordagem de apoio multicritério, capaz de considerar múltiplas dimensões de risco, conforme a situação apresentada através do problema de decisão.

Para a perspectiva da modelagem dos problemas de decisão, a abordagem proposta para modelar os problemas permite agregar duas visões sob a forma de construção do modelo, que devem ser escolhidas conforme as dimensões de tempo e recursos para elaborar novas alternativas. No caso específico do problema de decisão para implementação de ações de melhoria no processo primário de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás, abordado no trabalho, a criação de alternativas pode ser um processo custoso, longo e demorado. Por isso, não foram dedicados esforços para utilizar uma abordagem VFT, que exigiria maiores esforços para a criação e elaboração de novas alternativas. Assim, foi aplicada a abordagem AFT, partindo destas para avaliação das preferências do decisor e a construção do modelo.

Como resultado da modelagem do problema, foi possível avaliar e analisar a situação de risco das instalações caso fossem ou não implementadas ações de melhoria, através de uma

abordagem quantitativa agregando fatores probabilísticos, as conseqüências dos estados da natureza, as preferências do decisor e o comportamento deste em relação a risco.

Da análise dos resultados do modelo foi possível tirar conclusões interessantes referentes ao grau de risco das instalações do processo primário de uma plataforma *offshore* de extração de petróleo e gás para cada uma das alternativas consideradas. Isto foi possível devido aos benefícios do uso da teoria da utilidade, que permite medir o risco através de uma escala intervalar, o que possibilita medir o quanto uma alternativa é melhor que a outra em termos de risco.

Esta é uma das principais vantagens desta abordagem, pois é possível fornecer uma medida de quanto uma alternativa é pior que a outra em termos de probabilidade, preferência do decisor sob as conseqüências e o comportamento do decisor quanto a risco considerados de forma conjunta, diferentemente das abordagens tradicionais para análise de risco. Quando é feito uso de um enfoque quantitativo nas abordagens tradicionais é comum apenas uma avaliação de probabilidades de materialização de eventos catastróficos num intervalo de um ano, e baseando-se nesse indicador, são tiradas conclusões sobre os graus de risco, onde aqueles que possuem maior probabilidade de materialização são considerados os mais arriscados.

Destaca-se também a possibilidade de aplicar outros métodos de decisão multicritério, que podem ser escolhidos de acordo com as características e a problemática do problema e as preferências do decisor, conforme discutido no Capítulo 4.

Na aplicação apresentada no Capítulo 5 foi utilizada a teoria da utilidade multiatributo, da qual foram obtidas medidas de risco para cada uma das alternativas e uma solução robusta para o problema em questão, que mesmo após variações de 10% nos parâmetros manteve-se a mesma. É interessante salientar a relação entre os parâmetros utilizados no modelo, pois representam constantes de escala que tem por objetivo representar o binômio importância do objetivo e a ancoragem de escala das avaliações das conseqüências na dimensão destes objetivos, o que levou a um valor pequeno da constante do objetivo custo, devido à maior dispersão das avaliações e a menor importância deste objetivo tendo em face os objetivos da minimização de riscos humanos e ambientais. Ao final do capítulo foi demonstrada como seria a solução do problema caso fosse considerada uma abordagem não-compensatória, utilizando-se para isto o método ELECTRE I. Os resultados da aplicação não-compensatória

se mostraram bastante interessantes, pois permitiram evidenciar a grande diferença entre as duas racionalidades através do tipo de recomendação obtida para cada uma destas.

Ainda no Capítulo 5 foi apresentada uma discussão sobre a relevância e a importância de considerar conjuntamente probabilidade, preferência do decisor sob as conseqüências e o comportamento do decisor quanto a risco, avaliando também as vantagens do uso da teoria da utilidade e do enfoque multicritério para avaliar riscos, uma vez que neste contexto, os riscos sempre se manifestam em múltiplas dimensões.

No Capítulo 6 foi contextualizado um problema de decisão no contexto específico do transporte de gás, sobre o qual foi feita uma avaliação de como seria a aplicação do *framework*, considerando algumas hipóteses e suas implicações.

Dessa forma, foram alcançados os objetivos do trabalho através da estruturação do *framework* proposto nesta tese e da discussão em torno da aplicação do mesmo a problemas de decisão para avaliação de riscos multidimensionais utilizando a teoria da utilidade para mensurar os riscos em cada dimensão (intra-critério) e o apoio multicritério a decisão para avaliação multidimensional (inter-critério).

Por fim, ressalta-se a relevância deste trabalho dentro do contexto de avaliação de riscos tecnológicos, em particular, no setor de petróleo e gás, preenchendo a lacuna referente aos processos de tomada de decisão considerando múltiplas dimensões de risco, sugerindo a teoria da utilidade como medida de risco para incorporar probabilidades, julgamento humano de valor e o comportamento do decisor quanto a risco e o uso de métodos de decisão multicritério para agregar as preferências do decisor quanto aos objetivos do problema.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para a elaboração de futuros trabalhos:

- De uma forma geral, o modelo proposto pode ser estendido para outros setores da cadeia de extração, processamento e transporte de petróleo e gás.
- O uso da modelagem proposta para outros tipos de problemas tais como a classificação de setores de risco.

- A aplicação do *framework* proposto para modelagem de problemas de decisão sob risco para outros tipos de instalações perigosas, tais como indústrias químicas ou usinas nucleares, por exemplo.
- A estruturação de uma etapa de desenvolvimento de alternativas em um contexto da abordagem VFT.
- Sugere-se também o desenvolvimento de uma modelagem para situações de decisão sob riscos similares voltadas para decisão em grupo, onde não é considerado apenas um decisor, mas um conjunto de decisores, tais como representantes da mão-de-obra, agências regulamentadoras e direção da empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, A. T. 2002. Multicriteria modelling for repair contract problem based on utility function and ELECTRE I method. *IMA Journal Of Management Mathematics*, Vol. 13, pp.29–37.

Almeida, A. T. 2003. A utilização de métodos de multicritério de apoio a decisão. In: Almeida, A. T. & Costa, A P C S. 2003. *Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*. Editora Universitária da UFPE.

Almeida, A. T. 2005. Multicriteria modelling of repair contract based on utility and electre i method with dependability and service quality criteria. *Annals of Operations Research*, Vol. 138, pp.113–126.

Almeida, A. T. 2008. *O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. Editora Universitária da UFPE.

Belton, V. & Stewart, T. J. 2002. *Multiple criteria decision analysis*. Kluwer Academic Publishers.

Bowers, J. A. & Mould, G. I. 1994. Weather risk in offshore projects. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 45, No. 4, pp. 409-418.

Brandsæter, A. 2002. Risk assessment in the offshore industry. *Safety Science*, Vol. 40, pp.231–269.

Brans, J. P. & Mareschal, B. 2002. *PROMETHEE – GAIA: une méthodologie d'aide à la décision em présence de critéres multiples.* Bruxelles: Éditions de L'Université de Bruxelles.

Britannica, Britannica Online Encyclopedia. Disponível em: http://www.britannica.com/eb/art-95739/North-Sea-oil-drilling-platform-with-natural-gas-flare-off. Acesso em 10/06/2008.

Brito, A. J. 2007. Avaliação multicritério de riscos em gasodutos de gás natural: uma abordagem de classificação com ELECTRE TRI. *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Brito, A. J. & Almeida, A. T. 2008. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering and Systems Safety, ARTICLE IN PRESS*, doi:10.1016/j.ress.2008.02.014.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/vazamento/vazamento.asp. Acesso em 14/06/2008.

COPERGÁS, Disponível em: http://www.copergas.com.br/site/gas/mapa.asp. Acesso em: 22/06/2008.

Curran, K. J., Wells, P. G. & Potter, A.J. 2006. Proposing a coordinated environmental effects monitoring (EEM) program structure for the offshore petroleum industry, Nova Scotia, Canada. *Marine Policy*, Vol. 30, pp. 400–411.

Dias, L. C. & Clímaco, J. N. 2000. Additive aggregation with variable interdependent parameters: the VIP analysis software. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, pp.1070-1082.

Edwards, W. & Barron, F.H. 1994. Smarts and smarter: improved simple methods for multi attribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Vol. 60, pp.306-325.

Flin, R., Mearns, K., Gordon, R. & Fleming, M. 1996. Risk perception by offshore workers on UK oil and gas platforms. *Safety Science*, Vol. 22, pp. 131-145.

Gomes, L. F. A. M., Gomes, C. F. S. & Almeida, A. T. 2002. *Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério*. Editora Atlas.

Gomes, L. F. A., Araya, M. C. G. & Carignano, C. 2004. *Tomada de Decisões em Cenários Complexos*. Thomson.

ISO/IEC. 1999. *Guide 51: Safety aspects – Guideline for their inclusion in standards*. ISO/IEC.

Jornal do Commercio. Disponível em: http://jc.uol.com.br/jornal/2008/01/27/not_267690.php. Acesso em: 22/06/2008.

Keeney, R. L. & Raiffa, H. 1976. *Decision with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. John Wiley & Sons.

Keeney, R. L. 1992. *Value-focused thinking: a path to creative decisionmaking*. Harvard University Press.

Khan, F. I. & Amyotte, P. R. 2002. Inherent safety in offshore oil and gas activities: a review of the present status and future directions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 15, pp.279–289.

Khan, F. I., Sadiq, R. & Husain, T. 2002. Risk-based process safety assessment and control measures design for offshore process facilities. *Journal of Hazardous Materials*, A94, pp.1–36.

Kletz, T. A. 1985. Inherently safer plants. *Plant/Operation Progress*, Vol. 4, pp.164–166.

Kletz, T. A. 1998. Process plants: A handbook of inherently safer design. 2nd ed. Philadelphia, Taylor & Francis.

Krueger, J. & Smith, D. 2003. A practical approach to fire hazard analysis for offshore structures. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 104, pp.107–122.

Licitação, A BUSINESS ONLINE. Disponível em: http://www.licitacao.net/noticias_mostra.asp?p_cd_notc=6729. Acesso em: 22/06/2008.

Malczewski, J. 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York : John Wiley.

Melchers, R. E. & Stewart, M. G. 1993. *Probabilistic risk and hazard assessment*. Rotterdam, A.A. Balkema.

Neiva, J. 1993. *Conheça o petróleo*. Rio de Janeiro, Expressão e Cultura.

NORSOK 2001. *NORSOK Z-013: Risk and emergency preparedness analysis*. Rev. 2, Norwegian Technology Centre. Disponível em: http://www.standard.no/pronorm-3/data/f/0/01/50/3_10704_0/Z-013.pdf. Acesso em 24/06/2008.

O'Dea, A. & Flin, R. 2001. Site managers and safety leadership in the offshore oil and gas industry. *Safety Science*, Vol. 37, pp. 39-57.

Olson, D. L. 1996. *Decision Aids for Election Problems*, Springer.

Poffo, I. R. F. 2000. Vazamentos de óleo no Litoral Norte do Estado de São Paulo: análise histórica (1974 a 1999). Dissertação de mestrado. USP/PROCAM- Programa de Pós graduação em Ciências Ambientais.

Pula, R., Khan, F. I., Veitch, B. & Amyotte, P. R. 2005. Revised fire consequence models for offshore quantitative risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 18, pp. 443–454.

Roy, H. 1996. *Multicriteria Methodology of Decision Aiding*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

Salter, E. & Ford, J. 2001. Holistic Environmental Assessment and Offshore Oil Field Exploration and Production. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 42, pp. 45-58.

Schlumberger, Schlumberger Oil Field Glossary. Disponível em: http://www.glossary.oilfield.slb.com/files/OGL00051.gif. Acesso em 10/06/2008a.

Schlumberger, Schlumberger Oil Field Glossary. Disponível em: http://www.glossary.oilfield.slb.com/files/OGL05017.jpg. Acesso em 10/06/2008b.

Schlumberger, Schlumberger Oil Field Glossary. Disponível em: http://www.glossary.oilfield.slb.com/files/OGL05019.gif. Acesso em 10/06/2008c.

Shaluf, I. M., Ahmadun, F., Shariff, R., Mustafa, S. & Said, A.M. 2003. Fire and explosion at mutual major hazard installations: review of a case history. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 16, pp. 149–155.

Shetty, N. K., Guedes Soares, C., Thoft-Christensen, P. & Jensen, F. M. 1998. Fire safety assessment and optimal design of passive fire protection for offshore structures. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 61, pp.139-149.

Sklavounos, S. & Rigas, F. 2006. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 19, pp. 24–31.

Souza, F. M. C. 2002. *Decisões Racionais em Situações de Incerteza*. Editora Universitária da UFPE, ISBN: 85-7315-178-1.

Stejskal, I. V. 2000. Obtaining approvals for oil and gas projects in shallow water marine areas in Western Australia using an environmental risk assessment framework. *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 6, pp. 69-76.

Thomas, J. E. 2004. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. 2ª edição, Ed. Interciência.

Thomas, S. & Dawe, R. A. 2003. Review of ways to transport natural gas energy from countries which do not need the gas for domestic use. *Energy*, Vol. 28, pp. 1461–1477.

Thuyet, N. V., Ogunlana, S. O. & Dey, P. K. 2007. Risk management in oil and gas construction projects in Vietnam. *International Journal of Energy Sector Management*, Vol. 1, pp. 175-194.

Vincke, P., 1992. *Multicriteria decision-aid*. New York, John Wiley.

Wakes, S. J., Holdø, A. E. & Meares, A. J. 2002. Experimental investigation of the effect orifice shape and fluid pressure has on high aspect ratio cross-sectional jet behaviour. *Journal of Hazardous Materials*, A89, pp. 1–27.

Worldwatch, Worldwatch Insitute. Disponível em: http://www.worldwatch.org/node/5349. Acesso em: 10/06/2008.

Zeleny, M. 1986. Optimal system design with multiple criteria: de novo programming approach. *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 10, pp. 89-94.