

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

**MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO BASEADOS
EM MAUT NA GESTÃO DE RISCOS EM GASODUTO DE
HIDROGÊNIO E NA MANUTENÇÃO CENTRADA EM
CONFIABILIDADE**

TESE SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR
POR

MARCELO HAZIN ALENCAR

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida, PhD

RECIFE, FEVEREIRO/ 2010

A368m Alencar, Marcelo Hazin

Modelos de decisão multicritério baseados em MAUT na gestão de riscos em gasoduto de hidrogênio e na manutenção centrada em confiabilidade / Marcelo Hazin Alencar. - Recife: O Autor, 2010.

xi,91 f., il : grafs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de Produção. 2. Decisão multicritério 3. MAUT
4. Transporte de hidrogênio. 5. RCM. I. Título.

UFPE

658.5

CDD (22. ed.)

BCTG/2010-040



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

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE TESE DE
DOUTORADO DE

MARCELO HAZIN ALENCAR

"MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO BASEADOS EM MAUT NA GESTÃO DE
RISCOS EM GASODUTO DE HIDROGÊNIO E NA MANUTENÇÃO CENTRADA EM
CONFIABILIDADE"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GERÊNCIA DA PRODUÇÃO

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato MARCELO HAZIN ALENCAR **APROVADO COM DISTINÇÃO**.

Recife, 26 de fevereiro de 2010.

Prof. ADILSON TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

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

Prof. DANIELLE COSTA MORAIS, Doutor (UFPE)

Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

Prof. BÊDA BARKOKÉBAS JUNIOR, Doutor (UPE)

AGRADECIMENTOS

Citar nomes é sempre uma tarefa difícil e arriscada quando desejamos expressar nossos agradecimentos às pessoas que de um jeito ou de outro foram de grande importância neste longo caminho. Longa estrada que faz parte de uma vida de muitas lutas e conquistas. Por tudo isto, não quero apenas agradecer, mas sim compartilhar mais esta vitória com todos que contribuíram para que ela acontecesse:

- Minha querida avó e amiga, Milade (*in memoriam*) que durante todo o nosso convívio sempre me ensinou que tudo é possível, bastando para isto ter fé;
- Minha querida esposa Ana Karolina, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis desta jornada, incentivando-me a superar todos os obstáculos e dificuldades que o meu doutorado pôde causar;
- Minha família, em especial meus pais e minha irmã Luciana, amiga e confidente de todas as horas;
- Prof. Adiel Teixeira de Almeida, meu orientador, que me guiou ao longo de todo este trabalho. Pessoa por quem tenho grande admiração e respeito;
- Aos meus colegas do GPSID, em especial Thalles, pelos momentos e conhecimentos construídos;
- Amigos que sentiram minha ausência, justificada pela necessidade dos meus estudos;
- Colegas de curso com os quais dividi dificuldades e agora, também, vitórias.

RESUMO

O avanço tecnológico verificado nos últimos tempos proporciona à sociedade mundial melhorias em diversos campos de atuação. No entanto, este processo dinâmico é também complexo, com decisões conflitantes que acarretam conseqüências não apenas para as organizações, mas para toda a sociedade. Neste contexto, este trabalho apresenta dois modelos distintos de decisão multicritério baseados na teoria utilidade multiatributo (MAUT) que serão aplicados em áreas diferentes. O primeiro modelo proposto integra um método multicritério com a abordagem de manutenção centrada em confiabilidade conhecida como RCM. Através deste modelo uma análise quantitativa das conseqüências das falhas é apresentada, disponibilizando para o gerente de manutenção dados importantes para a tomada de decisões gerenciais, obtidos com base nas preferências do decisor. O segundo modelo proposto está relacionado com o transporte de hidrogênio em gasodutos. É utilizado para a avaliação dos riscos em dutos de transporte de hidrogênio, onde ações são definidas em classes de prioridade com o intuito de mitigar os riscos, levando em consideração a avaliação das dimensões financeira, humana e ambiental. Desta forma, os dois modelos apresentados buscam contribuir com a sociedade, a partir do momento que proporcionam uma tomada de decisão mais estruturada, a partir da utilização de uma abordagem quantitativa e multidimensional que leva em consideração as incertezas associadas ao problema.

Palavras-chave: Decisão Multicritério, MAUT, riscos, transporte de hidrogênio, RCM.

ABSTRACT

Technological advances in recent times provide to global society improvements in various fields. However, this dynamic process is also complex, with conflicting decisions that present negative consequences not only for organizations, but for the society. In this context, this paper presents two distinct multicriteria decision models based on multiattribute utility theory (MAUT) to be applied in different areas. The first model proposed integrates a multicriteria method with the Reliability Centered Maintenance approach known as RCM. Through this model, a quantitative analysis of failure consequences is presented, providing for the maintenance manager an important input for management decisions obtained based on decision maker preferences. The second model proposed is related to the hydrogen transport in pipelines. It is used for risk assessment in hydrogen pipeline transportation, where actions are defined in priority classes in order to mitigate risks, taking into account the evaluation of financial, human and environmental dimensions. In this way, the two models presented seek contribute to society, from the moment that provide a structured decision-making with the use of a quantitative and multidimensional approach that takes into account the uncertainty about the issues.

Keywords: Multicriteria Decision Aid, MAUT, Risks, Hydrogen Pipeline Transportation, RCM.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Relevância e contribuição do estudo	3
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivos Gerais.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	6
1.3 Estrutura do Trabalho	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Fundamentação Teórica.....	8
2.1.1 RCM (Reliability-centered maintenance)	8
2.1.2 Gestão de Riscos	16
2.1.3 Apoio Multicritério à Decisão.....	17
2.1.4 Teoria da utilidade Multiatributo - MAUT	19
2.2 Revisão Bibliográfica sobre RCM.....	21
2.3 Revisão Bibliográfica sobre análise de risco em dutos	24
2.3.1 Aspectos relacionados à análise de risco em dutos químicos.....	24
2.3.2 Aspectos associados à análise de risco em dutos de transporte de Hidrogênio	29
2.4 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho	31
3 MODELO DE DECISÃO INTEGRANDO MÉTODO MULTICRITÉRIO COM A ABORDAGEM DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE.....	33
3.1 Modelo de Decisão Multicritério	33
3.1.1 Identificação das dimensões das consequências	36
3.1.2 Análise das consequências	37

3.1.3	Modelagem probabilística	38
3.1.4	Estabelecimento de índices globais da utilidade	43
3.1.5	Ranking das alternativas	45
3.2	Aplicação Numérica	45
3.3	Discussão de Resultados	67
4	MODELO DE DECISÃO PARA GESTÃO DE RISCOS EM SISTEMA DE DUTOS PARA TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO.....	69
4.1	Modelo Proposto	69
4.1.1	Identificação dos cenários de perigo	69
4.1.2	Teoria da utilidade	71
4.1.3	Construção da função utilidade	72
4.1.4	Construção da função consequência	73
4.1.5	Estruturação das seções.....	76
4.2	Aplicação Numérica	76
4.3	Discussão de Resultados	80
5	CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	82
5.1	Conclusões.....	82
5.1.1	Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na manutenção centrada em confiabilidade.....	82
5.1.2	Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na gestão de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio.....	83
5.2	Trabalhos Futuros	84
5.2.1	Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na manutenção centrada em confiabilidade.....	84
5.2.2	Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na gestão de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS.....	14
FIGURA 2.2. LOTERIAS PARA VERIFICAÇÃO DA PROPRIEDADE DE INDEPENDÊNCIA ADITIVA	20
FIGURA 3.1. PROCESSO RCM	34
FIGURA 3.2 – PROCESSO RCM COM A INCLUSÃO DO MODELO PROPOSTO	36
FIGURA 3.3 – FUNÇÃO UTILIDADE UNIDIMENSIONAL – DECISOR NEUTRO AO RISCO.....	41
FIGURA 3.4 – FUNÇÃO UTILIDADE UNIDIMENSIONAL – DECISOR PROPENSO AO RISCO.....	41
FIGURA 3.5 – FUNÇÃO UTILIDADE UNIDIMENSIONAL – DECISOR AVESSE AO RISCO	42
FIGURA 3.6 – LOTERIA PARA DEFINIÇÃO DAS UTILIDADES NOS CENÁRIOS DE “FALHA” E “NÃO FALHA”	43
FIGURA 4.1 – ÁRVORE DE EVENTOS PARA O TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO ATRAVÉS DE GASODUTOS	70
FIGURA 4.2. MAPA DAS SEÇÕES DE GASODUTOS.....	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1-COMPONENTES, MODOS DE FALHA E SUAS RESPECTIVAS PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA.....	46
TABELA 3.2-NÚMERO DE PESSOAS ATINGIDAS E VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE PARA A DIMENSÃO HUMANA.	48
TABELA 3.3- ÁREA ATINGIDA EM DECORRÊNCIA DAS FALHAS E VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE PARA A DIMENSÃO AMBIENTAL (M) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	49
TABELA 3.4- PREJUÍZOS FINANCEIROS DECORRENTES DAS CONSEQUÊNCIAS DAS FALHAS E VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE PARA A DIMENSÃO AMBIENTAL (F) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	50
TABELA 3.5 – VALORES DO DOWNTIME E DAS FUNÇÕES UTILIDADE PARA A DIMENSÃO OPERACIONAL 1 (O`) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	51
TABELA 3.6 – VALORES DO DOWNTIME E DAS FUNÇÕES UTILIDADE PARA A DIMENSÃO OPERACIONAL 2 (O”) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	52
TABELA 3.7 – VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE MULTIATRIBUTO PARA OS MODOS DE FALHA CONSIDERADOS.....	53
TABELA 3.8 – RANKING RESULTANTE DOS VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE MULTIATRIBUTO OBTIDOS PARA CADA MODO DE FALHA.....	54

TABELA 3.9 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DA UTILIDADE E RAZÕES DE INCREMENTO DA UTILIDADE ENTRE OS MODOS DE FALHA CONSIDERADOS.	55
TABELA 3.10-COMPONENTES, MODOS DE FALHA E SUAS RESPECTIVAS PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA.....	57
TABELA 3.11-NÚMERO DE PESSOAS ATINGIDAS E VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE PARA A DIMENSÃO HUMANA.	59
TABELA 3.12- ÁREA ATINGIDA EM DECORRÊNCIA DAS FALHAS E VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE PARA A DIMENSÃO AMBIENTAL (M) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	60
TABELA 3.13- PREJUÍZOS FINANCEIROS DECORRENTES DAS CONSEQUÊNCIAS DAS FALHAS E VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE PARA A DIMENSÃO AMBIENTAL (F) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	61
TABELA 3.14 – VALORES DO DOWNTIME E DAS FUNÇÕES UTILIDADE PARA A DIMENSÃO OPERACIONAL 1 (O`) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	62
TABELA 3.15 – VALORES DO DOWNTIME E DAS FUNÇÕES UTILIDADE PARA A DIMENSÃO OPERACIONAL 2 (O”) PARA CADA MODO DE FALHA CONSIDERADO.	63
TABELA 3.16 – VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE MULTIATRIBUTO PARA OS MODOS DE FALHA CONSIDERADOS.....	64
TABELA 3.17 – RANKING RESULTANTE DOS VALORES DA FUNÇÃO UTILIDADE MULTIATRIBUTO OBTIDOS PARA CADA MODO DE FALHA.	65

TABELA 3.18 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DA UTILIDADE E RAZÕES DE INCREMENTO DA UTILIDADE ENTRE OS MODOS DE FALHA CONSIDERADOS.	66
TABELA 4.1 – DESCRIÇÃO DAS SEÇÕES DO GASODUTO	77
TABELA 4.2 – PROBABILIDADES A PRIORI DE CENÁRIOS ACIDENTAIS CAUSADOS POR RUPTURAS EM GASODUTOS.....	78
TABELA 4.3 – PROBABILIDADES A PRIORI DE CENÁRIOS ACIDENTAIS CAUSADOS POR FUIROS EM GASODUTOS	78
TABELA 4.4 – RANKING RESULTANTE DO RISCO DAS SEÇÕES DOS GASODUTOS	79
TABELA 4.5 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DOS RISCOS E RAZÕES DE INCREMENTOS DE RISCOS ENTRE SEÇÕES DE GASODUTOS PRIORIZADAS	80

1 INTRODUÇÃO

Vive-se hoje em um mundo globalizado que tem como base o conhecimento, decorrente da aplicação de consideráveis parcelas das receitas fiscais - dos mais diversos países - em pesquisa e desenvolvimento tecnocientíficos em diversas áreas, como no setor energético, na indústria espacial e no desenvolvimento de novos produtos e técnicas (ALENCAR, 2007).

Bourne e Walker (2005) afirmam que a dinâmica da economia global e o aumento de sua complexidade trazem consequências não só para a organização, mas também para a sociedade como um todo. Estas consequências apresentam impactos diretos, direcionando o foco do gerenciamento da organização para mais e mais controles. Dentro desta ótica, serão consideradas neste trabalho duas áreas distintas para a contextualização deste problema. A primeira está associada ao gerenciamento da manutenção e a segunda à questão da gestão de riscos relacionada ao transporte de hidrogênio por gasodutos.

Com relação ao gerenciamento da manutenção verifica-se que a evolução da manutenção pode ser acompanhada desde o século passado, mais precisamente a partir da década de 40, sendo assim dividida em 3 gerações (Deshpand e Modak, 2002a; Moubray, 2000):

- 1º geração – Cobre a época pós 2º guerra mundial, onde a indústria não era altamente mecanizada. A manutenção era simples e não havia necessidade de habilidade dos operadores de manutenção;
- 2º geração – Década de 50, devido ao aumento da mecanização, máquinas complexas foram inseridas. O conceito de manutenção preventiva foi introduzido. Planos de manutenção e sistemas de controle foram desenvolvidos para o controle de custos associados à manutenção;
- 3º geração – Nesta geração, em meados da segunda metade da década de 70, surgiram as maiores mudanças associadas à manutenção. Mudanças estas vinculadas a novas expectativas, novas pesquisas e novas técnicas. Com relação às novas expectativas pode-se observar a busca pelo aumento da disponibilidade e confiabilidade da planta, aumento do nível de segurança, melhoria na qualidade do produto, proteção do meio ambiente, aumento na vida útil do equipamento e a maior eficácia relacionada ao controle do custo. Quanto às novas pesquisas, mudanças foram introduzidas nas crenças referentes à relação idade e falha. No tocante a novas técnicas, um crescimento elevado de novos

conceitos e técnicas associadas à manutenção foram verificados destacando-se estudos relacionados a modos de falha e análise dos seus efeitos, monitoramento da condição, *design* para confiabilidade e manutenibilidade, trabalho em equipe, dentre outros que são verificados até hoje.

De acordo com Pinjala *et al.* (2006), dependendo de sua capacidade produtiva, empresas de manufatura preferem competir em mercados baseados em alguma prioridade competitiva como qualidade, custo e flexibilidade. A manutenção de equipamentos é parte integrante do processo produtivo da empresa e pode influenciar estas prioridades competitivas e as estratégias empresariais de duas maneiras: positiva ou negativamente.

Segundo Sittithumwat *et al.* (2004), devido ao aumento da competitividade e da pressão econômica, empresas têm sido forçadas a reduzir custos operacionais e de manutenção. Desta forma, faz-se necessário desenvolver a manutenção com um custo reduzido sem prejudicar a confiabilidade do sistema.

Birkner (2004) ressalta que existe uma forte correlação entre a disponibilidade de um ativo físico e o seu gerenciamento. Qualquer estratégia necessita de um plano de atividades de manutenção. Dependendo da eficácia das atividades desenvolvidas, o processo natural de envelhecimento em conjunto com os aspectos operacionais (condições de sobrecarga, por exemplo) pode resultar em novas falhas e na consequente interrupção dos serviços. Este processo define a qualidade de serviço.

Deshpande e Modak (2002b) ressaltam que em muitos casos, o ponto de vista tradicional da manutenção baseia-se na idéia de que todas as falhas são danosas e precisam ser prevenidas. No entanto, isto não condiz com a realidade. Primeiramente, do ponto de vista técnico, frequentemente não é viável se prevenir falhas. Por fim, mesmo se fosse possível antecipar ou prevenir todas as falhas isto seria proibitivo por conta dos custos associados.

Quanto à questão da gestão dos riscos relacionada ao transporte de hidrogênio por gasodutos, verifica-se atualmente uma pressão para a implementação de mudanças na estrutura energética global, de tal forma a incorporar novos aspectos e mudanças quanto ao caminho com que os combustíveis fósseis são utilizados. Neste contexto, o hidrogênio é visto por muitos como o combustível do futuro, pois apresenta vários aspectos que o credenciam para tal. Estes aspectos serão descritos no subitem 1.1 deste trabalho.

Neste contexto, dentre os possíveis modais de transporte que podem ser utilizados para o transporte do hidrogênio, destaca-se o gasoduto. Este é considerado como o mais seguro e o mais economicamente viável para o transporte de grandes quantidades do gás. Entretanto,

acidentes com gasodutos têm sido registrados, frequentemente resultando em consequências catastróficas para a sociedade.

1.1 Relevância e contribuição do estudo

A relevância e contribuição deste estudo são verificadas a seguir, levando-se em consideração duas áreas distintas: a manutenção centrada na confiabilidade e a análise de riscos em gasodutos de hidrogênio.

Segundo Kothamasu *et al.* (2006), a mais antiga e comum estratégia de reparo e manutenção é “consertar quando ocorre a quebra”. O “atrativo” desta abordagem é que não se faz necessário a análise ou planejamento. Entretanto problemas como inúmeras paradas não planejadas podem se tornar muito inconvenientes. Desta forma, verifica-se que estes tipos de situação geram motivação para a realização de manutenção e reparo antes que os problemas surjam.

Outra questão é que nos últimos tempos o crescimento da mecanização e automação passou a influenciar diretamente o interesse relacionado à confiabilidade e disponibilidade. O processo de automação também chama a atenção, a partir do momento que dificulta o processo de mantabilidade dos padrões aceitáveis de qualidade, devido ao aumento das falhas. As falhas além de acarretarem sérias consequências operacionais também podem trazer graves consequências ambientais e de segurança. Outro ponto a ser destacado é que o aumento do custo de manutenção desperta o interesse dos gerentes, pois o que se busca no mercado atual é garantir o máximo retorno do investimento através do funcionamento eficiente dos ativos físicos (MOUBRAY, 2000).

Na mesma linha de raciocínio, Dekker (1996) afirma que durante anos houve um crescimento relacionado à importância da função manutenção e o seu gerenciamento. A propagação da mecanização e automação tem reduzido o número da força de trabalho envolvida na produção, elevando o capital aplicado em equipamentos de produção e estruturas civis. Como resultado, há um aumento no número de pessoas trabalhando na manutenção, assim como o aumento da proporção dos custos operacionais associados com a manutenção.

Moubray (2000) afirma que a manutenção tem mudado nas últimas décadas devido ao aumento no número e variedade de ativos físicos que precisam ser mantidos. Neste contexto, nos últimos anos, centenas de conceitos e técnicas associadas com ferramentas de manutenção têm sido criadas, incluindo apoio a decisão, novas técnicas de manutenção e uma maior alteração no pensamento organizacional relacionado à participação, trabalho em equipe e

flexibilidade. O maior desafio das empresas relacionado à manutenção hoje é definir que técnicas devem ser aplicadas à organização, com o objetivo de elevar o desempenho dos bens, reduzindo os custos de manutenção.

Kothamasu *et al.* (2006) destacam algumas motivações para um gerenciamento da manutenção mais efetivo: aumentos significantes na eficiência e nos lucros, disponibilidade de máquinas e equipamentos, aumento na demanda por parte dos clientes, introdução de novas tecnologias, preservação da segurança e do meio ambiente (decorrente principalmente do aumento de rigor das leis ambientais e de segurança) e o aumento na qualidade do produto.

Hipkin e Lockett (1995) reforçam a idéia que a redução nos custos de manutenção tem sido uma das razões para a introdução de novas abordagens com o passar das décadas.

Bertolini e Bevilacqua (2006) afirmam que vários métodos têm sido propostos na literatura para o planejamento das atividades de manutenção em plantas industriais.

Deshpande e Modak (2002a) afirmam que, sob esta ótica, faz-se necessário uma estrutura que reduza questões relacionadas à rotina de manutenção a um patamar reduzido, sem interferir no desempenho da planta, na qualidade do produto, na segurança e na integração com o meio ambiente. A abordagem RCM (Reliability-Centered Maintenance) possibilita, através de várias etapas, que os usuários respondam a estes desafios através da manutenção da funcionalidade de processos ou ativos físicos em qualquer sistema.

Desta forma, no âmbito do gerenciamento da manutenção, um dos modelos apresentado é de grande relevância, a partir do momento que avalia de forma quantitativa as consequências das falhas obtidas através da abordagem RCM, propiciando aos gerentes de manutenção dados que apóiam as tomadas de decisão e que servem de entrada para o processo de gerenciamento da manutenção.

Quanto ao estudo associado à gestão de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio algumas colocações são introduzidas a seguir.

Segundo Capelle *et al.* (2008) o hidrogênio apresenta excelentes propriedades físico-químicas que o coloca na qualidade de combustível universal. Desta forma, muitos estudos são desenvolvidos para a análise de sua produção, estoque e transporte.

Segundo Langer *et al.* (2007), o hidrogênio oferece vantagens significantes. Pode ser utilizado em quase todos os setores onde a energia é requerida: transportes, uso doméstico, serviços e indústria. Diferentemente da energia elétrica, pode ser armazenado tanto em pequenas como em grandes quantidades por longos períodos e sem perdas. No local de utilização, o hidrogênio é praticamente isento de emissões de CO₂, gases ácidos e outros

poluentes. Além disso, o hidrogênio pode ser produzido a partir de uma variedade considerável de recursos , incluindo recursos renováveis, energia nuclear e combustíveis fósseis.

De acordo com Midilli e Dincer (2008), o hidrogênio geralmente causa um menor ou até mesmo nenhum impacto ambiental. A variedade de fontes geradoras do hidrogênio permite uma gama flexível de opções para a sua utilização. Além disso, se utilizado de forma apropriada, o hidrogênio como fonte de energia pode prover um fornecimento de energia confiável e sustentável quase que indefinidamente. O hidrogênio favorece a descentralização do sistema, garantindo assim a sua flexibilidade e proporcionando benefícios econômicos para a população. Cria novos campos de trabalho na indústria, a partir do momento que pode ser utilizado dentre outras aplicações como matéria prima química em petroquímicas, indústrias alimentícias, microeletrônica, metais ferrosos e não ferrosos, processos metalúrgicos etc.

No entanto, Markert *et al.* (2007) afirmam que o hidrogênio não é uma fonte primária de energia, podendo ser produzido a partir do carvão, gás natural, óleo ou através do processo de eletrólise da água. De acordo com Tzimas *et al.* (2007), o hidrogênio passará a ser produzido em quantidades maiores já a partir de 2010 para aplicações energéticas, sendo produzido a partir de 2020 para a cogeração de calor e eletricidade em indústrias, residências e serviços.

De acordo com os estudos apresentados por Jo e Crowl (2007), o hidrogênio quando comparado ao metano (maior componente na composição do gás natural) apresenta um limite superior de inflamabilidade (4-75% contra 5,3-15% do metano), assim como um índice de deflagração bem mais elevado (550 Bar m/s contra 55 Bar m/s do metano). O hidrogênio apresenta também uma energia de ignição inferior a do metano (0,018 mJ contra 0,280 mJ do metano). Estes resultados mostram que o hidrogênio representa um maior perigo com relação ao metano devido ao amplo limite de inflamabilidade, baixa energia de ignição e elevado índice de deflagração.

Neste contexto, a questão do transporte do hidrogênio se torna uma peça fundamental para a viabilidade do uso deste combustível. Jo e Ahn (2006) ressaltam que os pontos de produção e consumo estão situados em diferentes localidades. Desta forma, o hidrogênio precisa ser transportado do seu ponto de produção até o ponto de consumo. O gasoduto é o modal de transporte mais economicamente viável para o transporte de grandes quantidades de hidrogênio.

Entretanto, Dziubinsk *et al.* (2006) argumentam que embora o transporte de líquidos e gases por dutos seja um avanço das soluções tecnológicas modernas, o principal perigo associado com o transporte destas substâncias é a falha num gasoduto, conduzindo ao vazamento da substância transportada para o meio ambiente. Jo e Ahn (2006) afirmam que cada falha num gasoduto pode ocasionar sérios danos à sociedade.

Neste sentido, o outro modelo de decisão apresentado neste estudo para a avaliação de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio é de suma relevância, a partir do instante que utiliza a abordagem multicritério baseada na teoria da utilidade multiatributo, incorporando o comportamento do decisor no processo decisório. Adicionalmente, o modelo possibilita ao decisor definir ações em classes de prioridade com o intuito de mitigar riscos envolvidos no transporte de hidrogênio.

1.2 Objetivos

A seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

1.2.1 Objetivos Gerais

Proposição de modelos de decisão multicritério para a avaliação das consequências das falhas obtidas através da abordagem RCM e para a análise de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estruturar o modelo de decisão multicritério para a avaliação das consequências das falhas obtidas através da abordagem RCM com base na literatura pesquisada;
- Estruturar o modelo de decisão multicritério para a análise de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio com base na literatura pesquisada;
- Realizar aplicação numérica dos modelos propostos, visando ilustrar o seu funcionamento.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturada em quatro capítulos a seguir:

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

- No Capítulo II, é desenvolvida a fundamentação teórica que incorpora questões relacionadas com a abordagem RCM (*Reliability-centered maintenance*), gestão de riscos, apoio multicritério à decisão e teoria da utilidade multiatributo (MAUT). Também associada a este capítulo verifica-se a revisão bibliográfica relativa a aspectos relacionados á manutenção centrada em confiabilidade e a análise de riscos em dutos.
- No Capítulo III é apresentado o modelo de decisão integrando um método multicritério com a abordagem de manutenção centrada em confiabilidade. Aplicações numéricas também podem ser verificadas neste capítulo.
- No Capítulo IV é apresentado o modelo de decisão com base em MAUT na gestão de riscos de um sistema de energia a hidrogênio.
- Finalmente, no Capítulo V são descritas as conclusões e algumas recomendações para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica utilizada para este trabalho é apresentada a seguir. São considerados conceitos relativos à RCM, gestão de riscos, apoio multicritério à decisão e teoria da utilidade multiatributo (MAUT).

2.1.1 RCM (*Reliability-centered maintenance*)

2.1.1.1 Origem e evolução do RCM

De acordo com Moubray (2000), a primeira indústria a confrontar sistematicamente desafios associados a escolhas relacionadas à manutenção foi a indústria de aviação comercial. A partir justamente desta confrontação é que, segundo Siqueira (2005), o primeiro evento relacionado à origem do RCM está vinculada à necessidade de certificação de uma linha de aeronaves. Isto acarretou o desenvolvimento de processos decisórios conhecidos dentro da aviação como MSG3 e fora dela como RCM (*Reliability-centered Maintenance*). Ainda segundo Siqueira (2005), a disseminação rápida do RCM motivou o desenvolvimento de versões um pouco diferentes da versão original do MSG-3.

De acordo com Martorell *et al.* (1995), RCM é uma metodologia sistemática que estabelece atividades de manutenção para componentes críticos na planta, permitindo a identificação de atividades aplicáveis e eficientes com o intuito de prevenir que estes componentes desenvolvam seus modos de falha dominantes.

Carretero *et al.* (2003) definem RCM como uma abordagem sistemática para a funcionalidade do sistema, falhas desta funcionalidade, causas e efeitos das falhas, além da infraestrutura afetada pelas falhas.

Para Martorell *et al.* (1999), RCM é uma metodologia sistemática que busca alocar manutenção preditiva e preventiva eficientes, auxiliando na prevenção de causas de falhas dominantes de equipamentos críticos. Além disto, possibilita se atingir níveis adequados de disponibilidade de componentes com baixo custo.

Rausand (1998) afirma que o RCM é uma técnica para o desenvolvimento de um programa de manutenção preventiva. Baseia-se na hipótese de que a confiabilidade inerente do equipamento é função do projeto e da qualidade de construção. Um programa de

manutenção preventiva efetivo garante que a confiabilidade inerente seja verificada. Entretanto, não aumenta a confiabilidade do sistema. Isto só se torna possível através do *redesign* ou modificações.

De acordo com Brauer e Brauer (1987), o RCM define os requisitos e tarefas a serem desenvolvidos para atingir, restaurar ou manter a capacidade operacional de um sistema ou equipamento. Requer a aplicação de uma lógica de decisão que possibilita uma análise sistemática dos modos de falha, além de dados de criticidade para definir requisitos de manutenção mais efetivos para itens de manutenção julgados como mais importantes. É através deste processo que a manutenção programada e o custo de suporte são reduzidos, mantendo ao mesmo tempo, o estado de prontidão necessária.

Segundo Fonseca e Knapp (2000), o objetivo central do RCM é determinar as ações necessárias para garantir que todos os ativos físicos continuem a desempenhar suas funções dentro do seu ambiente operacional.

Márquez *et al.* (2003) afirmam que o RCM estabelece regras para decidir se a política de gerenciamento das falhas é tecnicamente apropriada, estabelecendo critérios precisos para decidir a frequência de realização das atividades de rotina. O RCM identifica caminhos através dos quais o sistema pode falhar.

Para Dekker e Scarf (1998), no RCM a manutenção é baseada na análise dos modos de falha, seus efeitos, além dos meios para preveni-los.

Crocker e Kumar (2000) afirmam que o RCM é estabelecido para minimização do custo de manutenção através do balanceamento entre o custo elevado da ação corretiva e o custo da manutenção preventiva, levando-se em consideração a perda da vida potencial do equipamento.

Conforme Brauer e Brauer (1987), o RCM afeta as metas de custo vinculadas à segurança e confiabilidade pela utilização de uma abordagem bem definida na análise da confiabilidade a fim de destacar áreas que apresentem problemas de manutenção, além de definir programas de manutenção preventiva mais efetivos para os sistemas ou equipamentos considerados. É através deste programa de manutenção preventiva que:

- Falhas são detectadas e corrigidas, ou antes delas ocorrerem, ou antes de se tornarem um defeito.
- A probabilidade de falha é reduzida;
- Falhas ocultas são detectadas;
- Ocorre a elevação do custo-benefício de um programa de manutenção.

De acordo com Carretero *et al.* (2003), nos anos 70 e ainda nos dias de hoje, RCM foi um grande desafio em muitas indústrias, porque mudou o foco com relação a manutenção preventiva. Ou seja, deixou-se de trazer de volta os sistemas para os estados “perfeitos” e passou-se a manter o sistema num bom estado funcional (dentro de alguns limites operacionais definidos).

Conforme Abdul-Nour *et al.* (1998) a manutenção centrada em confiabilidade (RCM) deve ser aplicada para gerentes que desejam atingir padrões elevados de manutenção em instalações.

De acordo com Rausand (1998), uma análise RCM basicamente responde aos seguintes questionamentos:

- Quais são as funções e padrões de desempenho associados ao equipamento no atual contexto operacional presente?
- De que modo os equipamentos não cumprem suas funções?
- Qual é a causa de cada falha funcional?
- O que ocorre quando cada falha ocorre?
- Qual a importância de cada falha?
- O que pode ser feito para se prevenir cada falha?
- O que deve ser feito se não for possível desempenhar uma atividade preventiva?

Segundo Kothamasu *et al.* (2006), RCM é a união de duas tarefas: analisar e categorizar os modos de falha baseado nos efeitos da falha no sistema e avaliar o impacto das programações de manutenção na disponibilidade. A análise das falhas se inicia com a identificação de todos os modos de falha, prosseguindo com a categorização destes modos de falha baseado nas consequências de cada falha. Os resultados deste estudo compreendem a análise dos efeitos e dos modos de falha (FMEA).

2.1.1.2 Etapas do RCM

De acordo com Deshpand e Modak (2002b), o RCM foca na manutenção do sistema em vez de centrar-se na operação do equipamento. Quatro termos são bastante significativos nesta abordagem: sistema, subsistema, falha funcional, e do modo de falha.

- Sistema – É a planta como um todo ou uma subdivisão da mesma que é identificada na análise RCM.

- Subsistema – É uma reunião de equipamentos e/ou componentes que juntos desempenham uma ou mais funções e que podem ser considerados como uma unidade funcional separada dentro do sistema.
- Falha funcional – Todo subsistema desempenha certa função. Falhas funcionais descrevem como as falhas de cada subsistema ocorrem.
- Modo de falha – Um modo de falha identifica cada condição específica relacionada a um equipamento específico que provoca a perda da função de um subsistema.

Estes termos são também denominados de componentes funcionais do RCM. Esta terminologia definida tem sido utilizada através do processo de formulação de um planejamento efetivo. É o primeiro passo básico na aplicação da abordagem RCM.

Neste contexto, segundo Moubray (2000) o RCM necessita de cinco passos para ser implementado:

- Definir as funções de cada ativo físico dentro do contexto operacional, em conjunto com os padrões de desempenho desejados associados.
- Identificar que falhas podem ocorrer no ativo físico. No RCM isto é feito em dois níveis. Através da identificação de circunstâncias que geram uma falha funcional e através da indagação de que eventos podem causar a falha funcional do ativo físico.
- Tentar identificar os eventos que provavelmente causam cada falha funcional. Estes eventos são conhecidos como modos de falha. Nesta etapa é também importante identificar a causa de cada falha de forma bastante detalhada com o intuito de garantir que não haja desperdício de tempo e esforços para o tratamento de sintomas em vez de causas.
- O quarto passo implica em listar os efeitos da falha, que descrevem o que ocorre quando cada modo de falha ocorre.
- Finalmente, o último passo consiste na identificação e análise das conseqüências das falhas.

Richet *et al.* (1995) afirmam que a implementação do RCM requer um bom conhecimento dos equipamentos de produção, assim como suas falhas e conseqüências das falhas. Esta é a razão pela qual todos os operadores, técnicos e especialistas de uma instituição precisam estar envolvidos para alcançar os resultados que são desejáveis para do ponto de vista de confiabilidade, segurança e custo.

De acordo com Moubray (2000), o processo de identificação das funções, falhas funcionais, modos de falha e efeitos de falha geram frequentemente oportunidades para o aumento do desempenho e segurança, além de eliminar o desperdício.

Para um melhor entendimento, cada um destes itens será descrito separadamente a seguir, sendo também incorporada nestas descrições a análise das consequências.

- Funções

Rausand e Oien (1996) afirmam que a qualidade de uma análise de confiabilidade depende fortemente da habilidade do analista em identificar todas as funções requeridas e, portanto todas as falhas do item que está sujeito à análise.

Siqueira (2005) destaca que as funções são desempenhadas por sistemas, os quais devem ser selecionados e identificados antes da caracterização da função.

Cheng (2008) ressalta a importância da identificação de itens funcionalmente significativos, ou seja, itens cujos modos de falha têm significados econômicos, relacionados à segurança ou ainda que afetam a missão do sistema. Estes itens podem ser sistemas, subsistemas, componentes ou partes.

De acordo com Rausand e Oien (1996), um item complexo talvez desempenhe um alto número de funções. Todas as funções, no entanto, não são igualmente importantes.

Siqueira (2005), a partir do conceito de função adotado pelo RCM define-a como “o que o usuário deseja que o item ou sistema faça dentro de um padrão de desempenho especificado”.

Na literatura são observadas várias classificações referentes às funções.

As funções podem ser divididas de uma forma mais ampla em duas principais categorias: funções primárias ou secundárias. As primárias resumem o porquê da aquisição do ativo físico. As secundárias reconhecem o que se espera que um ativo físico faça mais do que simplesmente cumprir com sua função primária. Estas funções primárias e secundárias podem ser divididas em várias outras subcategorias (MOUBRAY,2000).

Siqueira classifica as funções em quatro categorias: Principal, secundária, auxiliar e supérflua.

Já Rausand e Oien (1996), classificam as funções em:

- Funções essenciais – São as funções necessárias para o cumprimento da finalidade do item. As funções essenciais são simplesmente as razões para se instalar um item.

- Funções auxiliares – São as funções requeridas para apoiar as funções essenciais. Estas funções são usualmente menos óbvias que as essenciais, mas em muitos casos são tão importantes quanto. Falhas decorrentes de funções auxiliares podem em muitos casos serem mais críticas quanto a questão da segurança que uma falha decorrente de uma função essencial.
- Funções de proteção – As funções que pretendem proteger as pessoas, equipamentos e o meio ambiente de danos. Estas funções podem ainda ser divididas em funções de segurança, funções ambientais e funções de higiene.
- Funções de informação – Estas funções compreendem, por exemplo, monitoramento da condição e alarmes.
- Funções de interface – Estas funções são aplicáveis à interface entre o item em questão e outros itens.
- Funções supérfluas – São muitas vezes encontradas quando o item é projetado para um contexto operacional, sendo utilizado num contexto operacional diferente. Em alguns casos, falhas em funções supérfluas podem causar falhas em outras funções.

Rausand e Oien (1996) afirmam que algumas funções podem ser classificadas em mais de uma classe.

- Falhas funcionais

De acordo com Moubrey (2000), uma falha funcional pode ser definida como “a incapacidade de um ativo físico de desempenhar a função requerida dentro de um padrão de desempenho que é aceitável pelo usuário”.

Siqueira (2005) afirma que uma falha pode ser classificada sob vários aspectos, conforme Figura 2.1.

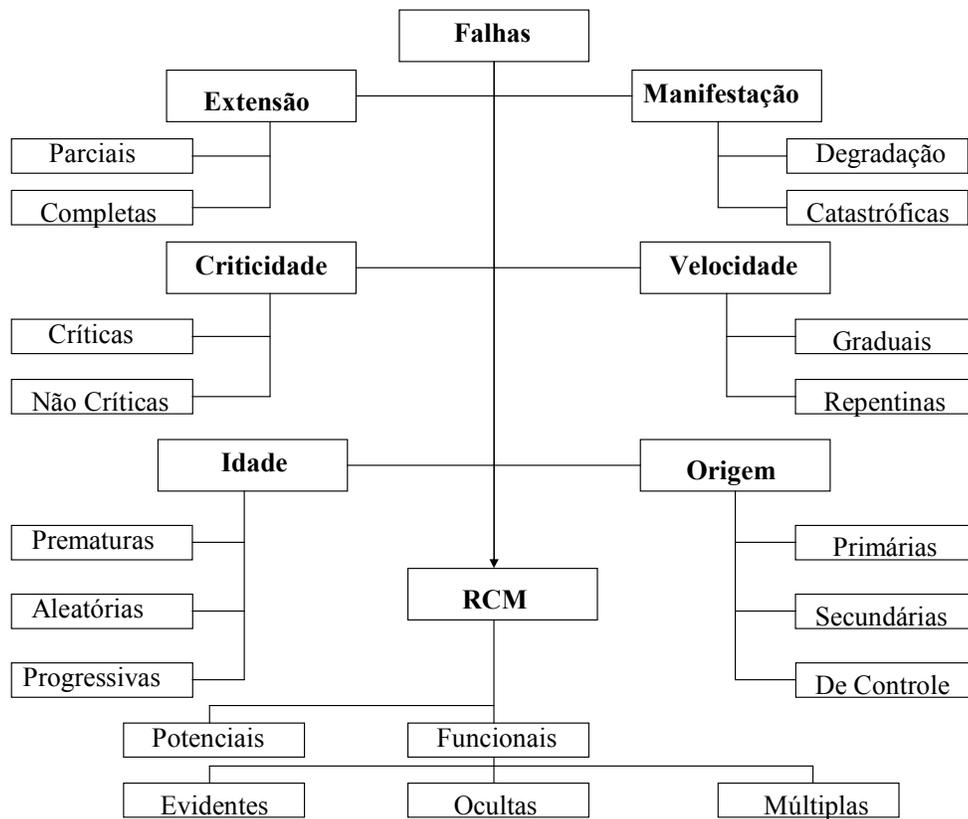


Figura 2.1 – Classificação de falhas (Adaptado de Siqueira, 2005).

Segundo Rausand e Oien (1996), para se estabelecer estratégias de manutenção, é importante esclarecer a distinção entre falhas ocultas e falhas evidentes.

Siqueira (2005) por sua vez, apresenta a definição das três categorias de falhas funcionais:

- Falha Evidente – É detectada pelo pessoal da operação durante o trabalho normal;
- Falha Oculta – Falha que não é detectada pelo pessoal da operação durante o trabalho normal;
- Falha Múltipla – é uma combinação de uma falha oculta com uma segunda falha, ou evento, que a torne evidente.

- Modos de falha

Rausand e Oien (1996) descrevem que falhas são frequentemente classificadas em modos de falhas. O conceito de modo de falha é normalmente reconhecido como um conceito útil na análise de falhas.

De acordo com Moubray (2000), um modo de falha é definido como qualquer evento que cause uma falha funcional.

Siqueira (2005) faz uma observação importante com relação aos modos de falha. Destaca que é função da manutenção combater o modo de falha toda vez que ele ocorra. Porém a causa da falha deve ser combatida pelo projetista. Apenas no caso onde não seja possível combater um modo de falha é que a manutenção indica ao projetista as necessidades de alterações para a eliminação da causa da falha.

Moubray (2000) observa que uma vez que cada modo de falha é identificado, torna-se possível considerar o que acontece quando ele ocorre, avaliando as suas consequências e decidindo o que (e se) deve ser feito para antecipar, prevenir, detectar ou corrigi-lo.

- Efeitos de falhas

Os efeitos da falha descrevem o que ocorre quando o modo de falha ocorre (MOUBRAY, 2000; SIQUEIRA, 2005).

De acordo com Moubray (2000) a descrição dos efeitos da falha deve incluir todas as informações necessárias para apoiar a avaliação das consequências das falhas. Quando se descreve os efeitos das falhas deve-se registrar:

- Qual a evidência (se houver) que a falha ocorreu;
- De que maneira representa uma ameaça para a segurança e para o meio ambiente;
- De que maneira afeta a produção e a operação;
- Que dano físico é causado pela falha;
- O que precisa ser feito para reparar a falha.

- Consequências de falhas

É a etapa seguinte à determinação dos efeitos de cada falha. Dependendo do local onde a falha ocorra as consequências produzidas por ela podem ser irrelevantes ou bastante consideráveis.

Moubray (2000) observa que se houver uma redução do efeito de uma falha qualquer em termos de frequência e/ou severidade, as consequências associadas podem ser reduzidas. Por outro lado, se as falhas apresentam apenas consequências menores, é possível que ações não proativas sejam tomadas, sendo a falha corrigida cada vez que ocorrer. Desta forma, uma

atividade proativa só é viável se reduz as consequências dos modos de falha associados para um patamar que justifique os custos diretos e indiretos da realização destas atividades.

Uma questão importante relacionada com as consequências é a verificação de funções evidentes e funções ocultas. Nas funções evidentes as falhas irão surgir eventualmente, tornando-se evidentes para o operador dentro de circunstâncias normais. Já nas funções ocultas, as falhas, ocorrendo diante de circunstâncias normais, não se tornam evidentes para o operador (RAUSAND,1998; MOUBRAY,2000).

A abordagem RCM classifica as consequências em quatro grupos (MOUBRAY, 2000; HIPKIN e LOCKETT, 1995; CARRETERO *et al.*, 2003; RAUSAND e OIEN, 1996):

- Consequências de falhas ocultas – Não apresentam impacto direto, mas expõem a organização a falhas múltiplas com sérias, frequentemente catastróficas, consequências.
- Consequências que afetam a segurança e o meio ambiente – Uma falha evidente apresenta consequências relacionadas à segurança quando pode matar ou ferir alguém. As consequências associadas ao meio ambiente, decorrentes de uma falha, estão associadas a violações a padrões ambientais sejam eles regionais, nacionais, internacionais ou mesmo estabelecidos pela própria empresa.
- Consequências operacionais – Uma falha evidente apresenta consequências operacionais quando as mesmas afetam a produção.
- Consequências não operacionais – As falhas evidentes que se encontram neste grupo envolvem apenas custos diretos de reparo.

2.1.2 Gestão de Riscos

De acordo com a *Society for Risk Analysis* (SRA), risco é definido como o potencial de realização de consequências indesejadas e adversas para a vida humana, para a saúde, para a propriedade ou ambiente. A estimativa do risco é baseada normalmente no valor esperado da probabilidade condicional do evento multiplicado pela consequência do evento, dado que já ocorreu (SRA, 2010).

De acordo com Crowl e Jo (2007), risco consiste da probabilidade de acidentes e suas consequências. Se apenas um dos componentes é considerado, o risco pode ser erroneamente avaliado, com os meios de controle sendo inadequados.

Papadakis (2000) observa que existem várias abordagens possíveis para a avaliação do risco, podendo ser implícitas ou explícitas, quantitativa ou qualitativa, nem sempre sendo necessário a aplicação de um processo complexo.

Parnell *et al.* (2010) afirmam que a análise de risco tem auxiliado as organizações públicas e privadas a avaliar, comunicar e gerenciar os riscos.

De acordo com Tesfamariam *et al.* (2010) a gestão de riscos é desenvolvida para garantir que o risco seja mantido dentro de um nível aceitável de acordo com a regulamentação, evitando qualquer efeito adverso grave ao público e ao ambiente, pela seleção de alternativas viáveis.

Dziubinsk *et al.* (2006) afirmam que para o desenvolvimento da análise de risco e para se estimar o risco dos acidentes, métodos qualitativos, semi-quantitativos e quantitativos podem ser utilizados. Métodos semi-quantitativos são aplicados para a identificação do perigo e seleção de eventos de falha. Ferramentas como HAZOP e *What-if*, utilizadas no processo para prover resultados na forma de categorias relevantes de risco, podem identificar níveis de risco. Métodos qualitativos são primariamente utilizados para verificar se o nível de segurança satisfaz os princípios contidos em regulamentos e padrões legais. As técnicas quantitativas envolvem probabilidades, baseadas no conceito de risco.

De acordo com Brito *et al.* (2010), o gerenciamento do risco é uma atividade crítica para muitos processos e instalações, principalmente para sistemas que transportam produtos perigosos. A natureza das consequências significantes de cada acidente destaca a importância do desenvolvimento apropriado e efetivo de uma técnica de gerenciamento de risco para este tipo de processo. Entretanto, a avaliação das fontes de risco distribuídas ao longo do espaço (gasodutos, por exemplo) está bastante distante de ser uma avaliação simples de se realizar.

2.1.3 Apoio Multicritério à Decisão

O apoio à decisão multicritério (MCDA) é um conjunto de métodos e técnicas desenvolvidas para apoiar organizações e pessoas na solução de problemas de decisão. No MCDA, vários pontos de vista são levados em consideração, sendo frequentemente conflitantes entre si (VINCKE, 1992; ALMEIDA, 2010).

Segundo Munda (2008), do ponto de vista operacional, a maior força dos métodos de decisão multicritério está na habilidade de analisar sob os diversos pontos de vista, questões

caracterizadas como conflitantes, permitindo uma avaliação integrada do problema em questão.

Com relação ao cenário atual mundial, as tomadas de decisão têm se tornado cada vez mais objeto de estudo, devido à grande importância associada às suas consequências.

Bishop *et al.* (2008) afirmam que decisões de uma maneira geral são bastante complexas. Muitos critérios precisam ser satisfeitos. As consequências das opções a serem avaliadas apresentam diferentes distribuições espaciais e temporais, afetando diferentes grupos de populações e gerações. Decisões são feitas também no contexto social onde percepções podem ser tão importantes quanto os fatos. Dentro deste ambiente complexo, a pesquisa na área de tomada de decisão apresenta dois aspectos: compreender e assistir o processo decisório.

De acordo com French e Geldermann *et al.* (2005) *apud* Geldermann *et al.* (2009), situações emergenciais, sejam elas provocadas por seres humanos ou pela própria natureza, necessitam de um gerenciamento efetivo e coerente envolvendo decisões complexas. Muitos objetivos conflitantes precisam ser resolvidos, prioridades precisam ser definidas, enquanto que várias perspectivas de vários Stakeholders devem convergir para um consenso. A análise de decisão multicritério (MCDA) pode auxiliar todo este processo de tomada de decisão, principalmente no contexto em que envolve incertezas e diversos objetivos conflitantes, tratado aqui nesse trabalho.

Segundo Bevilacqua e Braglia (2000), a determinação da estratégia de manutenção para cada componente em uma planta industrial é muito complexa devido às dificuldades com a aquisição de dados, o número de fatores que devem ser levados em conta (investimento requerido, problemas de segurança e ambiental, custos de falhas, confiabilidade da política, tempo médio entre falhas e tempo médio para reparo, etc.), suas subjetividades, o grande número de máquinas a serem consideradas dentro de uma planta, e ainda, para em alguns casos, o fato de que a planta pode estar sendo implantada. Para resolução desse problema, algumas abordagens de decisão multicritério (MCDM – *Multi-Criteria Decision Making*) auxiliam o decisor na tomada da decisão da estratégia de manutenção a ser adotada.

Neste contexto destaca-se o MAUT (Teoria da Utilidade Multiatributo), cujo resumo é apresentado a seguir.

2.1.4 Teoria da utilidade Multiatributo - MAUT

Souza (2005) afirma que a idéia básica da teoria da utilidade é a quantificação da desejabilidade do decisor pelos possíveis bens que poderá adquirir, associando a estes um valor que represente um critério de escolha por parte do decisor.

Segundo Afgan *et al.* (2008), MAUT leva em consideração as preferências do decisor na forma da função utilidade que é definida através de um conjunto de atributos. Proporciona um meio lógico para lidar com *tradeoffs* entre objetivos conflitantes (KEENEY e RAIFFA, 1976).

MAUT pode ser utilizado para agregar valores de preferências e conseqüências com relação às múltiplas dimensões levando em consideração as preferências do decisor e o seu comportamento, considerando casos com incerteza numa clara medida de risco (Almeida, 2010; Brito e Almeida, 2009).

No MAUT a compensação entre os critérios implica na utilização de uma função de síntese que tem como objetivo agregar todos os critérios numa única função analítica. Desta forma, a estrutura de preferências do decisor deve ser baseada numa noção compensatória (Almeida, 2010; Ferreira *et al.*, 2009). Além disso, MAUT inclui os axiomas da teoria da utilidade e ainda trata com mais de um critério. A idéia básica da teoria da utilidade é quantificar o desejo do decisor, relacionando os bens com os valores que representam uma regra de escolha para o decisor.

De acordo com Keeney e Raiffa (1976), se uma utilidade apropriada é atribuída para cada conseqüência possível e a utilidade esperada de cada alternativa é calculada, tem-se como o melhor curso de ação a alternativa com a maior utilidade esperada.

De acordo com Ferreira *et al.* (2009), a função utilidade representa um indicador que combina as dimensões da conseqüência num índice de desejabilidade. No contexto MAUT, a função utilidade multiatributo precisa ser estimada em função do domínio das conseqüências. Este função é estimada através de um protocolo estruturado, com base na estrutura axiomática da teoria da utilidade. Esta teoria permite a avaliação probabilística das conseqüências diante da incerteza.

De acordo com Keeney e Raiffa (1976), o processo de avaliação de uma função utilidade multiatributo consiste de cinco etapas: introdução da terminologia e idéia, identificação das hipóteses relevantes de independência, avaliação da função utilidade condicional, avaliação das constantes de escala e o *check* de consistência.

O primeiro passo consiste no entendimento do decisor com relação ao propósito da função utilidade, além da compreensão do espaço das consequências. Neste sentido, Gomes *et al.* (2006) afirmam que um dos esclarecimentos mais importantes ao decisor é a questão de que não existe uma preferência ótima a ser definida e sim um conjunto de consequências em que o decisor demonstra suas preferências. Sendo assim, como as preferências são representações da subjetividade do decisor, não se verifica uma preferência correta. Elas retratam sua particular estrutura de preferências.

O segundo passo consiste na identificação de alguns pressupostos de independência que são verdadeiros para o decisor com relação aos critérios que estão sendo considerados. O entendimento de alguns conceitos é importante nesta etapa (Keeney e Raiffa, 1976).

Segundo Keeney e Raiffa (1976), um atributo Z_1 é independente em utilidade de um atributo Z_2 quando as preferências condicionais por loterias em Z_1 diante de um nível de Z_2 fixado não dependem do nível particular de Z_2 .

Esta independência consiste num dos tipos de condição de independência de preferências do decisor entre os atributos, de forma a simplificar bastante os cálculos para a obtenção da função utilidade multiatributo. Caso contrário, a obtenção desta função se dará de forma mais complexa.

Keeney e Raiffa (1976) afirmam também que dois atributos (Z_1 e Z_2) são aditivamente independentes se duas loterias “L” e “L'” forem igualmente preferíveis para todo (Z_1 e Z_2) e para um Z_1' e Z_2' arbitrariamente escolhidos conforme a Figura 2. Isto significa que em cada uma das loterias verifica-se a possibilidade de 50% de chance de se obter Z_1 ou Z_1' , independente do valor de Z_2 .

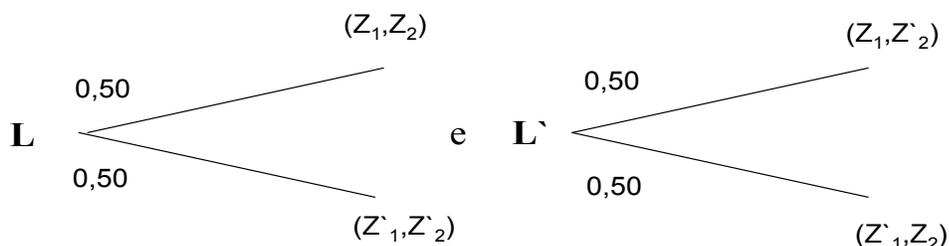


Figura 2.2. Loterias para verificação da propriedade de independência aditiva

O terceiro passo consiste basicamente na eliciação da função utilidade unidimensional para cada critério. Esta função pode ser obtida basicamente através da avaliação direta ou através de procedimentos descritos em Keeney e Raiffa (1976) para sua estimação.

O quarto passo consiste na avaliação das constantes de escala e depende da situação verificada no segundo passo. Se a independência aditiva é verificada, pode-se fazer uso de loterias para a identificação dos valores destas constantes.

O quinto passo consiste na implementação do modelo para identificar o decisor além do responsável pelo ajuste dos parâmetros do modelo. A independência aditiva e a independência em utilidade devem ser checadas para se estimar a função utilidade.

O último passo consiste na verificação da consistência dos resultados, além da variabilidade dos resultados a partir da alteração de alguns parâmetros. Devido à incerteza associada aos parâmetros do modelo, esta fase pode capturar o impacto dos resultados pelo uso de uma análise de sensibilidade no modelo.

2.2 Revisão Bibliográfica sobre RCM

Este item apresenta a revisão bibliográfica referente a aspectos relacionados à manutenção centrada em confiabilidade.

O desenvolvimento de uma metodologia sistemática que pode ser aplicada genericamente com o objetivo de selecionar máquinas críticas e desenvolver uma política de manutenção ótima baseado em dados de confiabilidade das máquinas, consequências da falha do sistema associadas às questões ambientais e de segurança, além de componentes críticos é verificado (ABDUL-NOUR *et al.*, 1998).

O método RCAM (Reliability-centered asset maintenance) é proposto com o intuito de estabelecer uma relação quantitativa entre a manutenção preventiva de ativos físicos e o custo total de manutenção. Este método é desenvolvido a partir dos princípios do RCM na tentativa de estreitar a relação entre o impacto da manutenção e o custo e a confiabilidade do sistema, tendo sido aplicado em sistemas de distribuição de energia (BERTLING *et al.*, 2005).

Com o intuito de aumentar a eficiência da análise RCM, um tipo de tecnologia de inteligência artificial denominada de CBR (case-based reasoning) foi introduzido dentro do processo, sendo estudada uma estrutura para a análise inteligente RCM denominada IRCMA. A idéia da IRCMA se baseia no fato de que registros históricos da análise RCM de itens similares podem ser referenciados e utilizados pela análise atual RCM de um novo item. Por

conta de que muitos itens comuns ou similares existem no equipamento analisado, as atividades repetidas da análise RCM podem ser consideravelmente simplificadas ou evitadas pela revisão de casos similares na condução da análise RCM (CHENG *et al.*, 2008).

A escolha da melhor estratégia de manutenção é um dos principais pontos da abordagem RCM. Porém, incertezas relacionadas ao processo decisório desta abordagem também são verificadas. Estas incertezas podem ser inaceitáveis em muitas aplicações práticas, conduzindo a estratégias de manutenção incoerentes. Diante desta situação, uma abordagem alternativa é apresentada para a correção desta questão, sendo exemplificada pela discussão de um sistema de detecção de incêndio (EISINGER e RAKOWSKI, 2001).

Um novo *framework* para a aplicação do RCM nas fases iniciais de projeto de um processo químico industrial é verificado. Algoritmos *fuzzy* foram desenvolvidos para avaliar a probabilidade da precipitação e agravamento dos modos de falha dos equipamentos. Além disso, um esquema que considera o local, o produto e o efeito de máquinas adjacentes foi desenvolvido para priorizar os modos de falha dos equipamentos mais susceptíveis a precipitação no processo. Esta nova abordagem foi implementada através de um sistema computacional que oferece ao usuário um diagrama de disponibilidade associado ao RCM, onde se verifica uma listagem com todos os modos de falha de máquinas consideradas críticas, priorizados a partir do impacto negativo no processo (FONSECA e KNAPP, 2000).

A fim de apoiar o processo decisório associado ao planejamento da manutenção preventiva, buscando aumentar a confiabilidade da planta/sistema de uma planta de energia nuclear, foi desenvolvido um programa denominado SRI (Systematic Reliability Improvement). Este programa possibilita a seleção de um plano de manutenção preventiva utilizando um sistema computadorizado que integra três subsistemas desenvolvidos na estação de trabalho considerada: um subsistema de apoio ao gerenciamento da manutenção, um subsistema de base de dados que permite gerenciar os modos de falha do componente/sistema e suas características e um subsistema de apoio para o gerenciamento das manutenções preventivas (SHIMIZU *et al.*, 1993)

Uma abordagem para identificação da programação ótima da manutenção para os componentes de um sistema de produção é apresentada. Objetivos associados à segurança, saúde e meio ambiente, custos de manutenção e custos referentes a perda de produção também são considerados, sendo a manutenção otimizada com relação aos múltiplos objetivos. Esta abordagem emprega conhecimentos de várias áreas como teoria da decisão,

análise de risco e confiabilidade. Além disso, faz-se necessária uma exigência de uma estreita relação de cooperação entre as pessoas envolvidas (VATN *et al.*, 1996).

Um sistema baseado no conhecimento para a avaliação de equipamentos industriais, em termos da criticidade da manutenção preventiva é apresentado. A metodologia de avaliação determinística com base nos princípios da manutenção centrada na confiabilidade constitui a lógica do modelo analítico do sistema. O resultado final gerado pelo sistema consiste em um listagem dos equipamentos que devem receber consideração especial para fins de manutenção, com a descrição de possíveis modos de falha para os componentes das máquinas (FONSECA,2000).

Um estudo piloto é desenvolvido utilizando a técnica PSA (*Probabilistic Safety Assessment*) no RCM. É discutida a questão de como se reflete o efeito da indisponibilidade de um componente através das atividades de manutenção como a manutenção preventiva. Baseado nesta discussão um modelo é estabelecido para a otimização global da manutenção numa planta de energia nuclear. Um algoritmo genético é aplicado para resolver este modelo, obtendo a estratégia global de manutenção ótima (JIEJUAN *et al.*, 2004).

Uma abordagem é proposta para o reconhecimento do conjunto mais adequado de tarefas que permitam a identificação de atividades eficientes e aplicáveis que previnam os componentes de desenvolver suas causas de falhas dominantes, atingindo níveis próprios de disponibilidade de componentes a baixo custo. Esta abordagem envolve a integração das atividades de manutenção e requisitos de fiscalização para cada componente crítico com base na indisponibilidade e custos associados com cada atividade desenvolvida (MARTORELL *et al.*, 1995).

Os fundamentos de uma metodologia para um programa de avaliação de manutenção são propostos. Este programa se baseia em indicadores de manutenção (alguns dados são provenientes da abordagem RCM) e na sua aplicação para o monitoramento da eficácia da manutenção em plantas de energia nuclear. Esta metodologia é abrangente, podendo ser aplicada em outros campos da engenharia industrial, particularmente, naquelas atividades que consomem muitos recursos para a manutenção dos equipamentos da planta.ou apresentam manutenção crítica (MARTORELL *et al.*, 1999).

O conceito de RCM foi aplicado neste estudo em uma indústria metalúrgica de médio porte. Pela aplicação sistemática da metodologia RCM, falhas, suas causas e seus efeitos com relação ao sistema são analisados. A fim de preservar a função do sistema, categorias de

manutenção preventiva são sugeridas para vários modos de falha dos componentes (DESHPANDE e MODAK, 2002a).

Uma aplicação do conceito de RCM é verificada num processo de uma indústria siderúrgica de médio porte. Falhas e modos de falha são analisados através da aplicação sistemática da metodologia RCM. Para a preservação da função sistêmica, atividades de manutenção preventiva são direcionadas para os modos de falha. Um programa de manutenção preventiva para o sistema, baseado no RCM, é formulado e comparado com programas de manutenção preventiva existentes na empresa. Ao longo do estudo é verificado que atividades baseadas no RCM não precisam necessariamente aumentar a frequência da manutenção baseada em prioridades funcionais, podendo manter esta frequência estável ou mesmo em situação de decréscimo. O RCM pode também recomendar atividades de manutenção adicionais (DESHPANDE e MODAK, 2002b).

Uma nova abordagem do RCM é proposta neste estudo, onde os conceitos associados a idade do equipamento e denominados de *soft life* e *hard life* são utilizados na otimização do custo total de manutenção. Por simplificação, apenas um modo de falha é considerado para cada componente. Entretanto o modelo pode ser aplicado para múltiplos modos de falha. O modelo proposto é aplicado para definir políticas de manutenção ótima para motores militares através da utilização de uma simulação Monte Carlo (CROCKER e KUMAR, 2000).

2.3 Revisão Bibliográfica sobre análise de risco em dutos

Este item apresenta a revisão bibliográfica referente a aspectos relacionados tanto à análise de risco em dutos que transportam produtos químicos quanto aos que transportam, de maneira mais específica, o hidrogênio.

2.3.1 Aspectos relacionados à análise de risco em dutos químicos

O interesse pela confiabilidade no setor energético vem aumentando ao longo do tempo devido ao aumento de demanda e a instabilidade política de determinadas regiões no mundo. Neste contexto, um método para avaliar a confiabilidade dos sistemas de abastecimento de energia em termos de adequação e segurança é proposto, sendo uma derivação da avaliação da confiabilidade desenvolvida para o setor elétrico, onde foram incluídas considerações qualitativas, podendo ser aplicável a novos setores energéticos. Incorpora o processo de tomada de decisão baseado na opinião do especialista e na teoria da utilidade multiatributo (McCARTHY *et al.*, 2007).

O desenvolvimento e a validação de um modelo de simulação numérica baseado no método das características que prevêem taxas de liberação decorrentes de furos de gasodutos contendo misturas de hidrocarbonetos a elevadas pressões é verificado. O modelo considera o comportamento real do fluido, o fluxo radial e axial, assim como a localização do furo com relação ao comprimento do gasoduto. Pode ser aplicado em fluxos isolados e não isolados, onde o bombeamento a elevadas pressões continua apesar do furo. O modelo é aplicado para um furo hipotético de um gasoduto pressurizado contendo uma mistura condensável de hidrocarbonetos (OKE *et al.*, 2003).

Com o intuito de ampliar os recursos técnicos para o processo de segurança e integridade dos equipamentos através de troca de informações, tecnologias e conhecimentos entre as partes, um comparativo entre duas operadoras de gasodutos e seus processos de operação é realizado. Ressalta-se como as similaridades e diferenças entre práticas operacionais, instalações e ativos físicos afetam as suas respectivas culturas e ações para o processo de segurança (DEWOLF, 2003).

A utilização do princípio básico dos airbags utilizados em automóveis para a construção de um dispositivo que evite a propagação das chamas e vazamentos químicos é proposto. Este problema pode ser verificado em indústrias onde substâncias inflamáveis são transportadas através de dutos. Dentre os benefícios esperados estão a redução significativa de custos, e a resposta rápida ao ocorrido. As pesquisas cobriram plantas industriais com carvão pulverizado e misturas de ar, líquidos em indústrias de semicondutores, linhas de transmissão de gás natural e outros gases explosivos e pó na indústria química e mineração. Os testes foram conduzidos num tubo de choque equipado com instrumentos de medição e uma câmera para registros (EINSENREICH *et al.*, 2007).

Informações completas são necessárias para a avaliação global do risco e para o gerenciamento de dutos. No entanto a obtenção, em curto espaço de tempo, de informações através da avaliação quantitativa do risco (modelos probabilísticos) é inviável. Diante disto, através da utilização de modelos probabilísticos e de indexação, é proposto o desenvolvimento de um algoritmo que supera muitas das limitações dos modelos, sendo uma técnica adequada para a avaliação global dos riscos e o gerenciamento dos dutos. 60 produtos transportados num complexo petroquímico foram avaliados. Os índices relativos de risco foram levantados em todos os trechos dos dutos. A taxa de falhas do duto foi definida com base nas diferentes causas de falha. Um modelo foi utilizado para a análise do gás cloro em diferentes concentrações. Em seguida, os resultados da análise relativa dos riscos foram

utilizados como um fator de ajuste para a correção das taxas de falha dos dutos e para o desenvolvimento de um algoritmo para a avaliação global do risco. Por fim, realizou-se a análise de sensibilidade do algoritmo (GHARABAGH *et al.*, 2009).

O desenvolvimento de uma simulação numérica para a modelagem da dinâmica dos fluidos após uma completa ruptura da rede de dutos contendo misturas de hidrocarbonetos pressurizados é proposto. Hipotéticos cenários de falhas são simulados, sendo os resultados comparados com dados experimentais. O modelo da dinâmica dos fluidos exige que sejam levados em consideração o comportamento real do fluido, além do atrito e efeitos da transferência de calor (MAHGEREFTEH *et al.*, 2006).

Vários aspectos do problema de avaliação do estado técnico de dutos de indústria química que trabalham sob cargas térmicas e mecânicas, através da discussão do processo de fadiga do material são apresentados. Métodos de análise comportamental dos materiais que compõem os dutos são utilizados, sendo determinadas áreas de máximo esforço nos dutos (OKRAJNI *et al.*, 2005).

A decisão da comissão europeia de revisar e avaliar se os dutos que transportam substâncias perigosas devem ter o mesmo nível de controle que as instalações químicas baseado nas considerações de riscos e acidentes em todo o mundo são comentados neste trabalho. O estudo verifica se já existem controles suficientes dentro da união europeia, constatando uma grande variação entre as legislações vigentes relacionadas aos acidentes, onde as mesmas raramente abordam elementos do sistema de gestão de segurança (PAPADAKIS, 2000).

As autoridades europeias têm reconhecido o perigo de ocorrência de um grave acidente relacionado aos dutos. Com base nisto, uma visão geral a respeito das políticas de controle adotadas no continente é apresentada. Destaca-se que existe aproximadamente 10000 km de dutos químicos na Europa, utilizados principalmente para o transporte de etileno e propileno, onde dutos de menor tamanho também transportam butadieno, cloro, estireno e amoníaco. Além disso, o crescimento econômico, a abertura dos mercados do leste europeu e da Europa central, bem como o processo de integração dentro da própria Europa têm impactado diretamente no aumento populacional e industrial nos arredores de aeroportos e portos. Neste contexto, o transporte de produtos perigosos têm merecido especial atenção, com o foco na redução do transporte destes bens através de modais de transporte tradicionais. Dutos são considerados um meio seguro, rápido e ambientalmente correto de transportar estes bens perigosos (PAPADAKIS *et al.*, 1999).

A complexidade inerente nas tomadas de decisão relacionadas ao risco, devido a consideração de aspectos técnicos, econômicos, ambientais, políticos, psicológicos e sociais é cada vez mais destacada. Uma metodologia de análise de risco baseada em pesos é proposta com o intuito de balancear medidas de segurança com aspectos econômicos, ambientais e de qualidade. Uma revisão teórica a respeito da avaliação da segurança quanto as tomadas de decisão no desenvolvimento de projetos urbanos complexos ou rotas de transporte de materiais perigosos também é proposta (SUDDLE, 2009).

Uma metodologia de avaliação de risco para os perigos associados com o transporte de substâncias perigosas ao longo de dutos é apresentada. Composta por uma seqüência de análises e cálculos utilizados para determinação das razões básicas das falhas em dutos e suas prováveis conseqüências, leva em consideração o risco social e individual. A metodologia utiliza ainda uma combinação entre técnicas qualitativas e quantitativas utilizadas na avaliação de segurança do duto. A verificação é realizada através de uma análise de risco desenvolvida ao longo de um duto de combustível na Polônia (DZIUBINSKI *et al.*, 2006).

Uma análise de alguns parâmetros para a verificação da qualidade das informações disponíveis relacionadas a um universo de 595 acidentes envolvendo o transporte de produtos químicos perigosos em rodovias, ferrovias e dutos é realizada. Discrepâncias são observadas entre as várias origens no âmbito da análise de risco e prevenção. No final, uma avaliação qualitativa é utilizada para a definição de categorias relacionadas a qualidade da informação (HAASTRUP e BROCKHOFF, 1991).

A segurança profissional na indústria química e petrolífera está diretamente associada a tomada de decisão. Diante deste cenário, verifica-se a realização de um *background* de informações relacionadas ao uso, na prática, de modelos de dispersão de gás, sem no entanto avaliá-los (GOYAL e AL-JURASHI, 1991).

Um método para a quantificação da avaliação de risco em dutos, desenvolvido pela Unidade de Avaliação de Grandes Perigos, é descrito. Detalha-se três eventos do modelo: o PROFIT, um modelo para dutos rompidos que inclui efeitos termodinâmicos e compressibilidade, o MAJESTIC, modelo relacionado a radiação térmica e o DISPI, modelo que utiliza trigonometria elíptica, trabalhando em cima de nuvens de vapor inflamável dispersas. A aplicação do método é feita para um típico duto de alta pressão (CARTER, 1991).

Uma aplicação de lógica fuzzy para a avaliação do risco no transporte de materiais perigosos por rodovias e dutos é apresentada, com o intuito de analisar as incertezas que afetam tanto as estimativas de risco pessoais como as sociais. Os parâmetros de entrada, assim como os resultados, são descritos por números fuzzy sendo os cálculos efetuados utilizando a aritmética fuzzy. O trabalho proposto busca justificar algumas questões relacionadas ao uso da lógica fuzzy no campo da simulação da análise de risco. Através da análise de sensibilidade e da incerteza da avaliação do risco, verifica-se o efeito de cada entrada apresenta no resultado da saída num cenário de incerteza (BONVICINI *et al.*, 1998).

Uma avaliação de riscos baseada numa abordagem de matrizes desenvolvida para determinar os riscos associados a alta pressão de vapores de líquidos transportados em dutos é abordada, envolvendo o desenvolvimento de uma matriz representando seções de 100 metros de dutos com aproximadamente 30 fatores de risco que descrevem a seção do mesmo. Uma matriz receptora é construída para considerar cada hectare de terra dentro de um quilômetro do sistema dutoviário. Esta abordagem permite a determinação do risco como uma função de localização e de separação, a partir do duto e, por sua vez, permite a determinação das áreas onde se verifica picos de risco. Além disso, garante que a geometria linear relacionada ao risco em dutos tenham sido modeladas com precisão. O resultado dos riscos estimados são comparados com relação ao limiar de risco MIACC (medida de risco baseada na geografia) e com padrões internos corporativos (medidas de risco sociais). Desta forma, a aceitabilidade do risco a partir da perspectiva tanto do impacto potencial do mesmo na comunidade quanto no operador do duto pode ser mensurado. Com isto, a empresa passa a ter uma visualização dos riscos associados aos dutos, tendo uma maior capacidade de otimizar o gerenciamento dos riscos e dos programas de preservação dos dutos (HENSELWOOD e PHILLIPS, 2006).

Um procedimento probabilístico para avaliação de fissuras locais em dutos sujeitos a múltiplas rachaduras (*cracking*) em serviços é exposto. Um modelo de simulação numérica é então aplicado para estabelecer uma relação entre as proximidades das rachaduras e as condições sobre as quais elas não podem coalescer. Baseado nestes resultados, uma simulação Monte Carlo é aplicada para estabelecer uma correlação entre a população existente de rachaduras e a confiabilidade dos dutos afetados pelos danos. Sendo assim, a relação entre a probabilidade de falha e a resistência dos dutos é investigada (MOUSSA, 1998).

Os riscos associados ao transporte químico podem ser analisados através de uma abordagem qualitativa, utilizando a metodologia de análise da vulnerabilidade de segurança (Security vulnerability analysis - SVA) a partir de guias desenvolvidos por duas instituições americanas: O Instituto Americano de Petróleo e a Associação Nacional das Petroquímicas e Refinarias (MOORE, 2006).

2.3.2 Aspectos associados à análise de risco em dutos de transporte de Hidrogênio

O hidrogênio vem ganhando destaque como um possível substituto para o óleo no setor de transporte. O hidrogênio não é uma fonte de energia primária, mas pode ser produzido a partir de outras fontes de energia. Um cenário futuro baseado na utilização do hidrogênio necessitará de novas infraestruturas para produção, armazenamento, distribuição e utilização do mesmo. O hidrogênio pode ser produzido em grande ou pequena escala. A produção em larga escala requerirá a utilização de dutos e/ou caminhões. O maior desafio deste planejamento está na garantia de segurança para todo o processo e conseqüentemente para toda a sociedade. Dentro deste contexto, alguns cenários para o desenvolvimento do hidrogênio são expostos, sendo discutidos aspectos de segurança relacionados a infraestrutura futura para a economia do hidrogênio (MARKET *et al.*, 2007).

O Hidrogênio é considerado a fonte de energia mais importante do futuro, reduzindo significativamente a emissão de gases nocivos ao meio ambiente. O modal de transporte de Hidrogênio que apresenta o menor custo, para grandes quantidades transportadas, é o duto. Porém, a sua ruptura pode trazer resultados ameaçadores para populações vizinhas no ponto de falha. Uma abordagem quantitativa do dimensionamento da área do solo afetada pela falha dos dutos de transporte é proposta, onde equações são utilizadas na análise de risco, proporcionando um melhor gerenciamento quanto a segurança dos dutos de transporte de hidrogênio (JO e AHN, 2006).

Uma descrição a respeito da metodologia e os resultados obtidos de uma avaliação de risco associada com o transporte de Hidrogênio é realizada. A quantificação do risco é obtida através de simulações por meio de um *software* especificamente desenvolvido para tratar dos perigos associados ao processo. Um número de cenários e locais são definidos em ordem de se avaliar o risco associado com diferentes meios de transporte, diante de várias condições ambientais. Resultados são comparados com limites de aceitabilidade social do risco de alguns países (GERBONI e SALVADOR, 2009).

No contexto das atividades experimentais e teóricas relacionadas a prevenção de fogo no transporte de hidrogênio através de dutos, alguns resultados são apresentados. Do ponto de vista teórico um documento foi elaborado, contendo instruções para o uso do gás Hidrogênio. Do ponto de vista experimental, simulações da liberação de Hidrogênio a partir de dutos, com ou sem ignição do mesmo com ar são realizadas. Os dados experimentais obtidos servem para complementação do documento desenvolvido, contendo instruções sobre distâncias de segurança, que será discutido com *Stakeholders* envolvidos com aplicações relacionadas ao Hidrogênio (GRASSO *et al.*, 2009).

Considerando-se questões de segurança, uma comparação entre dutos de hidrogênio com dutos de gás natural é efetuada sem contabilizar aspectos tecnológicos. Através da utilização de uma ferramenta denominada CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é possível investigar efeitos de diferentes propriedades como densidade, viscosidade e limites de inflamabilidade tanto do hidrogênio como do metano no processo de dispersão. Além disso, a ferramenta possibilita estudar a influência de diferentes cenários de liberação, além de configurações geométricas e atmosféricas. Uma liberação acidental de gás do duto é simulada. Para os cenários assumidos, uma grande quantidade de mistura inflamável é observada no caso da liberação do hidrogênio. Por outro lado, devido a fluatuabilidade e a uma maior velocidade de liberação, as nuvens de hidrogênio estão mais distantes do nível do solo do que as nuvens de metano, diminuindo a probabilidade de ignição e reduzindo a aceleração da chama devido a obstáculos no caso de ignição. Resultados sobre o efeito do vento nos cenários de liberação são também descritos (WILKENING e BARALDI, 2007).

Uma análise da falha ocorrida num duto de aço inoxidável que transportava hidrogênio para um reator de uma indústria petroquímica é apresentada. O vazamento foi observado no duto durante sua operação. Estudos revelaram que a causa da falha foi a ação do cloreto na tubulação, ocasionando a sua corrosão e posterior rachadura (KUMAR *et al.*, 2008).

Um modelo matemático que descreve um processo de transferência de massa é apresentado, levando em consideração o modo não estacionário de saída para a atmosfera do gás hidrogênio no caso de haver um contra fluxo do ar na saída do gasoduto. O cálculo da dependência, permitindo a estimativa de um nível seguro para a redução da velocidade de saída do hidrogênio, obtido a partir do modelo matemático e dados experimentais para o

modo estacionário do fluxo de saída do hidrogênio para a atmosfera é proposto. Por fim, a estrutura do dispositivo de ventilação (saída), garantindo a segurança operacional da utilização de hidrogênio em sistemas de ventilação (saída) de gases para a atmosfera, também é proposto (KHRISTENKOY *et al.*, 1999).

2.4 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho

Inicialmente deve-se destacar a importância da utilização do MAUT nos modelos multicritério desenvolvidos neste trabalho. A escolha do MAUT se deve ao fato do mesmo apresentar um protocolo bem estruturado, apoiado por uma estrutura axiomática bastante sólida e consistente para decisões que envolvem vários critérios. Além disso, segundo Almeida (2010), na etapa de modelagem probabilística as incertezas são inseridas dentro da estrutura axiomática possibilitando uma abordagem mais consistente com relação à aplicação do MAUT em problemas de decisão multicritério sob situações de incerteza. Esta etapa da modelagem probabilística é um complemento à modelagem de preferências do decisor.

Quanto à aplicação de modelos multicritério no gerenciamento da manutenção, mais especificamente se tratando da manutenção centrada em confiabilidade, não foi verificada nenhuma proposição de modelagem multicritério que utilizasse a teoria da utilidade multiatributo. No modelo proposto neste trabalho, MAUT é aplicado para a análise quantitativa das consequências das falhas, levando em consideração as preferências e os julgamentos de valor do decisor. Através da aplicação deste modelo o decisor se depara com resultados mais significativos que podem ser utilizados como dados de entrada no processo de gerenciamento da manutenção.

Com relação a gestão de riscos, verifica-se que alguns estudos de risco publicados na literatura tratam com aspectos da avaliação do risco relacionados ao transporte de hidrogênio através dos gasodutos ((JO e AHN (2006); GERBONI e SALVADOR (2009); RIGAS e SKLAVOUNOS (2005)). No entanto, ao longo da pesquisa realizada na literatura não se verificou nenhuma aplicação de modelos multicritério associados à análise de risco relacionada ao hidrogênio. Trabalhos como os de Brito *et al.* (2010) e Brito e Almeida (2009) que incorporam modelos multicritério para a avaliação de riscos podem ser encontrados na literatura, porém dentro do contexto do gás natural. Foi observado ainda que existem muitos estudos publicados que consideram apenas uma única dimensão na análise do risco. Brito e Almeida (2009) reforçam este ponto quando afirmam que existem algumas limitações com relação aos métodos tradicionais de análise e avaliação dos riscos aplicados em gasodutos.

Estas abordagens não consideram as múltiplas dimensões que os impactos dos acidentes podem causar com relação às dimensões a serem consideradas. Como se verifica depois de acidentes com gasodutos em várias partes do mundo, apenas questões relacionadas a uma única dimensão são consideradas, o que torna o estudo inadequado quando comparado à complexidade das questões envolvidas. Desta forma, verifica-se a importância deste trabalho a partir do momento que o mesmo propõe um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para a análise dos riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio.

3 MODELO DE DECISÃO INTEGRANDO MÉTODO MULTICRITÉRIO COM A ABORDAGEM DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

Este capítulo apresenta um modelo de decisão multicritério para a avaliação das consequências das falhas obtidas através da abordagem RCM.

3.1 Modelo de Decisão Multicritério

O modelo de decisão proposto consiste na melhoria da abordagem RCM, incorporando contribuições de um método de decisão multicritério. O método escolhido é o MAUT que incorpora a base probabilística necessária para a análise.

Primeiramente, faz-se necessário um comparativo entre a abordagem clássica do RCM e a abordagem RCM com a incorporação do modelo multicritério. Este comparativo pode ser verificado através das Figuras 3.1 e 3.2 que procuram, de forma concisa, mostrar as etapas de ambos. Explicações mais detalhadas são destacadas ao longo do texto.

Conforme Hipkin e Lockett (1995), o RCM estabelece requisitos funcionais e padrões de desempenho desejáveis dos equipamentos. Para cada função, falhas funcionais são definidas, sendo os modos de falha e os efeitos das falhas funcionais analisados através do FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*). As consequências de cada falha são analisadas pelos impactos que decorrem dos efeitos dos modos de falha, enquadrando-se numa das quatro categorias: ocultas, associadas à segurança ou ao meio ambiente, operacionais e não operacionais. De acordo com Siqueira (2005), os níveis de tolerância aceitáveis deverão ser estabelecidos através de uma matriz de riscos quando do estudo dos efeitos das falhas. A aceitabilidade do risco deve ser definida pelo gestor da instalação, sendo gerada na matriz de riscos para cada par de valores de severidade e frequência.

Atividades proativas de manutenção (restauração planejada, descarte planejado e manutenção baseada na condição) podem ser executadas com o intuito de prevenir a ocorrência das falhas desde que a aplicabilidade e critérios de eficácia para a manutenção preventiva estejam satisfeitos. Os requisitos de aplicabilidade se referem às características técnicas de possíveis atividades de manutenção e a frequência com que estas devem ocorrer. Os critérios da eficácia dependem das consequências das falhas: probabilidade de múltiplas falhas para consequências de falhas ocultas, aceitabilidade de baixos valores de risco associados às consequências que afetam a segurança e a eficácia associada ao custo para as

consequências operacionais e não operacionais. Quando os requisitos para a manutenção preventiva não são atendidos, atividades *default* (modificação de projeto e reparo funcional) e manutenções não programadas são verificadas. Todo este processo pode ser verificado na Figura 3.1 seguinte.

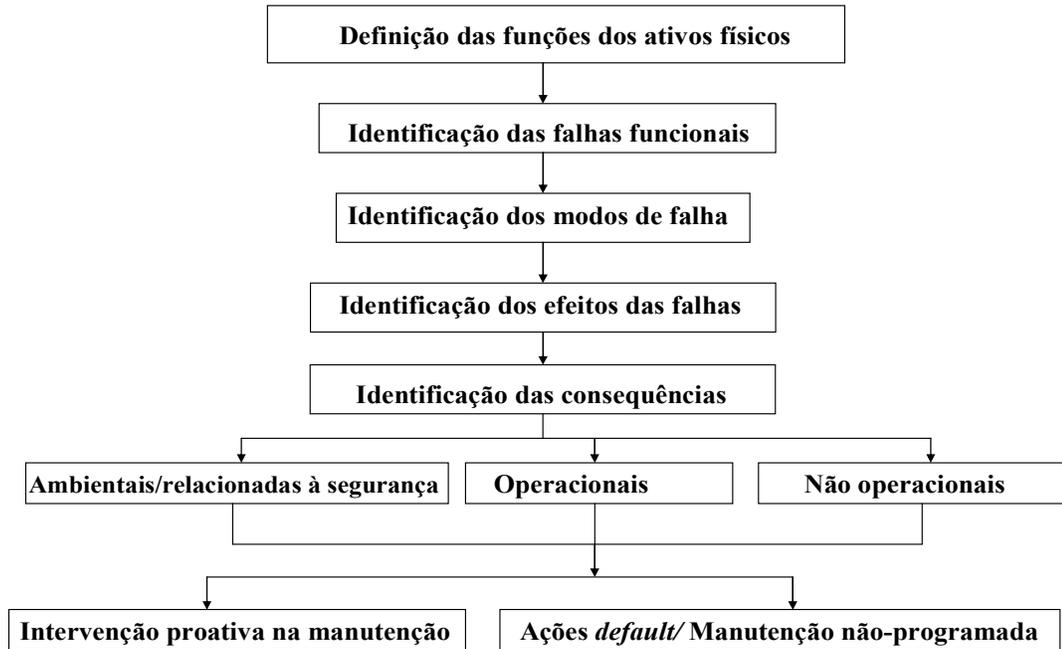


Figura 3.1 – Processo RCM (adaptado de Moubray, 2000; Hipkin e Lockett, 1995).

A Figura 3.2 retrata a inclusão do modelo multicritério proposto no processo RCM. Alguns passos do RCM são respeitados como a definição das funções dos ativos físicos, a identificação das falhas funcionais, a identificação dos modos de falha e a identificação dos efeitos das falhas.

Os componentes a serem considerados no modelo são aqueles que exercem uma função significativa dentro de um determinado sistema. Segundo Siqueira (2005) uma função será significativa se uma falha funcional provocar efeito adverso no sistema principal, tendo consequência sobre a segurança, o meio ambiente, a operação e a economia.

Uma das contribuições da nova abordagem surge na identificação e análise das consequências. As mesmas foram redefinidas. Um primeiro ponto a ser considerado na nova estruturação é a separação das consequências relacionadas à segurança e ao meio ambiente que na abordagem clássica RCM faziam parte do mesmo grupo e que agora passaram a ser consideradas separadamente, nas dimensões humana e ambiental respectivamente. Isto

decorre de questões da atualidade, pois se verifica que para uma análise das consequências de falhas de um dado equipamento ou componente se torna mais coerente esta separação, a partir do momento que questões ambientais passaram a ter uma relevância muito grande para a sociedade mundial, assim como questões associadas aos danos humanos. Outra diferenciação está no reagrupamento das consequências em cinco dimensões consideradas: as já citadas humana e ambiental e as dimensões financeira, operacional (sem interrupção e com interrupção da operação). Cada uma destas dimensões de consequências será detalhada um pouco mais adiante.

Mais uma diferenciação deste modelo proposto está na aplicação da teoria da utilidade multiatributo (MAUT) para a análise quantitativa das consequências das falhas, levando-se em consideração as preferências e os julgamentos de valor do decisor. Através da aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), busca-se a obtenção destes resultados.

É importante que o decisor tenha um bom entendimento com relação às questões vinculadas a função utilidade e entendimento do espaço das consequências. Vale lembrar que a estrutura de preferências do decisor deve estar em sintonia com os anseios da organização.

Sendo assim, novos passos são introduzidos, a partir da aplicação do MAUT:

- Identificar as dimensões das consequências; consiste em critérios relevantes para o problema e o contexto analisado.
- Análise das consequências; consiste na determinação das funções utilidade.
- Modelagem probabilística.
- Estabelecimento de índices globais da utilidade para cada item considerado.
- Definição do *ranking* das alternativas.

Cada um destes novos passos estará descrito nas próximas páginas deste capítulo.

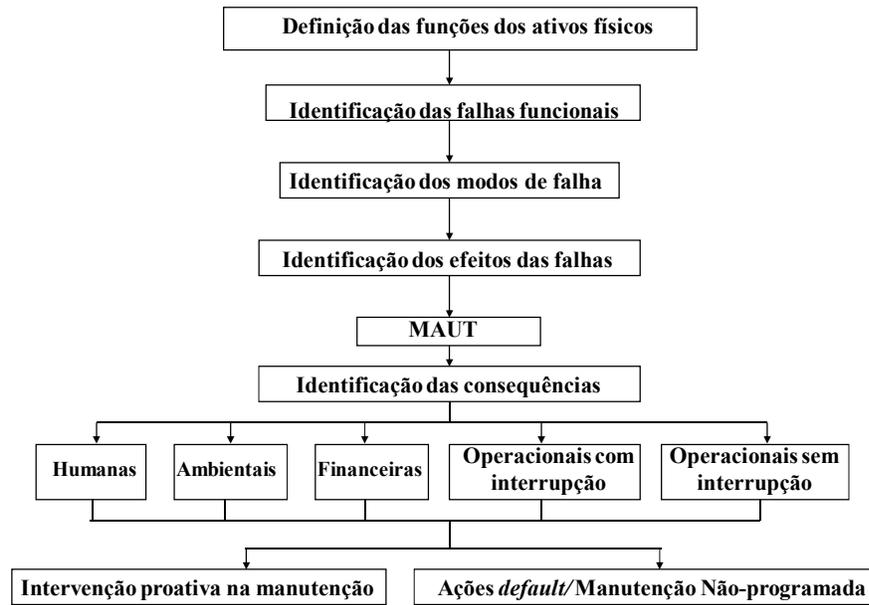


Figura 3.2 – Processo RCM com a inclusão do modelo proposto

3.1.1 Identificação das dimensões das consequências

Segundo Carretero *et al.* (2003), uma vez que as falhas são conhecidas, as consequências precisam ser levadas em consideração. Estas consequências são utilizadas como base para a tomada de decisões estratégicas relacionadas à manutenção. O processo decisório é utilizado com o intuito de selecionar as atividades mais viáveis para a manutenção do sistema. Centenas de possíveis modos de falhas de alguma instalação proporcionam efeitos diferentes quando associados a segurança, meio ambiente, operações ou custos não operacionais. De acordo com Moubray (2000), cada falha afeta a organização de alguma maneira, porém com efeitos diferentes. Podem afetar a operação, a qualidade do produto, o atendimento ao cliente, a segurança e o meio ambiente, demandando tempo e gerando custos de reparo. Carretero *et al.* (2003) destacam que as consequências das falhas definem se os recursos serão utilizados para prevenir as suas ocorrências. Isto ajuda a garantir que aquilo que será gasto na manutenção, é gasto com o que se apresenta como mais necessário, com o objetivo de garantir que a confiabilidade inerente aos equipamentos seja reforçada. Moubray (2000) afirma ainda que um ponto positivo da abordagem RCM é o reconhecimento de que as consequências da falha são mais importantes que suas características técnicas.

O modelo proposto neste trabalho avalia as consequências das falhas com base em cinco grupos, com algumas características diferentes daqueles estabelecidos pela abordagem RCM.

Estes grupos serão a partir de agora denominados de dimensões de consequências. As cinco dimensões de consequências consideradas são: dimensão humana (h), dimensão ambiental (m), dimensão financeira (f), dimensão operacional sem interrupção da operação (o⁰) e dimensão operacional com interrupção da operação (o¹).

A seguir a descrição de cada uma destas dimensões de consequências consideradas:

- Dimensão humana (h) – Nesta dimensão leva-se em conta os danos às pessoas atingidas pelas consequências das falhas. A estimativa é fornecida com base no número de pessoas atingidas.
- Dimensão ambiental (m) – Nesta dimensão de consequências, leva-se em consideração a área atingida em decorrência da falha. Como medida de estimativa, considera-se a área atingida (m²) em decorrência das consequências da falha, adotando-se o raio de alcance a partir do ponto de ocorrência da falha.
- Dimensão financeira (f) – Nesta dimensão são considerados prejuízos monetários decorrentes das falhas ocorridas. Para a estimativa das consequências são consideradas multas pagas aos clientes/compensações e custos diretos de reparo.
- Dimensão operacional sem interrupção da operação (o⁰) – Considera a influência das consequências das falhas quanto ao comportamento do sistema produtivo. A consequência da falha afeta o processo produtivo sem interromper a operação. O *downtime* é utilizado para a estimativa das consequências.
- Dimensão operacional com interrupção da operação (o¹) – Considera a influência das consequências da falha quanto ao comportamento do sistema produtivo. Porém a consequência da falha interrompe por completo a operação. Define-se o valor “0” para o estado operacional “em funcionamento” e o valor “1” para o estado operacional “parado”. O *downtime* é utilizado para a estimativas das consequências.

3.1.2 Análise das consequências

Nos dias de hoje, a análise das consequências deve satisfazer os anseios da sociedade, Estado e empresas. A magnitude e a severidade das consequências fazem com que seja necessário o desenvolvimento de um gerenciamento mais apropriado e efetivo que proporcione a obtenção de bons resultados. Além disso, verifica-se que os trabalhos publicados nesta área raramente levam em consideração as preferências e os julgamentos de

valor dos decisores (que são os responsáveis por este gerenciamento), representantes da sociedade e do Estado.

Desta forma, para a análise das consequências, serão utilizados elementos da teoria da decisão. “ θ ” é definido como estado da natureza, expressando a incerteza associada ao problema. “ A ” representa o conjunto de todas as ações possíveis consideradas, sendo as consequências representadas por “ c ”. Uma abordagem probabilística é utilizada para tratar com as incertezas associadas em “ A ”, através de uma distribuição de probabilidade sobre consequências determinísticas e a elicitación de funções utilidade para estas consequências.

Segundo Berger (1985), de modo geral, quando se avalia as consequências de possíveis ações, verifica-se que valores atribuídos às consequências não apresentam escalas de medida, não ficando claro como se avalia esta importância de uma maneira concreta. Mesmo quando se tem uma escala clara (geralmente monetária) através da qual as consequências podem ser avaliadas, esta escala possivelmente não reflete o verdadeiro “valor” para o decisor.

Ainda de acordo com Berger (1985), “ $U(\theta, a_i)$ ” é a utilidade quando o cenário “ θ ” e a ação “ a_i ” são considerados. A utilidade é calculada pela combinação da probabilidade das consequências “ c ” em “ A ” (chamada de função consequência, $P(c|\theta, a_i)$). De acordo com Keeney e Raiffa (1976), os valores das funções utilidade são definidos num intervalo de escala entre $[0,1]$ onde “0” está associado com o “menos preferível” e o valor “1” com o “mais preferível”. A função utilidade destas consequências é apresentada pela seguinte equação para casos discretos:

$$U(\theta, a_i) = \sum_c P(c|\theta, a_i)U(c) \quad (3.1)$$

Por fim, a função utilidade destas consequências para casos contínuos é apresentada pela seguinte equação:

$$U(\theta, a_i) = \int_c P(c|\theta, a_i)U(c)dc \quad (3.2)$$

Onde o cenário “ θ ” e a ação “ a_i ” são considerados. A utilidade combina a função consequência e a função utilidade destas consequências.

3.1.3 Modelagem probabilística

Segundo Vincke (1992) a escolha do MAUT como método a ser aplicado equivale a se escolher um tipo de “compensação entre os critérios”.

A elicitación das funções utilidade ocorre em um intervalo fechado de consequências, onde uma consequência nula (sem impactos) está associada ao valor máximo da utilidade,

enquanto que o valor mínimo da utilidade está relacionado com a maior das consequências estimadas.

O que se deseja neste modelo é obter uma função utilidade “U” de um indivíduo ou grupo de indivíduos cujos valores são de interesse. A abordagem utilizada consiste em subdividir a avaliação de “U” em partes, trabalhando com estas partes e posteriormente agregando-as. Isto requer que os julgamentos de valores qualitativos finais do decisor sejam afirmados e quantificados (KEENEY, 1992).

Na avaliação intracritério, ou seja, quando se subdivide a avaliação de “U” em partes, ajustes de curvas que retratam as preferências do decisor com relação às dimensões de consequências consideradas no modelo (funções utilidade unidimensionais) são realizados. Estes ajustes levam em conta o comportamento do decisor com relação ao risco. Este comportamento associado ao risco é incorporado em cada “U” pela natureza da função utilidade. Desta forma, o decisor pode se apresentar propenso, avesso ou neutro ao risco para uma determinada situação em cada uma das dimensões analisadas. Estas hipóteses associadas ao comportamento do decisor são mutuamente exclusivas e coletivamente exaustivas quando aplicadas para qualquer loteria. (KEENEY e RAIFFA, 1976).

No tocante à definição do comportamento do decisor com relação ao risco, o emprego de loterias é bastante utilizado. Desta forma, supondo que se queira calcular $u(h)$ para a dimensão humana de tal forma que $h_0 \leq h \leq h_1$, onde “ h_0 ” representa o menor valor do número de pessoas afetadas, “ h ” um valor dentro deste intervalo e “ h_1 ” o maior valor. É assumido que para a dimensão humana um nível considerado alto de pessoas afetadas seja menos preferível. Para se avaliar a atitude com relação ao risco do decisor, considera-se uma loteria 50-50 (50% chance de se obter a consequência h_0 e 50% de chance de se obter a consequência h_1) onde os extremos de “ h ” são comparados com a consequência esperada. Desta forma, pergunta-se ao decisor se uma chance 50-50 para “ h_0 ” e “ h_1 ” é preferível, indiferente ou menos preferível a uma consequência certa $\bar{h} = (h_0 + h_1)/2$. Uma preferência pela consequência certa, ou seja, uma preferência pelo valor esperado da loteria a loteria indica uma aversão ao risco.

Supondo agora o cálculo do valor de $u(f)$ para a dimensão financeira considerada, de tal forma que $f_0 \leq f \leq f_1$, onde “ f_0 ” representa o menor valor do prejuízo financeiro, “ f ” um valor dentro deste intervalo e “ f_1 ” o maior valor. É assumido que para a dimensão financeira um nível considerado alto de prejuízos financeiros seja menos preferível. Para se avaliar a

atitude com relação ao risco do decisor, considera-se uma loteria 50-50 (50% chance de se obter a consequência “ f_0 ” e 50% de chance de se obter a consequência “ f_1 ”) onde os extremos de “ f ” são comparados com a consequência esperada. Desta forma, pergunta-se ao decisor se uma chance 50-50 para “ f_0 ” e “ f_1 ” é preferível, indiferente ou menos preferível a uma consequência certa $\bar{f} = (f_0 + f_1)/2$. Uma preferência pela loteria em vez da consequência esperada indica uma propensão ao risco.

Considerando por fim que se busca o valor de $u(m)$ para a dimensão ambiental, de tal forma que $m_0 \leq m \leq m_1$, onde “ m_0 ” representa o menor valor da área atingida em decorrência da falha, “ m ” um valor dentro deste intervalo e “ m_1 ” o maior valor. É assumido que para a dimensão ambiental um nível considerado alto da área atingida em decorrência da falha seja menos preferível. Desta forma, a avaliação da atitude do decisor com relação ao risco leva em consideração os mesmos passos apresentados anteriormente para o caso de propensão e aversão ao risco por parte do decisor. Porém, a neutralidade ao risco é verificada através da indiferença entre a loteria e a consequência esperada.

As equações utilizadas neste modelo para o cálculo das funções utilidade unidimensionais levando-se em consideração as atitudes do decisor com relação ao risco são descritas a seguir:

$$U(c) = a - by \quad (3.3)$$

$$U(c) = e^{-by} \quad (3.4)$$

$$U(c) = 1 - \left(\frac{y}{\max(y)} \right)^N \quad (3.5)$$

Na equação (3.3) que representa o comportamento de neutralidade do decisor com relação ao risco, “ a ” e “ b ” > 0 são constantes que asseguram que “ $U(c)$ ” está dentro do intervalo $[0,1]$, enquanto que “ y ” representa os valores da consequência considerada numa dada dimensão de consequências. O sinal de negativo na função representa o seu decréscimo, conforme verificado na Figura 3.3:

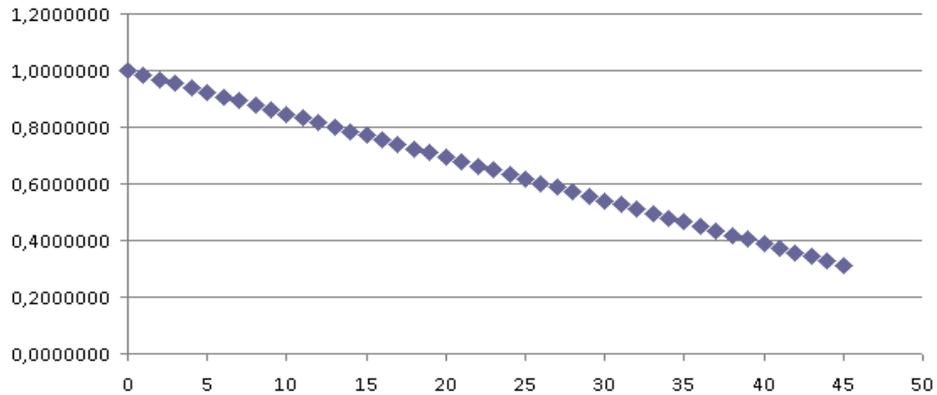


Figura 3.3 – Função utilidade unidimensional – Decisor neutro ao risco

A equação (3.4) será utilizada em situações de propensão ao risco apresentadas pelo decisor. Segundo Almeida (2005) a função exponencial da equação (3.4) é uma função tipicamente utilizada na prática. Esta função indica que quanto maior for o valor adotado para “y” mais indesejável é a situação para o decisor, onde “y” representa os valores da consequência considerada numa dada dimensão de consequências. Este tipo de comportamento do decisor pode ser representado pela Figura 3.4:

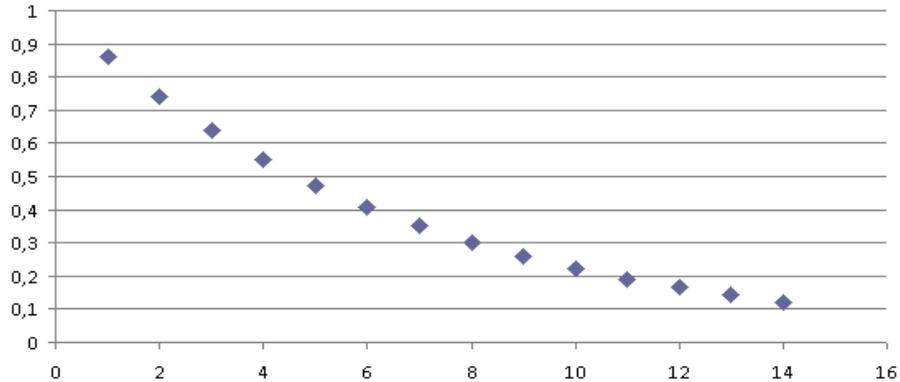


Figura 3.4 – Função utilidade unidimensional – Decisor propenso ao risco

Na equação (3.5) que representa o comportamento de aversão ao risco por parte do decisor, “y” define os valores da consequência considerada numa dada dimensão de consequências, enquanto “N” representa o fator de ajuste da curva. Este tipo de comportamento do decisor pode ser verificado pela Figura 3.5:

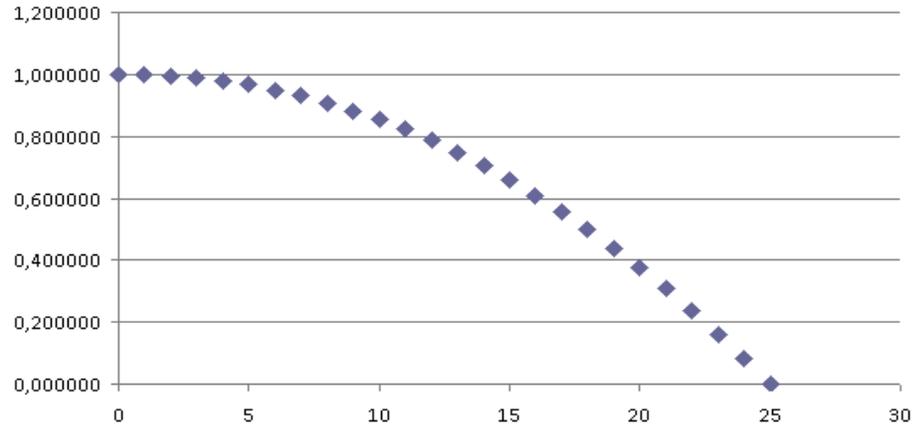


Figura 3.5 – Função utilidade unidimensional – Decisor avesso ao risco

Na avaliação intracritério, também se faz necessário a definição das funções consequência, pois a utilidade combina a função consequência e a função utilidade destas consequências. Desta forma, considerações distintas são estabelecidas para a definição da função consequência em cada uma das dimensões. Para os cálculos da utilidade nas dimensões humana, ambiental e financeira foi adotado como função consequência “ $P(c | \theta, a_i) = 1$ ”, pois considera-se que o estado da natureza é verificado e que é certo a ocorrência das consequências nestas dimensões.

Para as duas últimas dimensões a serem apresentadas (operacional sem e com interrupção da operação) foi considerado o *downtime* que ocorre após a falha. Para tal foi adotada uma função densidade de probabilidade lognormal para o cálculo da função consequência, onde a lognormal é obtida através da equação seguinte:

$$g(t | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \text{para } (t \geq 0) \quad (3.6)$$

onde t é o *downtime*, σ e μ são respectivamente o desvio e a média de $\ln t$.

A escolha desta distribuição de probabilidade se deve ao fato dela representar bem o comportamento do tempo de re-estabelecimento de sistemas (*downtime*). A distribuição lognormal descreve muito bem esta situação de manutenibilidade (Almeida e Souza, 2001).

Ainda com relação às avaliações intracritério, serão consideradas duas situações quanto ao cenário de falhas que não poderão ocorrer simultaneamente. A primeira situação possível refere-se à existência de um cenário de falha de um dado componente, representado por “ θ ” com probabilidade de ocorrência “ $\pi(\theta) = \pi$ ” e utilidade unidimensional “ $U(\theta, a_i) = x$ ”, com “ $0 \leq x < 1$ ”. A segunda situação está relacionada com a possível existência de um cenário da

não ocorrência de falha representado por “ θ' ”, com probabilidade de ocorrência “ $\pi(\theta')=1-\pi$ ” e utilidade $U(\theta',a_i)=1$, conforme Figura 3.6. A soma destas probabilidades deve ser igual a 1 (“ $\pi(\theta)+\pi(\theta')=1$ ”), sendo a utilidade unidimensional “U” obtida por:

$$U = U(\theta, a_i)\pi(\theta) + U(\theta', a_i)\pi(\theta') \quad (3.7)$$

Onde o valor de “ $U(\theta, a_i)$ ” definido no intervalo pode ser obtido pelas equações (3.1) ou (3.2). O valor de “ $U(\theta', a_i)$ ” será sempre igual a um “ $U(\theta', a_i)=1$ ”, pois isto se deve ao fato da não existência da falha estar associada sempre a situação “mais preferível” no modelo.

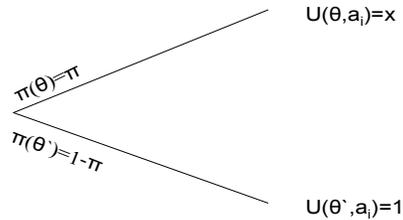


Figura 3.6 – Loteria para definição das utilidades nos cenários de “falha” e “não falha”.

O que se deseja neste modelo é obter uma função utilidade “U” de um indivíduo ou grupo de indivíduos cujos valores são de interesse. A abordagem utilizada consiste em subdividir a avaliação de “U” em partes, trabalhando com estas partes e posteriormente agregando-as. Isto requer que os julgamentos de valores qualitativos finais do decisor sejam afirmados e quantificados.

De posse dos valores de U e dos valores de K que são elicitados pelos procedimentos de eliciação baseados na comparação de loterias (Keeney e Raiffa, 1976), a função utilidade multiatributo é calculada pelas equações apresentadas na seção a seguir.

3.1.4 Estabelecimento de índices globais da utilidade

Tendo-se concluído a avaliação intracritério (onde se subdivide a avaliação de “U” em partes) e obtido as utilidades unidimensionais desejadas, é chegada a hora da união destas partes através da avaliação intercritério do método. Na avaliação intercritério a função utilidade multiatributo pode adquirir a forma de uma função aditiva ou a forma de uma função multilinear.

A função utilidade pode adquirir a forma de uma função aditiva, quando nos atributos a independência aditiva for verificada. Essa propriedade pode simplificar a obtenção da utilidade total “ $u(h, m, f, o, o)$ ”, pois permite adicionar as contribuições individuais dos atributos (KEENEY e RAIFFA, 1976).

A função utilidade aditiva pode ser representada pela expressão a seguir, o que significa independência das preferências do decisor com relação às cinco dimensões consideradas: humana (h), ambiental (m), financeira (f), operacional 1 (o') e operacional 2 (o''):

$$U(h, m, f, o', o'') = k_1U(h) + k_2U(m) + k_3U(f) + k_4U(o') + k_5U(o'') \quad (3.8)$$

Onde os “k’s” são as constantes de escala que indicam o valor do *tradeoff*. Estas constantes são elicitadas pelos procedimentos de elicitacão baseados na comparacão de loterias (KEENEY e RAIFFA,1976). A soma dos “k’s” precisa ser igual a “1” ($k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 1$).

Onde:

- “U(h)” é a função utilidade para a dimensão humana;
- “U(m)” é a função utilidade para a dimensão ambiental;
- “U(f)” é a função utilidade para a dimensão financeira;
- “U(o’)” é a função utilidade para a dimensão operacional 1;
- “U(o’’)” é a função utilidade para a dimensão operacional 2;
- “k₁” é a constante de escala da dimensão humana;
- “k₂” é a constante de escala da dimensão ambiental;
- “k₃” é a constante de escala da dimensão financeira;
- “k₄” é a constante de escala da dimensão operacional 1;
- “k₅” é a constante de escala da dimensão operacional 2;

Os valores de “U(h)”, “U(m)”, “U(f)”, “U(o’)” e “U(o’’)” são obtidos pela equacão (3.7).

De acordo com Gomes *et al.* (2006), a função utilidade aditiva apresenta certa restrição quanto às preferências do decisor, pois não permite interações entre os atributos. Isso implica que, quando utilizada a forma aditiva, não será possível verificar a situacão em que para determinados problemas de decisão, é desejável que certa quantidade de atributo dependa de uma quantidade de outro atributo.

De acordo com Keeney e Raiffa (1976), a função utilidade pode também adquirir a forma de uma função utilidade multilinear que é uma forma mais genérica de representar a função utilidade, possibilitando certo tipo de interacão entre os atributos. A representacão da função utilidade por essa função pressupõe que os atributos sejam mutuamente independentes

em utilidade. A função utilidade aditiva pode ser representada pela expressão a seguir, onde apenas a título de ilustração, são representadas três das dimensões (mutuamente independentes em utilidade):

$$U(h, m, f) = k_1U(h) + k_2U(m) + k_3U(f) + k_{12}k_1k_2U(h)U(m) + k_{13}k_1k_3U(h)U(f) + k_{23}k_2k_3U(m)U(f) + k_{123}k_1k_2k_3U(h)U(m)U(f) \quad (3.9)$$

Onde o parâmetro “k” da função utilidade multilinear representa a interação de preferências dos atributos para o decisor.

3.1.5 Ranking das alternativas

Devido à estrutura axiomática da teoria da utilidade, um outro tipo de informação se torna viável: o *ranking* dos valores das utilidades multiatributo obtidos a partir da equação (3.8) ou (3.9) para cada modo de falha considerado.

De acordo com Keeney e Raiffa (1976), a escala intervalar da função utilidade permite a comparação de incrementos de utilidade em relação aos modos de falha. Por conta desta escala intervalar, não é possível afirmar que a utilidade associada a um modo de falha “MF_i” seja “Z” vezes maior que a utilidade associada a um modo de falha “MF_j” qualquer. No entanto, é possível afirmar que a diferença “U(MF_i)_{β_i} - U(MF_j)_{β_{i+1}}” é “Z” vezes maior que a diferença “U(MF_i)_{β_{i+1}} - U(MF_j)_{β_{i+2}}”. Isto pode ser observado a partir da razão de incremento destas diferenças “RI” apresentada por “RI = (U(MF_i)_{β_i} - U(MF_j)_{β_{i+1}}) / (U(MF_j)_{β_{i+1}} - U(MF_k)_{β_{i+2}})”.

3.2 Aplicação Numérica

A seguir são apresentadas duas aplicações numéricas para ilustrar a utilização do modelo de decisão proposto. A função utilidade nas duas aplicações é considerada aditiva, o que significa independência das preferências do decisor com relação a estas dimensões consideradas (KEENEY e RAIFFA, 1976), observando claramente a distinção para independência estatística.. Ou seja, nas aplicações numéricas verifica-se uma independência preferencial, pois a alteração de um determinado atributo não interfere nas preferências do decisor com relação a outro atributo qualquer considerado.

3.2.1 Aplicação Numérica 1

Para esta primeira aplicação do modelo multicritério de decisão será considerado um exemplo onde serão selecionados 18 componentes considerados como os mais relevantes para

um sistema produtivo. Considera-se a existência de apenas um usuário para este sistema além de cinco dimensões para a estimação do conjunto de consequências: humana (h), ambiental (e), financeira (f), operacional sem interrupção da operação (o`) e operacional com interrupção da operação (o”). Uma conversão de escala é introduzida nas Tabelas 3.2 à 3.6 a fim de facilitar a interpretação dos valores obtidos das utilidades. Para cada componente “i” considerado no sistema, foi adotado um modo de falha “MF_i” e sua respectiva probabilidade de ocorrência “ $\pi(\theta)_i$ ”, conforme tabela 3.1:

Tabela 3.1-Componentes, modos de falha e suas respectivas probabilidades de ocorrência

Componente “i”	Modo de Falha “MF _i ”	“ $\pi(\theta)_i$ ”
1	MF ₁	0,0814
2	MF ₂	0,0616
3	MF ₃	0,0409
4	MF ₄	0,0616
5	MF ₅	0,02
6	MF ₆	0,1
7	MF ₇	0,01
8	MF ₈	0,02
9	MF ₉	0,0544
10	MF ₁₀	0,0443
11	MF ₁₁	0,04
12	MF ₁₂	0,04
13	MF ₁₃	0,05
14	MF ₁₄	0,08
15	MF ₁₅	0,1
16	MF ₁₆	0,0439
17	MF ₁₇	0,0583
18	MF ₁₈	0,0377

A estimação do conjunto de consequências é realizada para cada dimensão considerada. As utilidades unidimensionais são calculadas para cada dimensão das consequências.

A seguir um maior detalhamento do cálculo das utilidades unidimensionais:

- Dimensão humana - O valor de $U_h(\theta, a_i)$, ou seja $U_h(\theta, MF_i)$, para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_h(\theta', MF_i) = 1$ se deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(h)$ neste caso foi definida pela seguinte equação, considerando o comportamento de aversão ao risco do decisor:

$$U(h) = 1 - \left(\frac{y}{\max(y)} \right)^{3.5} \quad (3.10)$$

Onde “y” corresponde ao número de pessoas atingidas.

- Dimensão ambiental - O valor de $U_m(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_m(\theta', MF_i) = 1$ se deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. Para a definição da função $U(m)$ neste caso foi considerado o comportamento de propensão ao risco do decisor:

$$U(m) = e^{-0.1y} \quad (3.11)$$

Onde “y” corresponde à área atingida em decorrência da falha.

- Dimensão financeira - O valor de $U_f(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_f(\theta', MF_i) = 1$ se deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. Para a definição da função $U(f)$ foi considerado o comportamento de propensão ao risco do decisor:

$$U(f) = e^{-0.01 \left(\frac{y}{1000} \right)} \quad (3.12)$$

Onde “y” corresponde aos prejuízos financeiros em decorrência da falha.

- Dimensão operacional sem interrupção da operação - O valor de $U_o(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_o(\theta', MF_i) = 1$ se deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(o')$ neste caso foi definida pela seguinte equação considerando o comportamento de propensão ao risco do decisor:

$$U(o') = e^{-0.15y} \quad (3.13)$$

Onde “y” corresponde ao *downtime* decorrente da falha.

- Dimensão operacional com interrupção da operação - O valor de $U_{o''}(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_{o''}(\theta', MF_i) = 1$ deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(o'')$ neste caso foi definida pela seguinte equação considerando o comportamento de propensão ao risco do decisor:

$$U(o'') = e^{-0.15y} \quad (3.14)$$

Onde “ y ” corresponde ao *downtime* decorrente da falha.

A primeira dimensão analisada é a dimensão humana. O número de pessoas atingidas pela ocorrência de cada modo de falha, assim como os valores da função utilidade para o cenário de ocorrência de falhas $U(h)$ e a utilidade $U_h(\theta, MF_i)$ são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2-Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade para a dimensão humana.

Modo de Falha “MF _i ”	Nº de pessoas atingidas	U(h)	U _h (θ, MF _i)
MF ₁	2	0,99980	0,99931
MF ₂	8	0,97104	0,96255
MF ₃	15	0,73832	0,77670
MF ₄	5	0,99442	0,99307
MF ₅	22	0	0,58252
MF ₆	7	0,98187	0,96186
MF ₇	9	0,95623	0,99098
MF ₈	5	0,99442	0,99792
MF ₉	1	1	1
MF ₁₀	3	0,99910	0,99931
MF ₁₁	8	0,97104	0,97573
MF ₁₂	11	0,91165	0,92649
MF ₁₃	16	0,67196	0,65742
MF ₁₄	19	0,40138	0
MF ₁₅	14	0,79445	0,57074
MF ₁₆	8	0,97104	0,97365
MF ₁₇	9	0,95623	0,94660
MF ₁₈	4	0,99748	0,99792

A segunda dimensão a ser tratada é a ambiental (m), onde a área atingida (em m²) em decorrência das consequências da falha é adotada como estimativa. A tabela 3.3 não só apresenta estes valores para os modos de falha assim como os valores da função utilidade para o cenário de ocorrência de falhas U(m) e a utilidade U_m(θ, MF_i) para a dimensão ambiental.

Tabela 3.3- Área atingida em decorrência das falhas e valores da função utilidade para a dimensão ambiental (m) para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha “MF _i ”	Área atingida (m ²)	U(m)	U _m (θ, MF _i)
MF ₁	15	0,20863	0,29710
MF ₂	21	0,10608	0,39913
MF ₃	30	0,03206	0,56808
MF ₄	37	0,00652	0,33222
MF ₅	10	0,35608	0,85951
MF ₆	7	0,48720	0,44048
MF ₇	19	0,13370	0,90552
MF ₈	23	0,08347	0,80004
MF ₉	36	0,00917	0,41192
MF ₁₀	40	0	0,51662
MF ₁₁	33	0,01891	0,57186
MF ₁₂	0	1	1
MF ₁₃	5	0,59919	0,78137
MF ₁₄	13	0,25895	0,35312
MF ₁₅	23	0,08347	0
MF ₁₆	27	0,04980	0,55318
MF ₁₇	31	0,02723	0,38124
MF ₁₈	39	0,00196	0,58942

A terceira dimensão considerada é a financeira (f), onde são considerados prejuízos monetários decorrentes das falhas ocorridas. Para a estimativa das consequências, multas pagas aos clientes/compensações e custos diretos de reparo são levadas em conta.

Na tabela 3.4 verifica-se os valores financeiros decorrentes das consequências das falhas e os valores das funções utilidade “ $U(f)$ ” e “ $U_f(\theta, MF_i)$ ” .

Tabela 3.4- Prejuízos financeiros decorrentes das consequências das falhas e valores da função utilidade para a dimensão ambiental (f) para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha “ MF_i ”	Prejuízos financeiros (R\$)	$U(f)$	$U_f(\theta, MF_i)$
MF_1	113.207,00	0,32429	0,33998
MF_2	82.605,00	0,51646	0,61306
MF_3	193.262,00	0,02859	0,60841
MF_4	107.282,00	0,35706	0,53458
MF_5	39.353,00	0,91092	0,98710
MF_6	67.979,00	0,63127	0,41753
MF_7	80.655,00	0,53081	1
MF_8	101.306,00	0,39213	0,90423
MF_9	148.609,00	0,16426	0,51383
MF_{10}	205.888,00	0	0,55959
MF_{11}	96.746,00	0,42035	0,74381
MF_{12}	51.903,00	0,77843	0,85821
MF_{13}	139.759,00	0,19913	0,57302
MF_{14}	160.185,00	0,12308	0,22400
MF_{15}	164.625,00	0,10851	0
MF_{16}	103.656,00	0,37809	0,70378
MF_{17}	31.722,00	1	0,86286
MF_{18}	146.634,00	0,17179	0,67598

Para as duas últimas dimensões a serem apresentadas (Dimensão operacional sem e com interrupção da operação) a função consequência é calculada pela equação (3.6) da função densidade de probabilidade lognormal.

Sendo assim, a quarta dimensão a ser considerada é a operacional sem interrupção da operação (o'), onde se considera a influência das consequências das falhas quanto ao comportamento do sistema produtivo. Nesta dimensão, a consequência da falha afeta o

processo produtivo sem interromper a operação. O *downtime* é utilizado para estimar as consequências. Valores podem ser observados na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores do *downtime* e das funções utilidade para a dimensão operacional sem interrupção da operação (o') para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha “MF _i ”	<i>Downtime</i> (horas)	U(o')	U _{o'} (θ ,MF _i)
MF ₁	-	1	1
MF ₂	-	1	1
MF ₃	-	1	1
MF ₄	-	1	1
MF ₅	3.9	0,05655	0,80959
MF ₆	4.7	0,00917	0
MF ₇	5.0	0,01938	0,90106
MF ₈	5.3	0,00116	0,79838
MF ₉	-	1	1
MF ₁₀	-	1	1
MF ₁₁	3.5	0,08488	0,63059
MF ₁₂	2.9	0,15159	0,65745
MF ₁₃	5.5	0	0,49531
MF ₁₄	3.7	0,04690	0,23039
MF ₁₅	3.0	0,13074	0,12267
MF ₁₆	-	1	1
MF ₁₇	-	1	1
MF ₁₈	-	1	1

Por fim, a quinta e última dimensão a ser considerada é a operacional com interrupção da operação (o''), onde se considera a influência das consequências das falhas quanto ao comportamento do sistema produtivo. Nesta dimensão, é considerado que a consequência da falha interrompe por completo a operação. Os valores “0” e “1” são definidos para representar respectivamente o funcionamento e a interrupção da operação. O *downtime* é

utilizado para estimar as consequências das falhas, sendo considerado no estado de interrupção completa da operação. Valores podem ser observados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Valores do downtime e das funções utilidade para a dimensão operacional com interrupção da operação (o'') para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha "MF _i "	Downtime (horas)	U(o'')	U _{o''} (θ, MF _i)
MF ₁	3.0	0,12625	0
MF ₂	4.1	0,01749	0,14914
MF ₃	3.2	0,12210	0,49519
MF ₄	4.4	0	0,13387
MF ₅	-	1	1
MF ₆	-	1	1
MF ₇	-	1	1
MF ₈	-	1	1
MF ₉	2.7	0,17121	0,36613
MF ₁₀	3.3	0,11424	0,44826
MF ₁₁	-	1	1
MF ₁₂	-	1	1
MF ₁₃	-	1	1
MF ₁₄	-	1	1
MF ₁₅	-	1	1
MF ₁₆	4.5	0,00836	0,39907
MF ₁₇	3.3	0,08720	0,25177
MF ₁₈	2.7	0,17121	0,56064

Após os cálculos das utilidades para cada uma das dimensões, o próximo passo é o cálculo da função utilidade multiatributo $U(h,m,f,o',o'')$ pelo decisor. Este processo segue um protocolo estruturado (KEENEY e RAIFFA, 1976). Este processo leva em consideração entre escolhas de consequências (consequências devido a ocorrência de falhas) e loterias com probabilidades específicas entre o melhor e o pior caso. Em se tratando das constantes de escala, as mesmas são estabelecidas com base nos procedimentos de elicitación baseado na

comparação de loterias (KEENEY e RAIFFA, 1976). Os valores obtidos foram $k_1=0.18$, $k_2=0.11$, $k_3=0.25$, $k_4=0.14$ e $k_5=0.32$.

Com os valores das constantes de escala definidos, calcula-se o valor da função utilidade multiatributo para cada modo de falha através da equação (3.8). Os valores são descritos na Tabela 3.7. Uma conversão de escala é introduzida na Tabela 3.7 após a obtenção dos valores da função utilidade multiatributo a fim de facilitar a interpretação destes valores obtidos.

Tabela 3.7 – Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha considerados.

Modo de Falha “MF _i ”	U(h,m,f,o',o’)	Conversão de escala
MF ₁	0,95662	0
MF ₂	0,96604	0,23746
MF ₃	0,97497	0,46273
MF ₄	0,96364	0,17692
MF ₅	0,99326	0,92370
MF ₆	0,96816	0,29110
MF ₇	0,99628	1
MF ₈	0,99203	0,89285
MF ₉	0,96931	0,31991
MF ₁₀	0,97306	0,41461
MF ₁₁	0,98438	0,69981
MF ₁₂	0,99101	0,86703
MF ₁₃	0,98054	0,60306
MF ₁₄	0,96436	0,19524
MF ₁₅	0,95664	0,00062
MF ₁₆	0,97449	0,45054
MF ₁₇	0,97284	0,40894
MF ₁₈	0,97874	0,55765

Devido à estrutura axiomática da teoria da utilidade, um outro tipo de informação se torna viável: o *ranking* dos valores das utilidades multiatributo obtidos a partir da equação

(3.8) ou (3.9) para cada modo de falha considerado. De posse dos valores da função utilidade multiatributo para cada modo de falha considerado, um *ranking* em ordem crescente de utilidade é realizado, conforme Tabela 3.8. Os valores das utilidades definidas para cada modo de falha $U(h,m,f,o',o'')$ serão representados por $U(MF_i)_{\beta_i}$ nas tabelas 3.8 e 3.9.

Analisando os valores na Tabela 3.8, verifica-se que o modo de falha MF_1 apresenta a menor utilidade multidimensional, sendo representado pelo valor igual à zero, devido à conversão de escala introduzida para facilitar o entendimento dos valores. Conforme mencionado anteriormente, os valores das funções utilidade são definidos num intervalo de escala entre $[0,1]$ onde “0” está associado com o “menos preferível” e o valor “1” com o “mais preferível”. Desta forma, de posse destas informações, verifica-se que o modo de falha MF_1 deve ser o primeiro a receber alocação de recursos disponíveis num programa de prevenção de falhas, pois apresenta o valor mais baixo da utilidade (zero) dentre os modos de falha considerados, ou seja, representa a consequência menos preferível.

Tabela 3.8 – Ranking resultante dos valores da função utilidade multiatributo obtidos para cada modo de falha.

Posição no ranking (β_i)	Modos de Falha “ MF_i ”	$U(MF_i)_{\beta_i}$
β_1	MF_{01}	0
β_2	MF_{15}	0,00062
β_3	MF_{04}	0,17692
β_4	MF_{14}	0,19524
β_5	MF_{02}	0,23746
β_6	MF_{06}	0,29110
β_7	MF_{09}	0,31991
β_8	MF_{17}	0,40894
β_9	MF_{10}	0,41461
β_{10}	MF_{16}	0,45054
β_{11}	MF_{03}	0,46273
β_{12}	MF_{18}	0,55765
β_{13}	MF_{13}	0,60306
β_{14}	MF_{11}	0,69981
β_{15}	MF_{12}	0,86703
β_{16}	MF_{08}	0,89285
β_{17}	MF_{05}	0,92370
β_{18}	MF_{07}	1

Outro tipo de informação se torna disponível a partir da comparação de incrementos de utilidade em relação aos modos de falha. Isto pode ser verificado através da Tabela 3.9, onde “RI” significa razão de incremento.

Analisando os valores da Tabela 3.9, verifica-se que a diferença da utilidade do modo de falha MF₁₅ para a utilidade do modo de falha MF₀₄ é de “0.176298” e que a diferença de utilidade do modo de falha MF₀₄ para o modo de falha MF₁₄ é de “0.018315”. Isto quer dizer que um incremento no valor da utilidade do MF₁₅ para o MF₀₄ é aproximadamente “9.63” vezes maior que o incremento no valor da utilidade do MF₀₄ para o MF₁₄. Pelo mesmo raciocínio, um incremento no valor da utilidade do MF₀₉ para o MF₁₇ é aproximadamente “15.7” vezes maior que o incremento no valor da utilidade do MF₁₇ para o MF₁₀.

Tabela 3.9 – Comparação dos valores da utilidade e razões de incremento da utilidade entre os modos de falha considerados.

Posição no ranking (β_i)	Modo de Falha “MF _i ”	$U(MF_i)_{\beta_i} - U(MF_j)_{\beta_{i+1}}$	$RI = (U(MF_i)_{\beta_i} - U(MF_j)_{\beta_{i+1}}) / (U(MF_j)_{\beta_{i+1}} - U(MF_k)_{\beta_{i+2}})$
β_1	MF ₁	0,000622	0,003530
β_2	MF ₁₅	0,176298	9,625904
β_3	MF ₀₄	0,018315	0,433771
β_4	MF ₁₄	0,042223	0,787071
β_5	MF ₀₂	0,053645	1,862150
β_6	MF ₀₆	0,028808	0,323576
β_7	MF ₀₉	0,089031	15,707477
β_8	MF ₁₇	0,005668	0,157740
β_9	MF ₁₀	0,035933	2,947903
β_{10}	MF ₁₆	0,012189	0,128426
β_{11}	MF ₀₃	0,094913	2,089918
β_{12}	MF ₁₈	0,045415	0,469390
β_{13}	MF ₁₃	0,096752	0,578615
β_{14}	MF ₁₁	0,167214	6,474497
β_{15}	MF ₁₂	0,025827	0,837158
β_{16}	MF ₀₈	0,03085	0,404344
β_{17}	MF ₀₅	0,076297	-
β_{18}	MF ₀₇	-	-

Uma análise de sensibilidade foi realizada para a verificação da robustez do modelo, baseado nos dados e parâmetros aplicados. Os resultados mostram que o procedimento foi robusto bastante para garantir ao decisor a recomendação proposta.

3.2.2 Aplicação Numérica 2

Para esta segunda aplicação do modelo multicritério de decisão, a título de ilustração, será considerado um outro exemplo de um sistema produtivo qualquer onde será selecionado 18 componentes considerados como os mais relevantes para o sistema. Considera-se também a existência de apenas um usuário para este sistema. Foram consideradas as cinco dimensões para a estimação do conjunto de consequências: humana (h), ambiental (e), financeira (f), operacional sem interrupção da operação (o') e operacional com interrupção da operação (o''). A função utilidade é considerada aditiva nesta aplicação (Keeney e Raiffa, 1976), o que significa independência das preferências do decisor com relação as estas dimensões consideradas. Os valores das probabilidades " $\pi(\theta)$ ", alguns comportamentos do decisor com relação ao risco e alguns valores de "y" presentes em cada uma das expressões utilizadas nas dimensões foram alterados com relação a primeira aplicação. Uma conversão de escala é introduzida nas Tabelas 3.11 à 3.15 a fim de facilitar a interpretação dos valores das utilidades obtidas.

Para cada componente "i" considerado no sistema, foi adotado um modo de falha "MF_i" e sua respectiva probabilidade de ocorrência " $\pi(\theta)_n$ ", conforme tabela 3.10:

Tabela 3.10-Componentes, modos de falha e suas respectivas probabilidades de ocorrência

Componente “i”	Modo de Falha “MF _i ”	“ $\pi(\theta)_i$ ”
1	MF ₁	0,0275
2	MF ₂	0,0583
3	MF ₃	0,0817
4	MF ₄	0,0251
5	MF ₅	0,0571
6	MF ₆	0,04
7	MF ₇	0,08
8	MF ₈	0,0123
9	MF ₉	0,0901
10	MF ₁₀	0,0419
11	MF ₁₁	0,0721
12	MF ₁₂	0,10
13	MF ₁₃	0,0333
14	MF ₁₄	0,081
15	MF ₁₅	0,0456
16	MF ₁₆	0,0777
17	MF ₁₇	0,0411
18	MF ₁₈	0,11

A estimação do conjunto de consequências é realizada para cada dimensão considerada. As utilidades unidimensionais são calculadas para cada dimensão das consequências. A seguir um maior detalhamento do cálculo das utilidades unidimensionais para cada uma das dimensões das consequências consideradas nesta simulação numérica:

- Dimensão humana - O valor de $U_h(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta) = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_h(\theta', MF_i) = 1$ se deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(h)$ neste caso foi definida pela seguinte equação, considerando o comportamento de aversão ao risco do decisor:

$$U(h) = 1 - \left(\frac{y}{\max(y)} \right)^{2,1} \quad (3.15)$$

Onde “y” corresponde ao número de pessoas atingidas.

- Dimensão ambiental - O valor de $U_m(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_m(\theta', MF_i) = 1$ se deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(m)$ neste caso foi definida pela seguinte equação, considerando o comportamento de neutralidade ao risco do decisor:

$$U(m) = 1 - 0,0153y \quad (3.16)$$

Onde “y” corresponde a área atingida em decorrência da falha.

- Dimensão financeira - O valor de $U_f(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_f(\theta', MF_i) = 1$ deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(f)$ neste caso foi definida pela seguinte equação, considerando o comportamento de propensão ao risco do decisor:

$$U(f) = e^{-0,013\left(\frac{y}{1000}\right)} \quad (3.17)$$

Onde “y” corresponde aos prejuízos financeiros em decorrência da falha.

- Dimensão operacional sem interrupção da operação - O valor de $U_o'(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_o'(\theta', MF_i) = 1$ se deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(o')$ neste caso foi definida pela seguinte equação considerando o comportamento de propensão ao risco do decisor::

$$U(o') = e^{-0,15y} \quad (3.18)$$

Onde “y” corresponde ao *downtime* decorrente da falha.

- Dimensão operacional com interrupção da operação - O valor de $U_o''(\theta, MF_i)$ para esta dimensão é obtido pela expressão (3.7), onde “ $\pi(\theta') = 1 - \pi(\theta)$ ”. O valor de $U_o''(\theta', MF_i) = 1$ deve ao fato da não existência da falha estar associada a situação “mais preferível”. A função $U(o'')$ neste caso foi definida pela seguinte equação considerando o comportamento de propensão ao risco do decisor:

$$U(o'') = e^{-0,15y} \quad (3.19)$$

Onde “y” corresponde ao *downtime* decorrente da falha.

A primeira dimensão das consequências a ser analisada é a dimensão humana. O número de pessoas atingidas pela ocorrência de cada modo de falha, assim como os valores da função utilidade para o cenário de ocorrência de falhas $U(h)$ e a utilidade $U_h(\theta, MF_i)$ para a dimensão humana são apresentados na tabela 3.11

Tabela 3.11-Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade para a dimensão humana.

Modo de Falha “ MF_i ”	Nº de pessoas atingidas	$U(h)$	$U_h(\theta, MF_i)$
MF_1	22	0,16916	0,71182
MF_2	5	0,97528	0,98132
MF_3	8	0,91203	0,90375
MF_4	15	0,63538	0,88790
MF_5	3	1	1
MF_6	20	0,32219	0,65506
MF_7	10	0,85175	0,84416
MF_8	8	0,91203	0,99363
MF_9	17	0,52189	0,44204
MF_{10}	21	0,24768	0,59830
MF_{11}	19	0,39273	0,43595
MF_{12}	14	0,68629	0,59066
MF_{13}	12	0,77659	0,90856
MF_{14}	11	0,81606	0,80495
MF_{15}	18	0,45928	0,68563
MF_{16}	24	0	0,92868
MF_{17}	13	0,73336	0,86214
MF_{18}	18	0,45928	0,22845

A segunda dimensão a ser tratada é a ambiental (m), onde a área atingida (em m^2) em decorrência das consequências da falha é adotada como estimativa. A tabela 3.12 não só apresenta estes valores para os modos de falha assim como os valores da função utilidade para o cenário de ocorrência de falhas $U(m)$ e a utilidade $U_m(\theta, MF_i)$ para a dimensão ambiental.

Tabela 3.12- Área atingida em decorrência das falhas e valores da função utilidade para a dimensão ambiental (m) para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha “MF _i ”	Área atingida (m ²)	U(m)	U _m (θ,MF _i)
MF ₁	15	0,86364	1
MF ₂	20	0,75000	0,79892
MF ₃	36	0,38636	0,32525
MF ₄	45	0,18182	0,80869
MF ₅	50	0,06818	0,34827
MF ₆	22	0,70455	0,87531
MF ₇	52	0,02273	0
MF ₈	35	0,40909	0,99512
MF ₉	45	0,18182	0,02825
MF ₁₀	19	0,77273	0,89763
MF ₁₁	26	0,61364	0,60987
MF ₁₂	29	0,54545	0,33624
MF ₁₃	15	0,86364	0,97681
MF ₁₄	9	1	0,91559
MF ₁₅	25	0,63636	0,80589
MF ₁₆	40	0,29545	0,28078
MF ₁₇	53	0	0,52878
MF ₁₈	20	0,75000	0,52302

A terceira dimensão considerada é a financeira (f), onde são considerados prejuízos monetários decorrentes das falhas ocorridas. Para a estimativa das consequências, multas pagas aos clientes/compensações e custos diretos de reparo são levadas em conta.

Na tabela 3.13 verifica-se os valores financeiros decorrentes das consequências das falhas e os valores das funções utilidade “U(f)” e “U_f(θ,MF_i)” .

Tabela 3.13- Prejuízos financeiros decorrentes das consequências das falhas e valores da função utilidade para a dimensão ambiental (f) para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha “MF _i ”	Prejuízos financeiros (R\$)	U(f)	U _f (θ ,MF _i)
MF ₁	47.753,00	0,59290	0,94159
MF ₂	41.727,00	0,65094	0,78280
MF ₃	158.660,00	0,04905	0,14575
MF ₄	31.427,00	0,76132	1
MF ₅	78.400,00	0,35881	0,61872
MF ₆	109.307,00	0,20057	0,70225
MF ₇	113.507,00	0,18357	0,27615
MF ₈	131.808,00	0,11941	0,97745
MF ₉	163.060,00	0,03968	0,03749
MF ₁₀	21.231,00	0,88615	0,97704
MF ₁₁	31.502,00	0,76046	0,78525
MF ₁₂	101.381,00	0,23530	0,11967
MF ₁₃	148.559,00	0,07267	0,72766
MF ₁₄	12.980,00	1	0,94349
MF ₁₅	185.127,00	0	0,55080
MF ₁₆	128.358,00	0,13037	0,25795
MF ₁₇	131.891,00	0,11964	0,65662
MF ₁₈	105.356,00	0,21744	0

Para as duas últimas dimensões a serem apresentadas (operacional sem e com interrupção da operação) a função consequência é calculada pela equação (3.6) da função densidade de probabilidade lognormal.

Sendo assim, a quarta dimensão a ser considerada é a operacional sem interrupção da operação (o'), onde se considera a influência das consequências das falhas quanto ao comportamento do sistema produtivo. Nesta dimensão, a consequência da falha afeta o processo produtivo sem interromper a operação. O *downtime* é utilizado para estimar as consequências. Valores podem ser observados na tabela 3.14

Tabela 3.14 – Valores do downtime e das funções utilidade para a dimensão operacional sem interrupção da operação (o') para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha “MF _i ”	Downtime (horas)	U(o')	U _{o'} (θ ,MF _i)
MF ₁	-	1	1
MF ₂	-	1	1
MF ₃	-	1	1
MF ₄	-	1	1
MF ₅	3.9	0,02236	0,43365
MF ₆	4.5	0,00899	0,59790
MF ₇	5.2	0,00236	0,19036
MF ₈	3.0	0,15903	0,89506
MF ₉	-	1	1
MF ₁₀	-	1	1
MF ₁₁	4.6	0,05049	0,30558
MF ₁₂	5.5	0,01423	0
MF ₁₃	4.0	0,00348	0,66338
MF ₁₄	3.2	0	0,17833
MF ₁₅	4.3	0,06574	0,56789
MF ₁₆	-	1	1
MF ₁₇	-	1	1
MF ₁₈	-	1	1

Por fim, a quinta e última dimensão a ser considerada é a operacional com interrupção da operação (o'), onde se considera a influência das consequências das falhas quanto ao comportamento do sistema produtivo. Nesta dimensão, é considerado que a consequência da falha interrompe por completo a operação. Os valores “0” e “1” são definidos para representar respectivamente o funcionamento e a interrupção da operação. O *downtime* é utilizado para estimar as consequências das falhas, sendo considerado no estado de interrupção completa da operação. Valores podem ser observados na tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Valores do downtime e das funções utilidade para a dimensão operacional 2 (o”) para cada modo de falha considerado.

Modo de Falha “MF _i ”	Downtime (horas)	U(o’)	U _{o’} (θ, MF _i)
MF ₁	3.4	0,09763	0,76436
MF ₂	3.2	0,13218	0,51948
MF ₃	2.7	0,14595	0,33737
MF ₄	4.4	0	0,76161
MF ₅	-	1	1
MF ₆	-	1	1
MF ₇	-	1	1
MF ₈	-	1	1
MF ₉	4.2	0,04798	0,18536
MF ₁₀	4.0	0,04264	0,61905
MF ₁₁	-	1	1
MF ₁₂	-	1	1
MF ₁₃	-	1	1
MF ₁₄	-	1	1
MF ₁₅	-	1	1
MF ₁₆	5.0	0,01555	0,27361
MF ₁₇	4.0	0,01317	0,61482
MF ₁₈	4.0	0,04272	0

Após os cálculos das utilidades para cada uma das dimensões, o próximo passo é o cálculo da função utilidade multiatributo $U(h,m,f,o',o'')$ pelo decisor. Este processo segue um protocolo estruturado (KEENEY e RAIFFA, 1976). Este processo leva em consideração entre escolhas de consequências determinísticas (consequências devido a ocorrência de falhas) e loterias com probabilidades específicas entre o melhor e o pior caso. Em se tratando das constantes de escala, as mesmas são estabelecidas com base nos procedimentos de elicitação baseado na comparação de loterias (KEENEY e RAIFFA, 1976). Os valores obtidos foram $k_1=0.20$, $k_2=0.14$, $k_3=0.22$, $k_4=0.17$ e $k_5=0.27$.

Com os valores das constantes de escala definidos, calcula-se o valor da função utilidade multiatributo para cada modo de falha através da equação (3.8). Uma conversão de escala é introduzida na Tabela 3.16 após a obtenção dos valores da função utilidade multiatributo a fim de facilitar a interpretação destes valores obtidos.

Tabela 3.16 – Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha considerados.

Modo de Falha “MF _i ”	U(h,m,f,o’,o’)	Conversão de escala
MF ₁	0,98565	0,83517
MF ₂	0,97855	0,70877
MF ₃	0,95833	0,34865
MF ₄	0,98747	0,86766
MF ₅	0,97636	0,66971
MF ₆	0,97978	0,73072
MF ₇	0,96179	0,41018
MF ₈	0,99490	1
MF ₉	0,94350	0,08445
MF ₁₀	0,97981	0,73115
MF ₁₁	0,97107	0,57545
MF ₁₂	0,95522	0,29320
MF ₁₃	0,98567	0,83565
MF ₁₄	0,97919	0,72022
MF ₁₅	0,97671	0,67595
MF ₁₆	0,94527	0,11601
MF ₁₇	0,97527	0,65030
MF ₁₈	0,93876	0

Devido a estrutura axiomática da teoria da utilidade, um outro tipo de informação se torna possível, através do ranqueamento dos modos de falha. De posse dos valores da função utilidade multiatributo para cada modo de falha considerado, um ranqueamento em ordem crescente de utilidade é realizado, conforme Tabela 3.17. Os valores das utilidades definidas

para cada modo de falha $U(h,m,f,o',o)$ serão representados por $U(MF_i)_{\beta_i}$ nas tabelas 3.17 e 3.18.

Tabela 3.17 – Ranking resultante dos valores da função utilidade multiatributo obtidos para cada modo de falha.

Posição no ranking (β_i)	Modos de Falha “MF _i ”	$U(MF_i)_{\beta_i}$
β_1	MF ₁₈	0
β_2	MF ₀₉	0,08445
β_3	MF ₁₆	0,11601
β_4	MF ₁₂	0,29320
β_5	MF ₀₃	0,34865
β_6	MF ₀₇	0,41018
β_7	MF ₁₁	0,57545
β_8	MF ₁₇	0,65030
β_9	MF ₀₅	0,66971
β_{10}	MF ₁₅	0,67595
β_{11}	MF ₀₂	0,70877
β_{12}	MF ₁₄	0,72022
β_{13}	MF ₀₆	0,73072
β_{14}	MF ₁₀	0,73115
β_{15}	MF ₀₁	0,83517
β_{16}	MF ₁₃	0,83565
β_{17}	MF ₀₄	0,86766
β_{18}	MF ₀₈	1

Mediante o ranking dos valores da função utilidade multiatributo, a comparação de incrementos de utilidade em relação aos modos de falha é verificado através da Tabela 3.18, onde “RI” significa razão de incremento.

Analisando os valores da Tabela 3.18, verifica-se que a diferença da utilidade do modo de falha MF₁₄ para a utilidade do modo de falha MF₀₆ é de “0.010506” e que a diferença de utilidade do modo de falha MF₀₆ para o modo de falha MF₁₀ é de “0.000429”. Isto quer dizer que um incremento no valor da utilidade do MF₁₄ para o MF₀₆ é aproximadamente “24.5” vezes maior que o incremento no valor da utilidade do MF₀₆ para o MF₁₀. Da mesma forma, a diferença da utilidade do modo de falha MF₁₀ para a utilidade do modo de falha MF₀₁ é de “0.104019” e que a diferença de utilidade do modo de falha MF₀₁ para o modo de falha MF₁₃ é de “0.000476”. Isto quer dizer que um incremento no valor da utilidade do MF₁₀ para o MF₀₁

é aproximadamente “218.5” vezes maior que o incremento no valor da utilidade do MF₀₁ para o MF₁₃.

Tabela 3.18 – Comparação dos valores da utilidade e razões de incremento da utilidade entre os modos de falha considerados.

Posição no ranking (β_i)	Modo de Falha “MF _i ”	$U(MF_i)_{\beta_i} - U(MF_j)_{\beta_{i+1}}$	$RI = (U(MF_i)_{\beta_i} - U(MF_j)_{\beta_{i+1}}) / (U(MF_j)_{\beta_{i+1}} - U(MF_k)_{\beta_{i+2}})$
β_1	MF ₁₈	0,084448	2,675928
β_2	MF ₀₉	0,031558	0,178104
β_3	MF ₁₆	0,177191	3,195279
β_4	MF ₁₂	0,055454	0,901193
β_5	MF ₀₃	0,061534	0,372341
β_6	MF ₀₇	0,165262	2,207690
β_7	MF ₁₁	0,074857	3,856498
β_8	MF ₁₇	0,019411	3,110664
β_9	MF ₀₅	0,00624	0,190177
β_{10}	MF ₁₅	0,032812	2,865092
β_{11}	MF ₀₂	0,011452	1,090107
β_{12}	MF ₁₄	0,010506	24,4987
β_{13}	MF ₀₆	0,000429	0,004123
β_{14}	MF ₁₀	0,104019	218,545563
β_{15}	MF ₀₁	0,000476	0,014868
β_{16}	MF ₁₃	0,032012	0,241895
β_{17}	MF ₀₄	0,13234	-
β_{18}	MF ₀₈	-	-

Uma análise de sensibilidade foi realizada para a verificação da robustez do modelo, baseado nos dados e parâmetros aplicados. Os resultados mostram que o procedimento foi robusto bastante para garantir ao decisor a recomendação proposta.

3.3 Discussão de Resultados

As dimensões de consequências adotadas neste modelo foram baseadas nas categorias estabelecidas para as consequências das falhas evidentes da abordagem RCM. Porém, algumas considerações foram realizadas, estabelecendo as cinco dimensões consideradas no modelo. Na definição destas dimensões de consequências, a primeira modificação realizada foi a desvinculação da consequência relacionada à segurança e ao meio ambiente. No modelo proposto, esta consequência deu origem a duas dimensões: humana e ambiental. Esta divisão se deve ao fato de que hoje em dia a cobrança da sociedade com relação a estes aspectos é bem maior, tanto com relação a questões relacionadas a danos à saúde e integridade física de pessoas (e até mesmo mortes) quanto a questões vinculadas a preservação do meio ambiente.

A dimensão financeira foi criada neste modelo para agregar os dispêndios que na abordagem RCM eram computados em mais de uma categoria de consequências. Esta agregação realizada no modelo tem como objetivo direcionar todos os custos considerados para uma única dimensão de consequências. Multas pagas aos clientes/compensações e custos diretos de reparo são considerados nesta dimensão como prejuízos financeiros decorrentes das falhas.

Quanto ao aspecto operacional do sistema, poderia se ter considerado apenas uma dimensão de consequências, a dimensão operacional. Porém, optou-se pela consideração de duas situações e conseqüentemente a estruturação de duas dimensões de consequências. Primeiramente, a dimensão operacional sem interrupção da operação foi definida como aquela que incorpora a influência das consequências das falhas quanto ao comportamento do sistema produtivo. A consequência da falha nesta dimensão interfere no processo produtivo, porém a operação não é interrompida. A outra dimensão, operacional com interrupção da operação, foi estabelecida como aquela que considera a influência das consequências da falha quanto ao comportamento do sistema produtivo. Nesta dimensão, a consequência da falha faz com que a operação seja interrompida por completo. Foram definidos dois valores para a representação destes estados: o valor “0” para o estado operacional “em funcionamento” e o valor “1” para o estado operacional “parado”. É importante frisar que apenas uma destas duas situações associadas a operação ocorre para cada modo de falha. O *downtime* é utilizado para a estimativa das consequências tanto na operacional sem interrupção da operação como na operacional com interrupção da operação, pois o tempo de paralisação está diretamente associado às consequências operacionais. O motivo de sua consideração para a estimativa das consequências se deve ao fato de que diferentemente do tempo médio de reparo que leva em

consideração apenas o tempo necessário para efetuar o reparo, o *downtime* considera outras variáveis como definição do pessoal para efetuar o reparo, diagnóstico da falha, definição das peças de reposição, tempo de reparo e o teste da máquina. Desta forma leva-se em consideração na avaliação o pior caso e não a média que seria obtida pela consideração do tempo médio de reparo.

Quanto a questão das utilidades definidas para as dimensões operacional (sem e com interrupção da operação) verifica-se a possibilidade de utilidades diferentes em algumas situações. Se considerarmos o exemplo desta simulação numérica, ou seja, a consideração de um único usuário, temos apenas uma utilidade. Todavia, em sistemas como o sistema elétrico verifica-se diferentes usuários o que implica em diferentes utilidades, ou seja, uma para cada usuário. Outro aspecto a ser considerado é a questão associada à queda de desempenho relacionada à interrupção da operação do serviço. Isto pode ser considerado como consequências diferentes, levando a utilidades diferentes. Porém, caso se considere a mesma utilidade, esta diferenciação pode ser estabelecida nas constantes de escala.

4 MODELO DE DECISÃO PARA GESTÃO DE RISCOS EM SISTEMA DE DUTOS PARA TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO

Este capítulo apresenta um modelo de decisão multicritério para a avaliação de riscos em sistema de transporte de hidrogênio baseado em MAUT. Os resultados deste modelo são apresentados em ALENCAR e ALMEIDA (2010).

4.1 Modelo Proposto

Dentro do contexto do hidrogênio, este trabalho propõe novidades na avaliação do risco para o transporte de hidrogênio por gasodutos, através da aplicação de um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo (MAUT), incorporando o comportamento do decisor no processo, além de considerar três dimensões na avaliação dos riscos: humana, ambiental e financeira. Além disso, este modelo permite ao decisor definir ações em classes de prioridade com o intuito de mitigar os riscos envolvidos no transporte de hidrogênio.

4.1.1 Identificação dos cenários de perigo

Segundo Sklavounos e Rigas (2006), grandes quantidades de gases inflamáveis liberados no ar representam um risco significativo para o meio ambiente devido à capacidade de produzir grandes explosões e incêndios. Crowl e Jo (2007) afirmam que acidentes se originam de incidentes. Um incidente pode ser definido como a perda de controle de um material ou energia. Muitos incidentes são seguidos por uma série de eventos que propagam os acidentes. Isto pode incorporar fogo, explosões e vazamentos de gases tóxicos. De acordo com estes autores, uma simples seção de um equipamento pode apresentar dezenas de cenários, cada um dos quais deverão ser identificados. Neste contexto, cenários de perigo são definidos levando-se em consideração fenômenos ou acidentes associados com o hidrogênio como danos no gasoduto e falhas operacionais. Os cenários deste estudo são baseados nos cenários de perigo definidos em Jo e Ahn (2006). Os nomes de alguns destes cenários foram mantidos na língua inglesa, por se verificar o uso destes termos na linguagem técnica utilizada no Brasil. Ao mesmo tempo, com o intuito de se considerar uma visão mais ampla, este trabalho inclui um modelo mais elaborado para a árvore de eventos (considerando ruptura e furo), conforme Figura 4.1.

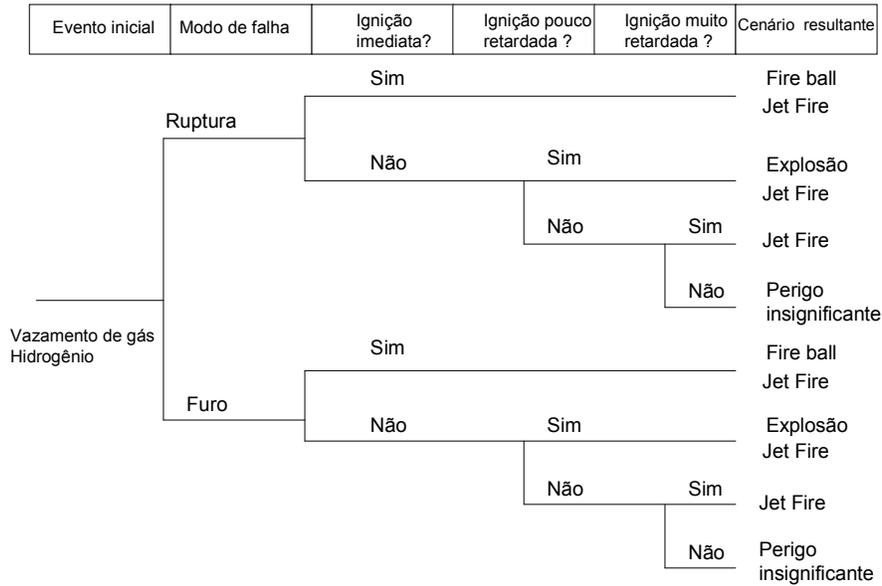


Figura 4.1 – Árvore de eventos para o transporte de hidrogênio através de gasodutos (Adaptado de Jo e Ahn, 2006)

De acordo com Jo e Ahn (2006), a probabilidade de um *flash-fire* significativa ou de uma explosão de uma nuvem de vapor resultante de uma ignição muito retardada é extremamente baixa devido a dispersão do hidrogênio. Porém, poucos segundos após o início do vazamento, uma grande nuvem de gás inflamável pode se formar devido a mistura turbulenta entre o ar e o hidrogênio. Esta nuvem tem o potencial de produzir uma explosão devido a natureza do gás hidrogênio. Pode também se dispersar rapidamente gerando um quase estacionário jato de gás. Se o gás que está vazando entra em ignição imediatamente após a ruptura do duto, um *jet fire* é gerado brevemente depois da ocorrência de um *fire ball* de curta duração. Mas se uma nuvem de gás em forma de um cogumelo apresenta uma ignição um pouco retardada próxima à origem de uma fonte de ignição, produz uma nuvem de gás explosiva bastante significativa.

4.1.2 Teoria da utilidade

Neste trabalho, baseado em Brito *et al.* (2010), “A” é considerado como o conjunto de todos os possíveis resultados em uma determinada dimensão do impacto acidental dentro o conjunto das dimensões da análise. Incertezas relacionadas com o problema são expressas pelos estados da natureza “ θ ”, cenários resultantes de acidentes em gasodutos de transporte de hidrogênio e seus impactos numa dada dimensão de resultados. Uma abordagem probabilística é utilizada para tratar com as incertezas em “A”, através de uma distribuição de probabilidade sobre as consequências e a elicitación das funções utilidade para estas consequências.

Levando em consideração os estudos de Berger (1985) relacionados com a teoria da utilidade, a probabilidade de cada estado da natureza ou cenário acidental é definida por “ $\pi_i(\theta)$ ”, sendo “ s_i ” definida como cada seção analisada do gasoduto e “ $U(\theta, s_i)$ ” sendo definida como a utilidade quando o cenário “ θ ” e a seção “ s_i ” são considerados.

Neste modelo “c” será adotado como a notação para a consequência. A utilidade é calculada pela combinação da probabilidade das consequências determinísticas “c” em “A” (chamada de função consequência, “ $P(c|\theta, s_i)$ ”). De acordo com Keeney e Raiffa (1976), os valores da função utilidade são definidos numa escala intervalar entre os extremos [0,1], onde “0” representa o “menos preferível” e “1” o “mais preferível”. A função utilidade destas consequências (representada por “ $U(c)$ ”, onde “c” \in “A”) é apresentada pela equação seguinte:

$$U(\theta, s_i) = \int_c P(c|\theta, s_i)U(c)dc \quad (4.1)$$

De acordo com Berger (1985), uma vez que “ $U(\theta, s_i)$ ” é estabelecido, a função perda “ $L(\theta, s_i)$ ” pode ser obtida. A perda é definida como o negativo da função utilidade: “ $L(\theta, s_i) = -U(\theta, s_i)$ ”. A perda precisa ser atribuída para o critério e seções consideradas num dado cenário acidental de um gasoduto. Neste trabalho, é assumido que as funções consequência são representadas pela função densidade de probabilidade “ $g(c|\theta, s_i)$ ”. De acordo com Berger (1985), a perda para a seção “ s_i ” dado “ θ ” é obtido pela equação seguinte:

$$L(\theta, s_i) = -\int_c g(c|\theta, s_i)U(c)dc \quad (4.2)$$

Segundo Berger (1985), o risco de uma seção é o valor esperado da perda “ $L(\theta, s_i)$ ” calculado pela equação seguinte:

$$r(s_i) = \sum \pi_i(\theta)L(\theta, s_i) \quad (4.3)$$

Agora, a escala intervalar para “ $L(\theta, s_i)$ ” e para “ $r(s_i)$ ” é $[-1,0]$, onde “-1” está relacionado com o “mais baixo risco” e “0” com o “mais alto risco”. O risco precisa ser estimado para cada seção do gasoduto e para cada critério, sendo capaz de incorporar as atitudes do decisor com relação ao risco por meio da elicitação da função utilidade, como apresentado na equação seguinte:

$$r(s_i) = -\sum_{\theta} \pi_i(\theta) \int_c g(c|\theta, s_i) U(c) dc \quad (4.4)$$

4.1.3 Construção da função utilidade

De acordo com Keeney e Raiffa (1976), o processo de avaliação da função utilidade multiatributo consiste de cinco passos: preparação do decisor para avaliação (através da introdução da terminologia e idéias), identificação das hipóteses de independência, avaliação da função utilidade condicional, avaliação das constantes de escala e o *check* de consistência.

O primeiro passo consiste em entender o decisor com relação ao principal propósito da função utilidade, além do entendimento das consequências.

O segundo passo está atrelado à identificação de algumas hipóteses de independência que são verdadeiras para o decisor com relação aos critérios que estão sendo considerados.

O terceiro passo se refere à elicitação da função utilidade unidimensional para cada critério. Esta função pode ser obtida basicamente através de avaliação direta ou através de procedimentos descritos em Keeney e Raiffa (1976).

Neste modelo verifica-se a existência de três atributos: Humano (h), financeiro (f) e ambiental (m). Desta forma, no terceiro passo, as funções seguintes funções utilidades são obtidas:

- $U(h)$, que é a função utilidade para a dimensão humana;
- $U(f)$, que é a função utilidade para a dimensão financeira;
- $U(m)$, que é a função utilidade para a dimensão ambiental.

O quarto passo consiste na avaliação das constantes de escala. Este passo depende principalmente do segundo passo. Se a independência aditiva é verificada, loterias podem ser utilizadas para a identificação dos valores das constantes de escala.

O último passo refere-se ao *check* da consistência dos resultados e a variabilidade dos resultados que surgem a partir da alteração de alguns parâmetros. Por conta da incerteza associada com parâmetros do modelo, esta fase pode capturar o impacto dos resultados pelo uso da análise de sensibilidade no modelo.

Neste modelo a função utilidade é considerada aditiva, implicando na independência em preferência do decisor com relação aos três atributos considerados. Sendo assim, a função utilidade multiatributo é obtida pela seguinte equação:

$$U(h, f, m) = k_1U(h) + k_2U(f) + k_3U(m) \quad (4.5)$$

Onde k_1 , k_2 e k_3 são as constantes de escala elicitadas pelo procedimento de elicitação baseado nas comparações das loterias, de tal forma que: $k_1 + k_2 + k_3 = 1$.

4.1.4 Construção da função consequência

Em muitos estudos da literatura relacionados com a análise de riscos em gasodutos, apenas uma única dimensão é analisada, a dimensão humana. A avaliação de risco tradicional baseada apenas em mortes pode emitir a identificação de perigos causados por outros fatores em cada seção do gasoduto. Neste contexto, o modelo de decisão multicritério apresentado levará em consideração não apenas a dimensão humana, como também as dimensões de risco ambiental e financeira.

A dimensão humana é tratada aqui de uma maneira conservadora, levando em consideração o número de pessoas expostas ao acidente que sofrem ao menos queimaduras de segundo grau e o número de fatalidades. Densidades populacionais são utilizadas para as regiões consideradas no estudo, fazendo parte do cálculo destes valores. Ao contrário dos estudos publicados por Brito e Almeida (2009) e Brito *et al.* (2010), neste trabalho uma *Probit* é assumida na dimensão humana, associando o nível de radiação térmica com a probabilidade de um dano físico a uma pessoa, ou mesmo a ocorrência de morte. Esta *Probit* considerada neste trabalho pode ser encontrada no trabalho de Jo e Ahn (2006). Calcula a probabilidade dos efeitos de altas temperaturas originárias do fogo, onde “ t ” é o tempo de exposição e “ I ” é o fluxo de calor para uma dada localidade. Com relação ao tempo de exposição, o valor de trinta segundos será utilizado, conforme Jo e Ahn (2006). Quando este valor excede trinta

segundos, assume-se que os indivíduos encontram-se abrigados ou estão suficientemente distantes da radiação térmica emitida. Esta *Probit* é calculada pela equação seguinte:

$$P_r = -14.9 + 2,56 \ln \left(\frac{tI^{\frac{4}{3}}}{10^4} \right) \quad (4.6)$$

Similarmente, para o cálculo do fluxo de calor e da taxa efetiva de vazamento de um gasoduto, equações descritas em Jo e Ahn (2006) são consideradas. O fluxo de calor para uma dada distância da origem do fogo, onde “ η ” é a razão do calor irradiado pelo total de calor liberado pelo fogo, “ τ_a ” é a transmissividade atmosférica, “ Q_{eff} ” a taxa efetiva de vazamento de gás, “ H_c ” o calor de combustão do hidrogênio e “ r ” a distância radial do fogo ao local de interesse, é expresso pela equação seguinte:

$$I = \frac{\eta \tau_a Q_{eff} H_c}{4\pi r^2} \quad (4.7)$$

A taxa de vazamento efetivo do gás pode ser obtida pela equação a seguir:

$$Q_{eff} = 6.47 \times 10^{-4} A_p \alpha p_0 \times \max \left[0.3, \frac{1}{\sqrt{1 + 4.187 \times 10^{-3} \alpha^2 \left(\frac{L}{d} \right)}} \right] \quad (4.8)$$

Onde “ A_p ” é a área transversal do duto, “ α ” é o tamanho do furo (adimensional) obtido pela razão da área efetiva do furo pela área transversal do duto, “ p_0 ” é a pressão em condições operacionais, “ L ” o comprimento do duto desde a estação de fornecimento do gás até o ponto onde o vazamento ocorre e “ d ” o diâmetro do gasoduto. De acordo com Jo e Ahn (2006), a taxa de vazamento efetivo do hidrogênio é definido de acordo com o valor de “ $(\alpha^2(L | d))$ ”. O valor da taxa de vazamento efetivo do hidrogênio varia se o valor de “ $(\alpha^2(L | d))$ ” é menor do que dois mil e quatrocentos. Caso contrário, esta taxa será considerada constante.

Concluído o cálculo da *Probit* pela equação (4.6) do trabalho de Jo e Ahn (2006), procedimentos estabelecidos em Brito e Almeida (2009) são adotados para os demais cálculos da dimensão humana.

Na dimensão financeira, dispêndios originários de acidentes, compensações e manutenções são levados em consideração. Os mesmos procedimentos de Brito e Almeida

(2009) são adotados para a realização dos cálculos necessários. Estas consequências são definidas a partir de estimativas financeiras.

Por fim, na dimensão ambiental, impactos são expressos como função de áreas de vegetação destruída. Outras variáveis também são consideradas nesta dimensão, como o tempo de extinção da chama “ t_f ” e o fluxo de calor “ I ”. A variável aleatória “ t_f ” é função dos cenários, seções e eficiência das companhias ou agências responsáveis pelo gerenciamento do acidente. O fluxo de calor “ I ” é a mesma variável utilizada na dimensão humana, sendo obtida através de (4.7). Os procedimentos estabelecidos em Brito e Almeida (2009) são adotados para os demais cálculos da dimensão ambiental.

Neste trabalho, considera-se que as probabilidades “ $g(h|\theta, s_i)$ ”, “ $g(f|\theta, s_i)$ ” e “ $g(m|\theta, s_i)$ ” são estimadas separadamente devido às consequências dos três fatores ocorrerem de forma aleatória e independentemente, com uma correlação insignificante. O impacto será afetado pelas características geográficas do entorno de cada seção do gasoduto. As funções densidade de probabilidade “ $g(h|\theta, s_i)$ ”, “ $g(f|\theta, s_i)$ ” e “ $g(m|\theta, s_i)$ ” são consideradas como representativas destas probabilidades neste estudo.

Então, com o intuito de se estimar os riscos de cada seção considerada, a função utilidade multiatributo é combinada com a função densidade de probabilidade. A perda é definida para as seções dos gasodutos e para os cenários acidentais considerados, podendo ser verificada pela seguinte equação:

$$L(\theta, s_i) = - \int_H \int_F \int_M g(h, f, m|\theta, s_i) U(h, f, m) dhdfdm \quad (4.9)$$

Esta equação integra as funções utilidade $U(h)$, $U(f)$ e $U(m)$ com suas respectivas probabilidades. “ $g(h|\theta, s_i)$ ” é obtido com base na equação (4.6).

Baseado em Berger (1985) e Keeney e Raiffa (1976), para cada critério relacionado com uma seção do gasoduto e para cada cenário acidental, o risco é definido como o valor esperado da perda. De acordo com esta afirmação e seguindo a equação (4.9), é observado que o risco pode ser obtido pela soma das perdas associadas com cada cenário “ θ ” e cada seção “ s_i ” para as três dimensões consideradas, multiplicadas pelas probabilidades dos cenários acidentais “ $\pi_i\theta$ ” adicionadas a perda associada ao cenário “ θ_N ”. “ θ_N ” é o cenário para a operação normal do sistema, “ $r(\theta_N)$ ” apresenta o valor de (-1) que multiplica “ $\pi_i(\theta_N)$ ”, a perda relacionada ao cenário “ θ_N ” sem dano. Desta forma, o risco é definido pela equação seguinte:

$$r(s_i) = \sum_{\theta} \pi_i(\theta) \left\{ - \left[\int_H g(h|\theta, s_i) k_1 U(h) dh + \int_F g(f|\theta, s_i) k_2 U(f) df + \int_M g(m|\theta, s_i) k_3 U(m) dm \right] \right\} + (-1) \pi_i(\theta_N) \quad (4.10)$$

O cálculo do risco utilizando esta expressão ocorre devido às propriedades das funções consideradas neste estudo, a independência aditiva da função utilidade multiatributo e a independência das distribuições de probabilidade das consequências.

Tendo obtido o valor do risco “r” para cada seção, levando-se em consideração todos os cenários acidentais estabelecidos, uma ordem decrescente é gerada, resultando num *ranking* de seções analisadas, servindo de suporte para o gerenciamento dos riscos relacionados ao vazamento do hidrogênio em gasodutos.

4.1.5 Estruturação das seções

A segmentação dos gasodutos em seções é estabelecido a partir da consideração de características homogêneas que compõem cada localidade. Tipo do solo, diâmetro do duto, pressão são algumas destas características a serem consideradas.

4.2 Aplicação Numérica

Com o objetivo de ilustrar o modelo de decisão multicritério proposto para a avaliação de riscos em gasodutos de hidrogênio, uma aplicação numérica é apresentada. Este estudo apresenta uma situação definida pela distribuição de segmentos de gasodutos em seções que apresentam características homogêneas. Como resultado deste processo, atividades apropriadas serão planejadas para cada seção do gasoduto, levando em consideração a natureza multidimensional do risco “(r(s_i))”.

O primeiro ponto a ser considerado neste modelo é a identificação do decisor. Esta identificação é de suma importância devido às escolhas probabilísticas e os julgamentos que precisam ser realizados. Uma vez que os aspectos do problema e o contexto estão claros, o gasoduto é dividido de acordo com variáveis técnicas, sociais, ambientais e econômicas como o diâmetro e a idade dos dutos. Nesta aplicação, o gasoduto foi dividido em 10 seções (S₁ a S₁₀) conforme figura 4.2.

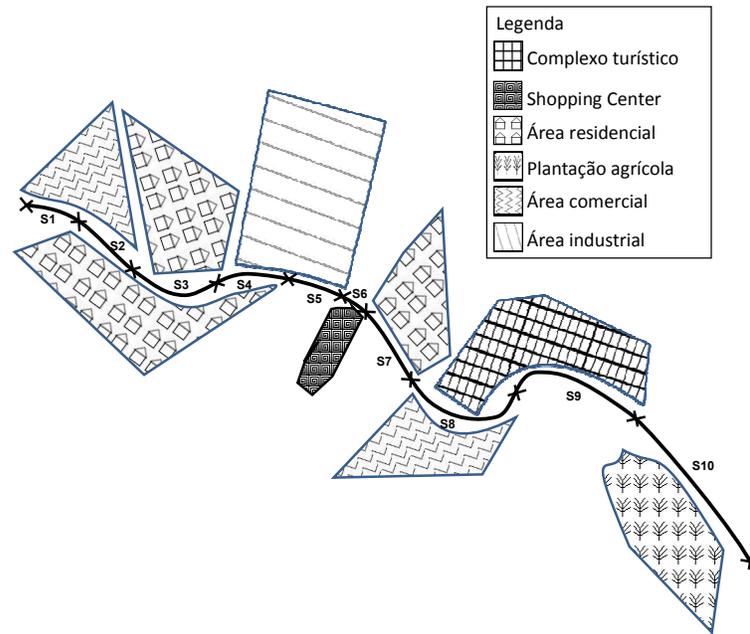


Figura 4.2. Mapa das seções de gasodutos

O comprimento total do gasoduto nesta aplicação é de 24.300 metros, apresentando todas as seções diâmetros idênticos de 30 centímetros. O comprimento de cada seção é especificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Descrição das seções do gasoduto

Seção	Descrição da seção	Comprimento (m)
S ₁	Área comercial	2400
S ₂	Área residencial/comercial	3300
S ₃	Área residencial	2250
S ₄	Área residencial/industrial	3150
S ₅	Área industrial	2300
S ₆	Shopping center	1800
S ₇	Área residencial	1600
S ₈	Área comercial/Complexo turístico	1250
S ₉	Complexo turístico	2550
S ₁₀	Plantação agrícola	3700

Alguns fenômenos e acidentes envolvendo hidrogênio, como vazamentos em gasodutos e falhas operacionais são levados em consideração quando da definição dos cenários de perigo. Os cenários considerados nesta aplicação são os cenários estabelecidos na Figura 4.1.

Para a estimativa das probabilidades dos cenários “ $\pi_i(\theta)$ ” valores baseados em Gerboni e Salvador (2009) foram definidos.

Desta forma, as probabilidades dos cenários de perigo foram estimadas para cada seção do gasoduto, estabelecendo para cada seção e para cada cenário a distribuição de probabilidade *a priori*, conforme Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2 – Probabilidades *a priori* de cenários acidentais causados por rupturas em gasodutos

Seção	$\pi_1(\theta)$	$\pi_2(\theta)$	$\pi_3(\theta)$	$\pi_4(\theta)$
S ₁	1.725E-05	4.729E-06	4.632E-04	5.012E-06
S ₂	1.846E-05	4.824E-06	4.859E-04	5.231E-06
S ₃	1.912E-05	4.935E-06	4.901E-04	5.413E-06
S ₄	1.811E-05	4.792E-06	4.788E-04	5.199E-06
S ₅	1.722E-05	4.689E-06	4.569E-04	4.992E-06
S ₆	1.742E-05	4.736E-06	4.624E-04	5.198E-06
S ₇	1.944E-05	4.955E-06	4.973E-04	5.445E-06
S ₈	1.709E-05	4.712E-06	4.608E-04	4.990E-06
S ₉	1.701E-05	4.722E-06	4.599E-04	4.865E-06
S ₁₀	1.658E-05	4.534E-06	4.513E-04	4.705E-06

Tabela 4.3 – Probabilidades *a priori* de cenários acidentais causados por furos em gasodutos

Seção	$\pi_1(\theta)$	$\pi_2(\theta)$	$\pi_3(\theta)$	$\pi_4(\theta)$
S ₁	1.935E-05	7.885E-06	7.8252E-04	1.502E-05
S ₂	2.014E-05	7.962E-06	8.012E-04	1.895E-05
S ₃	1.999E-05	8.125E-06	8.254E-04	2.103E-05
S ₄	1.875E-05	7.899E-06	7.914E-04	1.624E-05
S ₅	1.826E-05	7.654E-06	7.523E-04	1.391E-05
S ₆	1.856E-05	7.991E-06	7.756E-04	1.622E-05
S ₇	1.968E-05	8.773E-06	8.403E-04	2.256E-05
S ₈	1.815E-05	7.725E-06	7.795E-04	1.023E-05
S ₉	1.925E-05	7.801E-06	7.573E-04	1.002E-05
S ₁₀	1.807E-05	7.581E-06	7.489E-04	0.995E-05

Com o apoio de ferramentas computacionais, simulações foram desenvolvidas para a análise dos cenários acidentais “ θ ” e as seções consideradas. Três dimensões de consequência foram utilizadas: humana (h), financeira (f) e ambiental (m). Desta forma, as probabilidades das consequências foram estimadas por meio das funções densidade de probabilidade “ $g(h|\theta, s_i)$ ”, “ $g(f|\theta, s_i)$ ” e “ $g(m|\theta, s_i)$ ”.

Depois da obtenção das estimativas das probabilidades das consequências, é realizada a elicitacão da função utilidade multiatributo $U(h, f, m)$ pelo decisor. Este processo segue um protocolo estruturado definido em Keeney e Raiffa (1976). Este processo leva em consideração escolhas entre as consequências (consequências devido a acidentes em gasodutos) e loterias com probabilidades específicas entre o melhor e o pior caso.

As constantes de escala k_1 , k_2 e k_3 foram elicitadas através de procedimentos de elicitacão baseados em comparações de loterias descritos em Keeney e Raiffa (1976). Os valores obtidos foram $k_1=0.30$, $k_2=0.60$ e $k_3=0.10$.

As funções utilidade unidimensionais para as dimensões humana, financeira e ambiental a serem integradas dentro da equação 4.5 são obtidas por:

$$U(h) = 1 - \left(\frac{\lambda_1}{\max(\lambda_1)} \right)^{4.7} \quad (4.11)$$

$$U(f) = 1 - \left(\frac{\lambda_2}{\max(\lambda_2)} \right)^{6.5} \quad (4.12)$$

$$U(m) = -\frac{\lambda_3}{\max(\lambda_3)} + 1 \quad (4.13)$$

Onde se obtém “ λ_1 ”, “ λ_2 ”, “ λ_3 ” por ajustes na curva, baseado nas preferências do decisor.

Com o intuito de se estimar o risco para cada seção considerada, a função utilidade multiatributo é combinada com a função densidade de probabilidade. Com o intuito de auxiliar o decisor na análise dos valores obtidos uma transformação linear “ $r'(s_i)_{Bi} = 100 r(s_i)_{Bi} + 100$ ” observada no trabalho de Brito *et al.* (2010) será utilizada. Este procedimento pode ser verificado em Berger (1985) e Keeney e Raiffa (1976). Estes autores afirmam que uma transformação linear de escala pode ser aplicada para funções utilidade ou funções perda no contexto da teoria da utilidade, uma vez que corresponde a uma escala intervalar. Outro ponto importante é que nesta avaliação dos riscos, devido à estrutura axiomática da teoria da utilidade, é verificado um *ranking* das seções do gasoduto em questão, através do qual se

verifica o ordenamento decrescente das seções consideradas no estudo com base nos valores de risco obtidos associados a cada uma delas. Os resultados são verificados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Ranking resultante do risco das seções dos gasodutos

Posição no ranking (β_i)	Seção (s_i)	$r^{\wedge}(s_i)\beta_i$
β_1	S ₇	0.0953
β_2	S ₃	0.0938
β_3	S ₂	0.0924
β_4	S ₄	0.0909
β_5	S ₁	0.0885
β_6	S ₆	0.0882
β_7	S ₈	0.0879
β_8	S ₁₀	0.0875
β_9	S ₉	0.0871
β_{10}	S ₅	0.0867

4.3 Discussão de Resultados

Segundo Keeney e Raiffa (1976), a escala intervalar da função utilidade permite a comparação de incrementos de risco em relação às seções dos dutos. Estes incrementos são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Comparação dos valores dos riscos e razões de incrementos de riscos entre seções de gasodutos priorizadas

Posição no ranking (β_i)	Seção (s_i)	$r^{\wedge}(s_i)\beta_i - r^{\wedge}(s_j)\beta_{i+1}$	$R = (r^{\wedge}(s_i)\beta_i - r^{\wedge}(s_j)\beta_{i+1}) / (r^{\wedge}(s_j)\beta_{i+1} - r^{\wedge}(s_k)\beta_{i+2})$
β_1	S ₇	0,0015	1,071
β_2	S ₃	0,0014	0,933
β_3	S ₂	0,0015	0,625
β_4	S ₄	0,0024	8
β_5	S ₁	0,0003	1
β_6	S ₆	0,0003	0,750
β_7	S ₈	0,0004	1
β_8	S ₁₀	0,0004	1
β_9	S ₉	0,0004	-
β_{10}	S ₅	-	-

A partir dos valores disponibilizados na Tabela 4.4 verifica-se que a seção S_7 deve ser a primeira a receber uma alocação de recursos disponíveis no programa de prevenção para minimização do risco por apresentar o maior valor dentre os valores dos riscos obtidos relacionados às seções consideradas. A partir dos valores disponibilizados na Tabela 4.5 observa-se também que a diferença entre o risco associado à seção S_4 e o risco associado à seção S_1 é de “2.40E-03” e que a diferença entre o risco associado à seção S_1 e o risco associado à seção S_6 é de “3.00E-04”. Isto quer dizer que um incremento nos valores do risco da seção S_4 para a seção S_1 é 8 vezes maior que o incremento dos valores de risco da seção S_1 para a seção S_6 . Segundo Almeida (2010), esta análise é baseada no intervalo de escalas da função utilidade. Com base nos valores obtidos através desta análise é que pode se definir quais as seções devem ser contempladas com investimentos de recursos disponíveis.

Com relação ao investimento de recursos para a minimização os riscos, é verificado que os mesmos dependem da disponibilidade dos próprios recursos das empresas. O número de seções de gasodutos beneficiadas varia de acordo com a disponibilidade destes recursos.

Uma análise de sensibilidade foi conduzida, permitindo a verificação da robustez do modelo com base nos dados e parâmetros aplicados. Os resultados mostraram que o procedimento foi robusto o bastante para garantir ao decisor a recomendação proposta.

Modelos de decisão multicritério para a avaliação do risco são extremamente importantes, desde que levem em consideração a natureza multidimensional do risco. Isto não é verificado na maioria dos métodos tradicionais disponíveis na literatura. Uma abordagem multidimensional foi utilizada para o cálculo dos riscos na Tabela 4.4, através da aplicação de um modelo de decisão multicritério. As dimensões humana, ambiental e financeira foram consideradas neste modelo. O uso do MAUT permitiu a incorporação dentro do modelo de uma medida baseada nas preferências e no comportamento do decisor com relação ao risco nas dimensões consideradas. Além disso, o intervalo de escalas da função utilidade verificado na Tabela 4.5 permite uma análise mais completa das seções consideradas. Portanto, o modelo proporciona ao decisor uma comparação de incrementos de risco entre as seções dos gasodutos. Desta forma, o decisor pode ter uma noção melhor da situação do risco para a realização do planejamento e alocação de recursos. Finalmente, a informação gerada pela aplicação do modelo é bastante útil para o gerenciamento do risco, permitindo ao decisor o acesso a uma ampla gama de informações.

5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

Nesse capítulo são verificadas as conclusões principais que resultam dos estudos desenvolvidos, assim como algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros. Tanto as conclusões como as sugestões para trabalhos futuros serão descritas separadamente em subitens específicos referentes a cada modelo apresentado neste trabalho.

5.1 Conclusões

5.1.1 Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na manutenção centrada em confiabilidade

Este modelo de decisão multicritério foi estruturado para a avaliação das conseqüências das falhas obtidas através da abordagem RCM. O impacto deste modelo pode ser verificado a partir da incorporação do MAUT na etapa de avaliação das conseqüências com o intuito de tratar as incertezas através de uma abordagem quantitativa, de forma compensatória. As dimensões de conseqüências estabelecidas pelo RCM foram redefinidas, sendo estabelecidas funções conseqüência para cada uma destas dimensões. As dimensões humana e ambiental que eram tratadas de forma conjunta na abordagem RCM foram separadas em duas dimensões distintas por se julgar que na atualidade é inviável tratá-las conjuntamente, seja por cobranças da sociedade ou pela obediência a padrões e leis existentes. No contexto operacional, foram criadas duas dimensões de conseqüências, diferenciadas entre si pelo nível de interrupção da operação em determinado sistema produtivo considerado. Foram também introduzidos dois cenários para a definição da utilidade unidimensional: o cenário de ocorrência e o cenário de não ocorrência de falhas com suas respectivas probabilidades. Outro ponto levado em consideração para a obtenção da função utilidade unidimensional foi a consideração do comportamento do decisor com relação ao risco. Para o cálculo da função utilidade multiatributo foram consideradas as funções utilidade de cada dimensão associadas às respectivas constantes de escala. Por conta da estrutura axiomática da teoria da utilidade, foi introduzido o *ranking* dos valores das utilidades multiatributo para cada modo de falha considerado. Duas aplicações numéricas foram apresentadas a título de ilustrar o modelo estruturado, obtendo-se valores que servem de *input* para o processo de gerenciamento da manutenção. Os resultados obtidos pela aplicação do modelo proposto podem ser considerados como mais consistentes do que os resultados obtidos a partir da utilização da

abordagem clássica do RCM, onde na maioria das vezes chega-se a resultados qualitativos ou em muitas situações resultados quantitativos definidos a partir de intervalos atribuídos por cada organização, agregando uma maior subjetividade ao processo.

5.1.2 Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na gestão de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio

O modelo de decisão estruturado neste trabalho com o intuito de analisar os riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio, buscou através da consideração de uma abordagem multicritério, inovar no processo de gerenciamento de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio.

A motivação deste trabalho está associada ao fato de que a utilização do hidrogênio como fonte de energia tende a crescer com o passar dos tempos, ganhando ênfase principalmente devido à redução das reservas de combustíveis fósseis e aos danos ambientais causados pelos mesmos. Além disso, o hidrogênio apresenta inúmeras vantagens que o posicionam como o combustível do futuro. A facilidade de sua utilização em vários setores da sociedade, a possibilidade de seu armazenamento em pequenas ou grandes quantidades por longos períodos e a sua produção a partir de uma variedade de recursos, são apenas algumas das vantagens que podem ser constatadas.

Verifica-se o impacto deste modelo proposto a partir do momento que o mesmo inova através da incorporação da abordagem multicritério à análise de riscos em gasodutos de hidrogênio. É notada a ausência do uso da abordagem multicritério na literatura pesquisada para a análise de risco em gasodutos de transporte de hidrogênio, assim como a não consideração de danos em múltiplas dimensões. Modelos multicritério semelhantes foram verificados na literatura, porém associados à avaliação de riscos em gasodutos de gás natural, como os modelos verificados nos trabalhos de Brito e Almeida (2009) e Brito *et al.* (2010).

Desta forma, vale ressaltar que a grande contribuição deste modelo está na incorporação da análise de risco multidimensional através da consideração de danos associados às dimensões humana, ambiental e financeira. A *Probit* foi aplicada no processo de quantificação das consequências na dimensão humana através da equação apresentada por Jo e Ahn (2006). Da mesma forma, foi realizado o cálculo do fluxo de calor “I”.

Uma aplicação numérica foi apresentada ao longo do trabalho a fim de ilustrar o modelo desenvolvido. A teoria da utilidade multiatributo foi utilizada neste processo de análise quantitativa dos riscos, levando em conta as incertezas inerentes ao processo. Três dimensões

de conseqüências foram consideradas: humana, ambiental e financeira. Cálculos foram efetuados para a obtenção de valores associados a perda e conseqüentemente aos riscos em cada uma das seções do gasoduto considerado. De posse destes dados, os responsáveis pelo gerenciamento do gasoduto podem definir a quantidade de recursos disponíveis a serem alocados nas seções consideradas como relevantes, com base nos resultados obtidos pela aplicação do modelo.

5.2 Trabalhos Futuros

5.2.1 Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na manutenção centrada em confiabilidade

Algumas sugestões para a elaboração de trabalhos futuros relacionados à utilização do modelo de decisão que integra um método multicritério com a abordagem de manutenção centrada na confiabilidade estão descritos a seguir:

- Desenvolver novas hipóteses para a formulação das funções conseqüências, com o possível uso de distribuições de probabilidade nas dimensões humana, ambiental e financeira;
- Desenvolver um SAD (Sistema de apoio a decisão) para o processo da análise das conseqüências;
- Realizar aplicações numéricas baseadas em banco de dados de empresas;
- Definir variáveis e uma formulação matemática que permita uma melhor consideração da realidade do ambiente circunvizinho e suas interferências;
- Desenvolver um modelo de avaliação de risco para os modos de falha considerados;
- Incorporar novas dimensões para a avaliação das conseqüências decorrentes dos modos de falha;
- Desenvolver um modelo de decisão que incorpore a questão da decisão em grupo.

5.2.2 Modelo de decisão multicritério baseado em MAUT aplicado na gestão de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio

Algumas sugestões para a elaboração de trabalhos futuros relacionados à utilização do modelo de decisão multicritério baseado em MAUT, aplicado na gestão de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio estão descritos a seguir:

- Desenvolver um SAD (Sistema de apoio a decisão) para a análise de riscos em gasodutos de transporte de hidrogênio;
- Desenvolver um modelo de decisão que incorpore a questão da decisão em grupo.
- Considerar novas dimensões de consequências dentro do modelo existente;
- Realizar aplicações numéricas baseadas em banco de dados de empresas;
- Estabelecer procedimento estruturado para a etapa de segmentação das seções dos dutos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL-NOUR G.; BEAUDOIN H.; OUELLET P.; ROCHETTE R.; LAMBERT S. A Reliability based maintenance policy: a case study. **Computers ind. Engineering**, vol. 35, n. 3-4, p. 591-594, 1998.
- AFGAN, N. H.; CARVALHO, M. G.; PILAVACHI, P. T.; MARTINS, D. Evaluation of natural gas supply options for Southeast and Central Europe: Part 2. Multi-criteria assessment. **Energy Conversion and Management**, vol. 49, p.2345–2353, 2008.
- ALENCAR M.H., DE ALMEIDA A.T., Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model, **International Journal of Hydrogen Energy** (2010), doi:10.1016/j.ijhydene.2010.01.122
- ALENCAR, M.H. **Análise da execução de serviços não planejados por uma empresa prestadora de serviços na construção civil utilizando a técnica da árvore de decisão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- ALMEIDA, A. T. **O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão.** Editora Universitária da UFPE, 2010.
- ALMEIDA A.T. Multicriteria Modelling of Repair Contract Based on Utility and ELECTRE I Method with Dependability and Service Quality Criteria. **Annals of Operations Research**, vol.138, p.113–126, 2005.
- ALMEIDA, A T; SOUZA, F. M. C., (Org.), **Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade.** Recife: Editora Universitária, 2001.
- BERGER J. O. **Statistical decision theory and Bayesian analysis.** Second edition, New York: Springer – Verlag, 1985.
- BERTLING L.; ALLAN R.; ERIKSSON R. A Reliability-Centered Asset Maintenance Method for Assessing the Impact of Maintenance in Power Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 20, n.1, 2005.
- BERTOLINI M; BEVILACQUA M. A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.91, p.839–848, 2006.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.70, p.71-83, 2000.
- BIRKNER P. Field experience with a condition-based maintenance program of 20-kV XLPE distribution system using IRC-analysis. **IEE Transactions on Power Delivery**, vol.19, n.1, p. 3-8, 2004.
- BISHOP, I. D.; CHRISTIAN, S.; KATHRYN, J. W. Using virtual environments and agent models in multi-criteria.decision-making. **Land Use Policy**, vol26, p.87–94, 2008.

- BONVICINI S.; LEONELLI P.; SPADONI G. Risk analysis of hazardous materials transportation: evaluating uncertainty by means of fuzzy logic. **Journal of Hazardous Materials**. vol. 62, p 59–74. 1998.
- BOURNE L.; WALKER D.H.T. The paradox of project control. **Team Performance Management**, vol.11, n.5/6, p. 157-178, 2005.
- BRAUER D.C.; BRAUER G.D. Reliability-Centered Maintenance. **IEEE Transactions on Reliability**, vol.R-36, n.1, 1987.
- BRITO A.J.; ALMEIDA A.T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.94, n.2, p.187 – 198, 2009.
- BRITO A.J.; ALMEIDA A.T.; MOTA C.M.M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating utility theory. **European Journal of Operational Research**. vol.200, p. 812–821, 2010.
- CAPELLE J.; GILGERTA J.; DMYTRAKHB I.; PLUVINAGE G. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement. **International Journal of Hydrogen Energy**, vol.33, p. 7630-7641, 2008.
- CARRETERO J. *et al.* Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.82, p.257–273, 2003.
- CARTER D. A. Aspects of risk assessment for hazardous pipelines containing flammable substances. **Journal of loss prevention in the process industries**. vol.4, issue 2, p 68-72. 1991.
- CHENG Z.; JIA X.; GAO P.; WU S.; WANG J. A framework for intelligent reliability centered maintenance analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.93, p.784–792, 2008.
- CROCKER, J; KUMAR, U.D. Age-related maintenance versus reliability centred maintenance: a case study on aero-engines. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.67, p.113–118, 2000.
- CROWL D.A.; JO Y.D. The hazards and risks of hydrogen. **Journal of loss Prevention in the Process Industries**. vol. 20, p.158-164.2007.
- DEKKER R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, vol. 51, p. 229-240, 1996.
- DEKKER R.; SCARF P.A. On the impact of optimization models in maintenance decision making: the state of the art. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.60, p.111-119, 1998.
- DESHPANDE, V.S.; MODAK, J.P. Application of RCM to a medium scale industry. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.77, p.31–43, 2002a.

- DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM for safety considerations in a steel plant. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.78, p.325-334, 2002b.
- DEWOLF, G. B. Process safety management in the pipeline industry: parallels and differences between the pipeline integrity management (IMP) rule of the Office of Pipeline Safety and the PSM/RMP approach for process facilities. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 104. p 169–192. 2003.
- DZIUBINSKI M.; FRATCZAK M.; MARKOWSKI A.S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. vol.19 p 399–408. 2006.
- EISENREICH, N. *et al.* Airbag for the closing of pipelines on explosions and leakages. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol.20. p 589–598, 2007.
- EISINGER S.; RAKOWSKY U.K. Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance - a probabilistic approach. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.71, p.159-164, 2001.
- FERREIRA, R.J.P.; ALMEIDA A.T.; CAVALCANTE C.A.V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, vol. 94, p.905–912, 2009.
- FONSECA D.J. A knowledge-based system for preventive maintenance. **Expert Systems**, vol. 17, n.5, 2000.
- FONSECA D.J.; KNAPP G.M. An expert system for reliability centered maintenance in the chemical industry. **Expert Systems with Applications**, vol.19, p.45–57, 2000.
- GELDERMAN, J. *et al.*. Multi-criteria decision support and evaluation of strategies for nuclear remediation management, **Omega**, vol.37, n.1, p.238-251, 2009.
- GERBONI R.; SALVADOR E. Hydrogen transportation systems: Elements of risk analysis. **Energy**, p.1–7, 2009.
- GHARABAGH, M. J. *et al.* Comprehensive risk assessment and management of petrochemical feed and product transportation pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. vol.22 p 533–539.2009.
- GOMES L.F.A.M.; GOMES C.F.S.; ALMEIDA A.T. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. Rio de Janeiro: Atlas, 2006.
- GOYAL R. K.; AL-JURASHI N. M. Gas dispersion models. **Journal of loss Prevention in the process industries**. Vol.4, n.3, p 151-160. 1991.
- GRASSO, N. *et al.* Fire prevention technical rule for gaseous hydrogen transport in pipelines. **International Journal of hydrogen energy**. Vol. 34, p 4675-4683. 2009.

- HAASTRUP P.; BROCKHOFF L. H. Reliability of accident case histories concerning hazardous chemicals : An analysis of uncertainty and quality aspects. **Journal of Hazardous Materials**, Vol.27, n. 3, p 339-350, 1991.
- HENSELWOOD F.; PHILLIPS G. A matrix-based risk assessment approach for addressing linear hazards such as pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. vol. 19, p 433–441. 2006.
- HIPKIN L.; LOCKETT A.G. A study of maintenance technology implementation. **Omega**, vol.23, n.1, p.79-88, 1995.
- JIEJUAN T.; DINGYUAN M.; DAZHI X. A genetic algorithm solution for a nuclear power plant risk–cost maintenance model. **Nuclear Engineering and Design**, vol.229, p. 81–89, 2004.
- JO D. Y.; AHN B. J. Analysis of hazard area associated with hydrogen gas transmission pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 31, p 2122 – 2130. 2006.
- KEENEY R. **Value-focused thinking: a path to creative decision making**. London: Harvard University Press, 1992.
- KEENEY, R.L.; RAIFFA H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- KHRISTENKOY. A.; TOMILIN V. P.; RYAZHSKIY. Mathematical model for nonstationary regime of gaseous hydrogen outflow from vertical pipelines to atmosphere. **International Journal of Hydrogen Energy**. vol. 24, p 1171-1176. 1999.
- KOTHAMASU R.; HUANG S.H.; VERDUIN W.H. System health monitoring and prognostics - a review of current paradigms and practices. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol.28, p.1012-1024, 2006.
- KUMAR M. S.; SUJATA M.; VENKATASWAMY M.A.; BHAUMIK S.K. Failure analysis of a stainless steel pipeline. **Engineering Failure Analysis**. vol. 15, p 497–504. 2008.
- LANGER M.; TZIMAS E.; KALTSCHMITT M.; PETEVES S. Techno-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term. **International Journal of Hydrogen Energy**. vol. 32, p. 3797-3810. 2007.
- MAHGEREFTEH H.; OKE A.; ATTI O. Modelling outflow following rupture in pipeline networks. **Chemical Engineering Science** vol.61 p 1811 – 1818. 2006.
- MARKET F.; NIELSEN S.K.; PAULSEN J.L.; ANDERSEN V. Safety aspects of future infrastructure scenarios with hydrogen refuelling stations. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol.32, p. 2227 – 2234, 2007.
- MARQUEZ F.P.G.; SCHMID F.; COLLADO J.C. A reliability centered approach to remote condition monitoring. A railway points case study. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.80, p.33–40, 2003.

- MARTORELL S. *et al.* The use of maintenance indicators to evaluate the effects of maintenance programs on NPP performance and safety. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.65, p.85–94, 1999.
- MARTORELL S.; MUFIOZ A.; SERRADELL V. An approach to integrating surveillance and maintenance tasks to prevent the dominant failure causes of critical components. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.50, p.179-187, 1995.
- MCCARTHY R. W.; OGDEN J. M.; SPERLING D. Assessing reliability in energy supply systems. **Energy Policy**. Vol. 35 p 2151-2162. 2007.
- MIDILLI A.; DINCER I. Hydrogen as a renewable and sustainable solution in reducing global fossil fuel consumption. **International Journal of Hydrogen Energy**. vol.33, p. 4209-4222. 2008.
- MOORE D. A. Application of the API/NPRA SVA methodology to transportation security issues. **Journal of Hazardous Materials**, vol.130, p107–121. 2006.
- MOUBRAY J. **Reliability-centered Maintenance**. North Carolina: Industrial Press Inc., 2000.
- MOUSSA W. A. Risk-based reliability evaluation of multi-site damage in pipelines. **Computers Ind. Engineering**. vol.35, n. 3-4, p 595-598, 1998.
- MUNDA G.. **Social Multi-criteria evaluation for a sustainable economy**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- OKE, A; MAHGEREFTEH H.; ECONOMOU I; RYKOV Y. A transient outflow model for pipeline puncture. **Chemical Engineering Science**. vol.58. p 4591 – 4604. 2003.
- OKRAJNI J.; MUTWIL K.; CIESLA M. Chemical pipelines material fatigue. **Journal of Materials Processing Technology**, vol.164–165, p. 897–904. 2005.
- PAPADAKIS G. A. Assessment of requirements on safety managementsystems in EU regulations for the control of major hazard pipelines. **Journal of Hazardous Materials** vol.78. p 63–89. 2000.
- PAPADAKIS G. A.; PORTER S; WETTIG J. EU initiative on the control of major accident hazards arising from pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. vol.12, p 85–90. 1999.
- PARNELL G.S.; SMITH C.M.; MOXLEY F.I. Intelligent Adversary Risk Analysis: A Bioterrorism Risk Management model. **Risk Analysis**. vol. 30, 2010. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01319.x
- PINJALA S.K.; PINTELON L.; VEREECKE A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. **International Journal of Production Economics**, vol. 104, p. 214-229, 2006.
- RAUSAND M.; Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, vol. 60,p.121 – 132, 1998.

- RAUSAND M.; OIEN K. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, vol.53, p.73-83, 1996.
- RICHET, D.; COTAINA, N; O'REILLY G; O'REILLY K. Application of reliability centred maintenance in the foundry sector. **Control Engineering, Practice**, vol. 3, n 7, p.1029-1034, 1995.
- SHIMIZU S. *et al.* Decision-making support systems for reliability-centered maintenance. **Journal of Nuclear Science and Technology**, vol.30, n.6, p.505~515, 1993.
- SIQUEIRA I.P.; **Manutenção centrada na confiabilidade: Manual de implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005
- SITTIHUMWAT A.; SOUDI F.; TOMSOVIC K. Optimal allocation of distribution maintenance resources with limited information. **Electric Power Systems Research**, vol.68, p.208-220, 2004.
- SOUZA, F.M.C. **Decisões racionais em situações de incerteza**. Recife: Livro Rápido, 2005.
- SRA. Society for Risk Analysis. **Risk analysis glossary**. Disponível em: <http://www.sra.org/resources_glossary_p-r.php>. Acessado em 22/02/2010.
- SUDDLE S. The weighted risk analysis. **Safety Science**. vol.47 p 668–679. 2009.
- TESFAMARIAM S.; SADIQ R.; NAJJARAN H. Decision Making Under Uncertainty-An Example for Seismic Risk Management. **Risk Analysis**, vol. 30, 2010. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01331.x.
- TZIMAS E.; CASTELLO P.; PETEVES S. The evolution of size and cost of a hydrogen delivery infrastructure in Europe in the medium and long term. **International Journal of Hydrogen Energy**. vol. 32, p. 1369-1380. 2007.
- VATN J;HOKSTAD P.; BODSBERG L. An overall model for maintenance optimization. **Reliability Engineering and System Safety**, vol. 51, p.241-257,1996.
- VINCKE, P., **Multicriteria Decision-aid**, Bruxelles: John Wiley & Sons, 1992.
- WILKENING H.; BARALDI D. CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**. vol. 32, p 2206 – 2215. 2007.