

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE RESPOSTA AO RISCO
MULTIDIMENSIONAL: APLICAÇÃO NUMÉRICA EM UMA
PLANTA DE PRODUÇÃO DE METANOL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

PABLO RAMOM MATIAS DE ANDRADE

Orientador: Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez

Caruaru
2018

PABLO RAMOM MATIAS DE ANDRADE

**OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE RESPOSTA AO RISCO
MULTIDIMENSIONAL: APLICAÇÃO NUMÉRICA EM UMA
PLANTA DE PRODUÇÃO DE METANOL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau/título de Mestre em Engenharia de Produção

Área de concentração: Pesquisa Operacional

Orientador(a): Prof^o. Dr^o Thalles Vitelli Garcez.

Caruaru
2018

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva CRB/4 - 1223

A553o Andrade, Pablo Ramom Matias de Andrade.
 Otimização de planos de resposta ao risco multidimensional: aplicação numérica em uma planta de produção de metanol. / Pablo Ramom Matias de Andrade. – 2018.
 109 f.; il.: 30 cm.

 Orientador: Thales Vitelli Garcez.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2018.
 Inclui Referências.

 1. Administração de risco (Brasil). 2. Processo decisório (Brasil). 3. Otimização matemática. 4. Substâncias perigosas (Brasil). 5. Indústria química (Brasil). I. Garcez, Thales Vitelli (Orientador). II. Título.

658.5 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2018-029)

PABLO RAMOM MATIAS DE ANDRADE

**OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE RESPOSTA AO RISCO
MULTIDIMENSIONAL: APLICAÇÃO NUMÉRICA EM UMA
PLANTA DE PRODUÇÃO DE METANOL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do grau/título de Mestre em Engenharia de Produção

Aprovado em: 26/02/2018

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Thalles Vitelli Garcez, (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr..Rodrigo Sampaio Lopes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profª. Dra. Vanessa Batista Schramm (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que com seu infinito amor e misericórdia me proporcionou concluir mais essa etapa em minha vida.

Obrigado a minha família Josileide, Paulo, Pollyanna, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em cada etapa da minha vida e estudos. Também a meus sobrinhos, Lucas e Lara, que me trazem a alegria de ser criança.

Especialmente, a minha querida Danielle Cardins, pelo amor, paciência, companheirismo, que sempre me deu força, mesmo nos momentos mais difíceis.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos da Cidade Viva e das Damas que até hoje se fazem presentes em minha vida, mesmo seguindo cada um seu rumo. Também a meus colegas que participaram dessa jornada, pela convivência enriquecedora e por tornarem minhas horas de estudo mais produtivas e agradáveis.

Sou também grato a todo o corpo de profissionais que compõe o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFPE-CAA, desde professores, a banca da dissertação, aos funcionários e colaboradores que contribuíram diretamente à minha formação e pela dedicação em melhorar esse Programa, todos os dias. A CAPES por ter concedido uma bolsa de mestrado, que me deu o suporte necessário para dedicação exclusiva ao trabalho. E de maneira especial, a meu orientador, Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez, por todo acompanhamento, compartilhando de seus conhecimentos comigo.

RESUMO

Nos últimos anos, muitos foram os acidentes ocorridos em indústrias químicas, e isso está relacionado aos seus processos complexos e de alto risco, sejam eles de transporte, armazenamento e uso de materiais perigosos. Esses incidentes ocorridos expõem a indústria e a sociedade a diversos tipos de consequências, que podem impactar múltiplas dimensões. Para isso, uma maneira de prevenir e/ou mitigar esses riscos é a implementação de práticas de gerenciamento de risco eficientes. Dentro do processo de gerenciamento de risco, um dos grandes desafios enfrentados por tomadores de decisão é saber quais conjunto de ações irão ser realizadas para reduzir ou mitigar os riscos críticos, tendo disponível para isso recursos escassos e limitados. Neste sentido, o presente trabalho vem propor um modelo de apoio à decisão para otimizar os planos de respostas ao risco multidimensional na indústria química. O problema de decisão consiste em determinar quais ações preventivas e mitigativas devem ser implementadas para potencializar a redução de risco multidimensional, obedecendo a hierarquia de prioridade de risco e as restrições dos recursos disponíveis, levando também em consideração a estrutura de preferência do tomador de decisão. Através de uma aplicação numérica numa planta hipotética de produção de metanol, o modelo proposto foi avaliado. O resultado ótimo dado pelo modelo escolheu seis ações de resposta ao risco, usando de forma total os recursos escassos existentes. Para verificação da eficácia do modelo, a análise de sensibilidade mostrou robustez para variações positivas nos parâmetros de restrições, e redução do número de ações para variações negativas desses parâmetros, comprovando que quanto menos recursos se tem, menos ações serão realizadas. Desta forma, os resultados obtidos comprovaram a aplicabilidade e eficiência do modelo na otimização de planos de resposta ao risco considerando as prioridades estabelecidas.

Palavras Chave: Gerenciamento de risco. Tratamento de riscos. Risco multidimensional. Modelo de decisão. Otimização. MAUT.

ABSTRACT

In recent years, many accidents have occurred in the chemical industry, and this is related to their complex and high-risk processes, whether they are transportation, storage and use of hazardous materials. These incidents expose industry and society to many kinds of consequences, which can impact multiple dimensions. To do so, one way to prevent and / or mitigate these risks is to implement effective risk management practices. Within the risk management process, one of the major challenges faced by decision makers is knowing which set of actions will be undertaken to reduce or mitigate critical risks, with scarce and limited resources available to them. In this sense, the present paper proposes a decision support model to optimize the multidimensional risk response plans in the chemical industry. The decision problem consists of determining which preventive and mitigating actions should be implemented to maximize the multidimensional risk reduction, according to the hierarchy of risk priority and the constraints of available resources, also taking into account the preference structure of the decision maker. Through a numerical application in a hypothetical methanol production plant, the proposed model was evaluated. The optimal result given by the model chose six actions of response to the risk, using in total form the scarce resources existing. To verify the effectiveness of the model, the sensitivity analysis showed robustness for positive variations in the parameters of restrictions, and reduction of the number of actions for negative variations of these parameters, proving that the less resources one has, the fewer actions will be performed. In this way, the results obtained proved the applicability and efficiency of the model in the optimization of risk response plans considering the established priorities.

Keywords: Risk management. Risk treatment. Multidimensional risk. Decision model. Optimization. MAUT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do processo de gerenciamento de risco	25
Figura 2 – Exemplo de Árvore de Eventos	33
Figura 3 – Níveis de risco e ALARP	34
Figura 4 – Diagrama Bow-tie	35
Figura 5 – Estrutura do modelo de decisão	40
Figura 6 – Representação da molécula de metanol (CH_3OH).....	49
Figura 7 – Derivados do Metanol.....	52
Figura 8 – Dados de uso mundial do Metanol.....	52
Figura 9 – Árvore de Eventos de vazamento acidental	55
Figura 10 – Estrutura do modelo de decisão para o planejamento de resposta ao risco	65
Figura 11 – Localização da planta de produção de metanol hipotética.....	69
Figura 12 – Função Utilidade Humana – Aversão ao risco.....	75
Figura 13 – Função Utilidade Ambiental – Aversão ao risco	75
Figura 14 – Função Utilidade Financeira– Propensão ao risco	75
Figura 15 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Estacionamento de Carretas.....	100
Figura 16 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Estocagem de Etanol.....	101
Figura 17 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Alimentação de Etanol.....	101
Figura 18 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Separação de Etanol.....	102
Figura 19 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Produção de Metanol.....	102
Figura 20 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Estocagem de Metanol.....	103
Figura 21 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Recirculação de Etanol.....	103
Figura 22 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Reator de Metanol	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planilha de Análise Preliminar de Perigo	32
Tabela 2 – Elementos da teoria da decisão.....	36
Tabela 3 – Dados físico-químicos do metanol	49
Tabela 4 – Principais acidentes na indústria química, suas causas e impactos	57
Tabela 5 – Seleção das subáreas analisadas	70
Tabela 6 – Estimação das probabilidades dos cenários de acidentes	70
Tabela 7 – Raio crítico da zona de perigo para cada subárea (metros)	71
Tabela 8 – Número máximo de pessoas expostas dentro da zona de perigo.....	72
Tabela 9 – Área em decorrência do vazamento de líquido inflamável (metros ²).....	72
Tabela 10 – Prejuízos financeiros derivado do vazamento de líquidos inflamáveis (\$)	73
Tabela 11 – Categoria de Severidade	76
Tabela 12 – Suposições determinísticas sobre as funções consequências.....	76
Tabela 13 – Riscos estimados para cada subárea na planta de produção de metanol	77
Tabela 14 – Lista de ações de prevenção e mitigação dos riscos multidimensionais	79
Tabela 15 – Diferenças entre os riscos multidimensionais antes e depois da aplicação das ações	80
Tabela 16 – Conjunto de ações ótimas para cada subárea na planta de produção de metanol.....	80
Tabela 17 – Resultado dos novos riscos com as melhorias de cada ação em cada subárea	81
Tabela 18 – Resultado da análise de sensibilidade sobre a restrição de orçamento	83
Tabela 19 – Resultado da análise de sensibilidade sobre a restrição de tempo máximo de execução das ações	84
Tabela 20 – Premissas individuais para cálculo das zonas de perigo.....	100
Tabela 21 – Densidade demográfica dos arredores da planta de produção de metanol.....	105
Tabela 22 – Matriz de consequência humana.....	105
Tabela 23 – Matriz de consequência ambiental.....	105
Tabela 24 – Matriz de consequência financeira	106
Tabela 25 – Função Consequência Humana.....	106
Tabela 26 – Função Consequência Ambiental	106
Tabela 27 – Função Consequência Financeira	106
Tabela 28 – Reduções no parâmetro de probabilidade de ocorrência ($\pi_s(\theta_{jk})$).....	107
Tabela 29 – Reduções no parâmetro do payoff humano (ch).....	107

Tabela 30 – Reduções no parâmetro do payoff ambiental (ca).....	108
Tabela 31 – Reduções no parâmetro do payoff financeiro (cf)	108

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Relevância e contribuição do estudo	15
1.2	Objetivo do trabalho	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivo específico	16
1.3	Estrutura do trabalho	17
2	METODOLOGIA	19
2.1	A realização da pesquisa	20
3	BASE CONCEITUAL	21
3.1	Conceito de risco	21
3.2	Gerenciamento de risco	23
3.2.1	Comunicação e consulta	25
3.2.2	Estabelecimento do contexto e escopo	26
3.2.3	Processo de avaliação de risco	26
3.2.3.1	Identificação dos eventos iniciais	26
3.2.3.2	Análise de risco (risk analysis)	27
3.2.3.3	Avaliação de risco (risk evaluation)	28
3.2.3.4	Tratamento de risco	29
3.2.3.5	Monitoramento e análise crítica	30
3.3	Ferramentas utilizadas no processo de gerenciamento de risco	30
3.3.1	Análise preliminar de perigo (APP)	31
3.3.2	Análise de árvore de eventos (ETA)	33
3.3.3	ALARP	34
3.3.4	Bow-tie	35
3.4	Modelo de decisão de risco multidimensional	35
3.4.1	Identificação do decisor	41
3.4.2	Seleção de sistemas e subsistemas a analisar	41
3.4.3	Identificação dos cenários de perigo	41
3.4.4	Estimação das probabilidades dos cenários acidentais	42
3.4.5	Análise da exposição dos objetos devido a ocorrência dos cenários	42
3.4.6	Estimação do conjunto de <i>payoffs</i> c	42

3.4.7	Elicitação da função utilidade multiatributo uc	43
3.4.8	Cálculo das funções probabilidades de ocorrência	45
3.4.9	Estimação da medida de risco multidimensional	46
3.4.10	Ordenamento das medidas de risco	46
3.5	Conclusão do capítulo	46
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	48
4.1	Metanol	49
4.1.1	Composição e especificações	49
4.1.2	Etapas de produção de metanol via gás de síntese	50
4.1.2.1	<i>Produção de gás de síntese</i>	50
4.1.2.2	<i>Síntese do metanol</i>	50
4.1.2.3	<i>Destilação do metanol</i>	51
4.1.3	Uso e aplicações do metanol	51
4.1.4	Perigo envolvendo vazamentos químicos inflamáveis na produção de metanol	53
4.2	Processo de tratamento dos riscos nas indústrias químicas	55
4.2.1	Modelos matemáticos de tratamento de risco	58
4.2.2	Método de otimização lexográfico	62
5	MODELO PROPOSTO	64
5.1	Os pressupostos e delimitação do modelo	64
5.2	A estrutura do modelo	65
5.2.1	Passo 1: Framework do modelo de avaliação de risco multidimensional	66
5.2.2	Passo 2: Identificação e avaliação das ações de resposta ao risco	66
5.2.3	Passo 3: Definição da função objetivo	66
5.2.4	Passo 4: Identificação das restrições	67
5.2.5	Passo 5: Otimização do plano de resposta ao risco	67
6	APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÕES	69
6.1	Aplicação numérica numa planta de produção de metanol	69
6.1.1	Framework do modelo de avaliação de risco multidimensional	69
6.1.2	Identificação e avaliação das ações de resposta ao risco	77
6.1.3	Processo de Otimização	79
6.2	Discussões	80

6.2.1	Análise de sensibilidade	82
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A – PREMISSAS E TELAS DO SOFTWARE	100
	APÊNDICE B – DADOS DA APLICAÇÃO	105
	APÊNDICE C – DADOS DE EFETIVIDADE DAS AÇÕES	107

1. INTRODUÇÃO

As indústrias químicas são uma das forças econômicas mais importantes em escala global ou local, e fornece materiais para muitas outras indústrias (QINQIN et al., 2014). É um dos setores mais diversificados, que cobrem mais de 7 mil produtos comerciais, como por exemplo: produtos químicos básicos e seus produtos intermediários, petroquímicos, fertilizantes, tintas, pesticidas, medicamentos a granel e produtos farmacêuticos (BHAWANA e FULEKAR, 2011). No entanto, essas indústrias abrangem processos altamente diversos de transporte, armazenamento e uso de materiais perigosos, o que propicia um ambiente complexo e de alto risco.

Segundo a agência National Disaster Managment Authority (2014), a frequência e a gravidade das catástrofes químicas aumentaram nos últimos anos devido ao rápido desenvolvimento das indústrias químicas de alto risco. Estima-se que durante a década de 2000, ocorreram mais de 3100 acidentes no processo de produção, armazenamento, transporte e uso de produtos químicos perigosos (SALES et al., 2007; DUAN et al., 2011; LI et al., 2014).

Os acidentes envolvendo indústria química são geralmente causados por derrames de transporte, vazamento de tubos de matérias tóxicas, explosões e incêndios (YANG et al., 2010). Lee et al. (2016) afirmam que esses incidentes podem causar consequências catastróficas, não só para funcionários em um local de trabalho, mas também para residentes e para o meio ambiente. Além disso, as perdas financeiras resultantes dos danos causados as instalações são enormes e o reinício das operações dessas instalações pode exigir um certo tempo. Ou seja, pode-se perceber que os riscos envolvidos em acidentes químicos têm impactos em múltiplas dimensões de consequências.

Por exemplo, pode-se destacar o acidente em Kaixian, na China, ocorrido em dezembro de 2003, considerado o mais severo acidente devido a morte de 243 pessoas (CAO et al., 2017). Além desse, outros acidentes ocorridos em Flixborough (1974), na Inglaterra; Seveso (1976), na Itália; *Los Alfaques* (1978), na Espanha; Bophal (1984), na Índia; e Vila Socó (1984), no Brasil, serviram de marco para uma maior preocupação no gerenciamento de risco nas indústrias químicas. Todos esses acidentes caracterizam-se por extrapolar as divisas das fábricas, se projetando a posteriori, com efeitos de médio e longo prazo nas populações e meio ambiente (ESTRADA; SANTOS; GUTIERREZ, 2013)

Dentro dessa perspectiva, uma maneira de prevenir e/ou mitigar esses impactos humanos, financeiros, ambientais e etc. é a implementação de práticas de gerenciamento de risco eficiente

(STEDILE, 2014). Segundo Ghadge et al. (2013), o gerenciamento de risco inclui todas as atividades que permitem minimizar a ocorrência da ameaça levando a efeitos indesejados, através do desenvolvimento, implementação e operação de controles internos que mitigam, evitam ou transferem riscos. Nesse sentido, o gerenciamento de risco é um processo estratégico de tomada de decisão nas organizações, envolvendo o controle de possíveis riscos e criando um ambiente de melhorias contínuas, considerando as restrições técnicas envolvidas, uma vez que os recursos disponíveis (monetários, tempo, equipes de trabalho, tecnologia, etc.) das empresas são limitados e escassos (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014a).

Dentre diversas etapas do processo de gerenciamento de risco, pode-se citar: identificação dos eventos iniciais, estimação dos riscos, estabelecimento de aceitabilidade e tolerabilidade dos níveis de risco, tratamento dos riscos, monitoramento e análise crítica (FANG et al., 2013; FROSDICK, 1997).

Os riscos são geralmente identificados utilizando métodos semiestruturados que envolvem uma combinação de experiência, especialização e pesquisa de informação (FANG et al., 2013). A etapa de estimação dos riscos é caracterizada pela determinação de uma medida de risco, associando a mensuração de probabilidade dos eventos com as estimativas das consequências dos cenários indesejados. Conforme mencionado anteriormente, é necessário evidenciar que as consequências envolvem múltiplas dimensões, tais como: humana, ambiental, financeira, imagem da empresa, etc. (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010a; GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014a). Nesse sentido, diversas abordagens tradicionais de análise de riscos não consideram múltiplas dimensões dos impactos dos acidentes, não sendo suficientemente abrangentes para tratar problemas de forma realista e eficiente (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014a).

Além disso, de acordo com Brito et al. (2010), outro ponto raramente explorado nos métodos tradicionais de estimação de riscos é o de considerar as preferências e os julgamentos de valor dos tomadores de decisão que são responsáveis pela gestão do sistema. Estas questões são importantes a partir do momento em que o processo de decisão engloba atividades relacionadas a atividades de planejamento, prevenção, monitoramento e manutenção, de modo a reduzir riscos (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010a; GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014c).

Tendo identificado e estimado os riscos, a próxima etapa é determinar a aceitabilidade dos níveis de risco, que é a definição se os riscos analisados são considerados aceitáveis ou não. Ao final dessa etapa, os riscos são priorizados de acordo com o seu impacto ao sistema.

A última etapa é o controle e tratamento dos riscos. Segundo Raz & Ben-David (2001), essa etapa é uma fase principal no processo de gerenciamento de risco, e merece um estudo

detalhado. Essa fase é caracterizada pelo processo e implementação de métodos de planejamento de resposta ao risco, incluindo ações para evitar, reduzir, otimizar e transferir os riscos (AVEN, 2008).

É importante destacar que os métodos de identificação e estimação ajudam a identificar as ações de resposta aos riscos avaliados, mas só os métodos de planejamento e resposta ao risco indicam quais dessas ações serão realizadas, devendo a escolha ser baseada em questões como: rentabilidade e adequação ao contexto (FANG et al., 2013).

O grande desafio desse planejamento de resposta é saber quais ações, sejam elas preventivas ou mitigativas, irão ser realizadas para reduzir os riscos críticos e levá-los a região aceitável ou até mitigá-los, tendo recursos limitados e escassos para isso. A medida que os recursos se tornam mais apertados, equilibrar os riscos é mais crítico e menos intuitivo (FANG et al., 2013).

Para essas situações, métodos analíticos confiáveis podem ajudar os tomadores de decisão a planejar ações de resposta ao risco que otimizam os recursos. Diversos estudos trouxeram a importância de compreender problemas de alocação de recursos limitados em situações envolvendo riscos (DILLON; PATE-CORNELL; GUIKEMA, 2003; FANG et al., 2013; GLICKMAN, 2008; SHERALI; ALAMEDDINE; GLICKMAN, 1994; WANG; PEDRONI; ZIO, 2016b). As decisões foram tomadas levando em conta as informações disponíveis contando com ferramentas analíticas para elaborar as melhores soluções. Esses estudos analisam o risco sob a ótica de apenas uma única dimensão, deixando de explorar as consequências trazidas em múltiplos aspectos.

Neste sentido, este trabalho propõe um modelo de otimização de planos de resposta ao risco multidimensional na indústria química. Esse modelo consiste em escolher ações preventivas e mitigativas que irão otimizar a redução de risco, considerando a hierarquia de prioridade de risco e as limitações dos recursos disponíveis (financeira, tempo, mão de obra, etc.). Para verificar a aplicabilidade do modelo, será demonstrado através de uma aplicação numérica numa planta de produção de metanol, e para avaliação da robustez do modelo será feita uma análise de sensibilidade dos resultados.

1.1. Relevância e contribuição do estudo

As plantas químicas estão expostas a altos riscos, principalmente porque lidam com materiais perigosos, inflamáveis e tóxicos, normalmente envolvendo altas temperaturas e altas pressões. Apesar desses materiais serem controlados por normas técnicas que visam minimizar os riscos quanto ao meio ambiente, danos a equipamentos e preservação a saúde do trabalhador,

é inevitável que falhas ocorram e, conseqüentemente, acidentes fatais e contaminação do ambiente possam ocorrer, caracterizando dessa maneira como um sistema complexo. Por isso, as indústrias químicas exigem severos controles de seus riscos (AQLAN; MUSTAFA ALI, 2014)

Nesse contexto, a implementação de um processo de avaliação de riscos abrangente seguido por um plano de resposta a esses riscos é crucial para manter o nível de risco abaixo dos níveis de riscos inaceitáveis (KHAKZAD; KHAN; AMYOTTE, 2013). Porém, a maioria dos estudos relacionados ao plano de resposta aos riscos nas indústrias químicas, não tratam os riscos em múltiplas dimensões de consequência. Além disso, os métodos analíticos propostos na literatura não tratam as preferências dos tomadores decisão, sendo um fator limitante para essas abordagens.

Desta forma, visualiza-se a necessidade de gerar um *framework* de resposta ao risco que atenda a multidimensionalidade do risco gerados pelos acidentes químicos, como também as preferências dos tomadores de decisão, respeitando os recursos disponíveis (monetários, tempo, equipes de trabalho, tecnologia, etc.) e a demanda exigida pelos órgãos regulamentadores. Assim, o modelo proposto é uma extensão do trabalho de Brito & de Almeida (2009) e apoia o processo de tomada de decisão referente ao tratamento de risco, lidando com a complexidade dos riscos e restrições de recursos disponíveis.

1.2. Objetivos do trabalho

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é propor um modelo de apoio a decisão para otimizar os planos de respostas ao risco multidimensional na indústria química. Esse modelo consiste em determinar quais ações preventivas e mitigativas que devem ser implementadas para otimizar a redução de risco multidimensional, obedecendo as prioridades de risco e as restrições dos recursos disponíveis, levando em consideração a estrutura de preferência do tomador de decisão.

1.2.2. Objetivos específicos

Para firmar o objetivo geral, faz-se necessário objetivos específicos para a execução das etapas pertinentes ao trabalho proposto. Portanto, os objetivos específicos são:

- Realizar uma pesquisa na literatura acerca dos perigos associados a indústrias químicas, seus modos de falha, principais acidentes que ocorreram nessas estruturas, e as metodologias utilizadas para tratamento desses perigos;
- Propor um modelo de plano de resposta ao risco, que atenda a multidimensionalidade da análise de risco, para a designação de ações preventivas e mitigativas, levando em consideração a estrutura de preferência do tomador de decisão;
- Aplicar o modelo numa planta de produção de metanol e realizar uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos.

1.3. Estrutura do trabalho

Para proporcionar uma melhor compreensão da estrutura dessa dissertação e de como o atendimento dos objetivos gerais e específicos irá ser buscado ao longo desse trabalho, é apresentada a seguir uma breve descrição dos seus capítulos:

- O presente Capítulo 1 constitui-se de uma introdução do problema apontado, dos conceitos a serem explorados e dos objetivos a serem atingidos pelo trabalho.
- O capítulo 2, correspondente a metodologia, descreve os procedimentos metodológicos usados para elaboração deste trabalho.
- O capítulo 3, relativo a base conceitual, apresenta conceitos e aspectos fundamentais de risco, gerenciamento de risco e modelo de risco multidimensional para o entendimento e desenvolvimento do modelo proposto.
- O capítulo 4, Revisão bibliográfica, contextualiza o leitor acerca da problemática, apresentando as características do produto químico envolvido (Metanol). Fechando esse capítulo será revisado, de forma abrangente, a literatura de planos de resposta ao risco, apresentando os principais estudos e seus resultados.
- O capítulo 5, Modelo Proposto, descreve detalhadamente o modelo deste trabalho, pontuando onde necessário suas diferenças e melhorias em relação aos modelos anteriores.
- O capítulo 6, Aplicação numérica e discussão, apresenta uma aplicação numérica do modelo e uma discussão sobre o modelo aplicado, procedimento de aplicação, principais entraves da aplicação, detalhamento dos resultados e a descrição detalhada das variáveis de entrada do modelo, definindo meios de obtenção e unidades utilizadas.

- Por último, o capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

A classificação das pesquisas científicas pode ser um assunto bastante controverso, pelo fato da mesma se basear no enfoque dado por cada autor. Segundo Turrione & Mello (2012), a forma clássica de classificar a pesquisa científica pode ser dada pela Figura 2.1.

Quanto a natureza, a pesquisa em questão caracteriza-se como aplicada. Segundo Appolinário (2006), a pesquisa aplicada tem por objetivo ser comercial através do desenvolvimento de novos processos ou produtos orientados para a necessidade do mercado.

Quanto aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória. A pesquisa exploratória visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou construir hipóteses, envolvendo levantamento bibliográfico; entrevista com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e análise de exemplos que estimulem a compreensão (TURRIONI; MELLO, 2012).

Quanto a forma de abordar o problema, a pesquisa é considerada como combinada. Segundo MIGUEL et al. (2012), a combinação de abordagens qualitativa e quantitativa permite que as vantagens de uma amenize as desvantagens de outra, possibilitando dessa maneira, que todos os métodos e técnicas de coletas de dados disponíveis sejam utilizados em todas ou em algumas etapas do processo de pesquisa, promovendo evidências mais abrangentes do que seria proporcionado pelas abordagens separadamente.

Quanto ao método utilizado, a pesquisa foi feita através de modelagem e simulação. A Modelagem e simulação é empregada quando se deseja experimentar, através de um modelo matemático, um sistema real, determinando-se como o sistema responderá as modificações que são propostas (TURRIONI; MELLO, 2012).

Conforme Bertrand & Fransoo (2002), a literatura apresenta duas classes distintas de pesquisa baseada em modelos e simulações quantitativas: axiomática e empírica. Para a primeira classe, onde a pesquisa se classifica, a preocupação fundamental é obter soluções para o modelo em questão e assegurar que tais soluções ajudem a esclarecer a estrutura do problema descrito no modelo (MIGUEL et al., 2012). Ou seja, a pesquisa axiomática irá produzir conhecimento acerca do comportamento de certas variáveis do modelo, baseada em premissas sobre o comportamento de outras variáveis do modelo, podendo também, produzir conhecimento sobre como manipular certas variáveis admitindo um comportamento para as outras variáveis do modelo.

Do ponto de vista da técnica de coleta de dados, a pesquisa é considerada documental. A fonte e coleta de dados está restrita a documentos escritos ou não, a fontes primárias e

secundárias, contemporâneas ou retrospectivas (TURRIONI; MELLO, 2012). As fontes primárias são aquelas que são compiladas na ocasião do acontecimento, já as fontes secundárias são obtidas por meio de revistas, jornais, publicações avulsas e teses cuja autoria seja conhecida.

2.1. A realização da pesquisa

A pesquisa foi realizada seguindo algumas etapas importantes para obtenção dos resultados finais e conclusões do trabalho. A princípio, foi delimitado a área de abrangência do assunto, que estaria relacionado a Gestão de Riscos Multidimensional. A escolha se deu pelo fato de ser uma área de conhecimento nova na pesquisa acadêmica e por afinidade dos assuntos abordados.

Definido a área de abrangência, o próximo passo foi a escolha do tema a ser trabalhado. A maioria das pesquisas nessa área desenvolveram seus estudos apenas sob pontos de análise de risco multidimensional, tanto de forma qualitativa, como quantitativa. Porém, quando se fala em gerenciamento de risco, há uma abrangência maior e contempla também a forma como se trata os riscos. Esse tratamento está associado a escolhas de estratégias de prevenção e mitigação que reduzam, de maneira satisfatórias, os riscos inerentes aos processos produtivos. Nesse sentido, o tema do trabalho foi delineado por esse gap existente entre os estudos voltados para gerenciamento de risco multidimensional.

Logo após a escolha do tema, o passo seguinte foi realizar diversas pesquisas na literatura. As bases mais utilizadas no estudo em questão foram a *Scopus* e *Web of Science*. Essas duas bases serviram de apoio ao embasamento teórico deste trabalho. Após isso, foram consolidados os objetivos gerais e específicos do trabalho, assim como as justificativas.

De posse dos objetivos, o próximo passo foi o desenvolvimento do modelo proposto. O modelo é uma extensão do que foi proposto em Brito & de Almeida (2009) e se baseou nas necessidades atuais, encontradas na literatura, relacionadas a escolha de estratégias de prevenção e mitigação dos riscos, sob ótica multidimensional, atendendo as exigências de restrições de recursos.

Logo após definido o método, realizou-se a coleta de dados. Toda a coleta necessária foi realizada via artigos científicos, normas técnicas, das bases anteriormente citadas. A análise dos dados fora realizada através do uso de softwares, como foi o caso do ALOHA e EXCEL® 2016, citados ao longo do trabalho.

A base conceitual usada para esse trabalho é apresentada a seguir. São considerados conceitos relativos risco, gerenciamento de risco e modelo de risco multidimensional.

3. BASE CONCEITUAL

Neste capítulo será abordada a revisão conceitual necessária para a consolidação do uso do modelo de resposta ao risco. São considerados conceitos relativos a risco, gerenciamento de risco e análise multidimensional de risco.

3.1. Conceitos de Risco

A conceituação de risco não é algo novo, como afirma Hampel (2006), mas foi introduzido no século XIV a fim de permitir que mercadores italianos lidassem com a incerteza de perdas de mercadoria em suas embarcações. Desde então, o conceito de risco ganhou enorme relevância nos estudos das sociedades modernas e contemporâneas.

Apesar de seus sucessos em muitas áreas de aplicação, ainda não existe uma visão bem estabelecida e uma definição universalmente aceita dos princípios e conceitos fundamentais sobre risco (ANDRETTA, 2014). Além disso, devido a experiências, concordar com um conjunto unificado de definições, no campo de risco, não é algo realístico (AVEN, 2016).

A pluralidade dos significados atribuídos a risco faz com que seja mais adequado não falar do conceito de risco, mas de conceitos de risco (BRITO; DE ALMEIDA; MOTA, 2010). Choobineh e Behrens (1992) admitem que risco é a consequência de tomar uma ação na presença de incerteza. Já para Moura (2002), risco é a probabilidade de perda ou danos em pessoas, sistemas e equipamentos num determinado período de tempo e a incerteza quanto a ocorrência de um determinado evento.

Segundo a Norma Brasileira ISO 31000, risco pode ser definido como o efeito (positivo ou negativo) da incerteza nos objetivos, podendo esses objetivos terem diferentes aspectos (metas financeiras, de saúde, segurança e ambientais) e diferentes aplicações, sendo expresso em termos de uma combinação de consequências de um evento e a probabilidade de ocorrência associada (ISO-31000, 2009)

Valdes (2012) associa o conceito de risco como a probabilidade do evento vezes a gravidade potencial associada a lesão ocasionada. Já Ruppenthal (2013) afirma que risco pode ser indicado pela probabilidade de um acidente multiplicado pelo dano em valores monetários, vidas ou unidades operacionais. Em um sentido mais ampliado, entende-se risco como todo evento futuro e incerto que possa comprometer a realização de um ou mais objetivos de um projeto ou processo (LETTA et al., 2016)

De acordo com a *Society for Risk Analysis* (SRA), risco é definido como atividade futura com o potencial de ocorrência de consequência para a vida humana, para a saúde, para a

propriedade ou ambiente. As consequências são frequentemente observadas em relação a alguns valores de referência (valores planejados, objetivos, etc.), e o foco está normalmente em consequências negativas e indesejáveis (SRA, 2015a).

Aven (2012) afirma que é impossível apresentar e discutir todas as definições de risco sugeridas e utilizadas no campo científico. Este foi o ponto de partida para um processo de pensamento realizado por um comitê de especialistas da *Society for Risk Analysis* (SRA), que resultou em um novo glossário (SRA, 2015a). O glossário baseia-se na ideia de que ainda é possível estabelecer definições oficiais, sendo a chave para permitir diferentes perspectivas sobre conceitos fundamentais e estabelecer uma distinção entre as definições qualitativas globais e as medidas associadas (AVEN, 2016).

As definições qualitativas gerais de risco, segundo o glossário, são: (a) A possibilidade de uma ocorrência infeliz; (b) O potencial para realização de consequências indesejadas e negativas de um evento; (c) Exposição a uma proposição (por exemplo, a ocorrência de uma perda) do qual é incerto; (d) As consequências da atividade e incerteza associadas; (e) Incertezas e gravidade das consequências de uma atividade em relação a algo que os humanos valorizam; (f) As ocorrências de algumas consequências específicas da atividade e incertezas associadas; (g) O desvio de um valor de referência e incertezas associadas.

Já para medir ou descrever os riscos, usam-se várias métricas (SRA, 2015a):

1. A combinação de probabilidade e magnitude / gravidade das consequências;
2. A combinação da probabilidade de ocorrência de um perigo e de uma métrica de vulnerabilidade dada a ocorrência do perigo;
3. O trio (s_i, p_i, c_i) onde s_i é o i -ésimo cenário, p_i é a probabilidade desse cenário, e c_i é a consequência do i -ésimo cenário, $i = 1, 2, \dots, N$;
4. O trio composto por (C', Q, K) , onde C' é algumas consequências especificadas, Q uma medida de incerteza associada a C' (tipicamente probabilidade) e K o conhecimento *background* que suporta C' e Q (que inclui um julgamento de robustez desse conhecimento);
5. Consequências esperadas (danos, perda), por exemplo, calculadas por:
 - i) Número esperado de mortes em um período de tempo específico ou o número esperado de mortes por unidade de tempo de exposição;
 - ii) O produto da probabilidade de ocorrência do perigo e a probabilidade de o objeto relevante ser exposto, dado o perigo e o dano esperado, dado que o perigo ocorre e o objeto está exposto a ele (o último termo é uma métrica de vulnerabilidade);

iii) “Expected disutility”.

6. Uma distribuição de probabilidade para o dano (por exemplo, uma distribuição de probabilidade triangular).

Numa situação de decisão específica, um conjunto selecionado de métricas deve ser determinado para atender à necessidade do suporte à decisão, ou seja, a adequação dessas métricas irá depender do contexto em que o risco está inserido (AVEN, 2016).

Quando se discute sobre indústrias químicas e petroquímicas logo se associa a uma atividade onde todo o processo envolve riscos. Conforme Veyret (2013), os riscos industriais estão associados à produção e ao transporte de materiais perigosos, e ao armazenamento de produtos tóxicos. São classificados em três tipos: explosão - podendo atingir pessoas, solo, flora, fauna e edificações; vazamento - provocando diversas formas de poluição; e incêndio.

Para que esse tipo de instalação industrial possa exercer uma atividade com o nível mínimo de risco, tanto ao homem quanto ao meio ambiente, é necessário ter conhecimento de todo processo, dos riscos envolvidos e por fim o controle deste (DI DOMENICO; VAZ; DE SOUZA, 2014).

3.2. Gerenciamento de Riscos

De acordo com IFAC (2011), a gestão de riscos pode ser definida como o processo que tem por objetivo a mitigação dos riscos sobre as organizações. De maneira complementar, Ruppenthal (2013) define o gerenciamento de risco como um processo formal em que as incertezas presentes são sistematicamente identificadas, analisadas, estimadas, categorizadas e tratadas, visando equilibrar os resultados de oportunidades de ganhos com a minimização de perdas, permitindo o aprimoramento contínuo do processo de decisão e a melhoria crescente do desempenho da organização.

Tesfamariam et al. (2010) acreditam que o processo de gerenciamento de riscos é desenvolvido 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. Já Bialas e Flisiuk (2018) falam que o processo de gerenciamento de risco é contínuo, incluindo a identificação, análise e avaliação de perigos potenciais em um sistema ou perigos relacionados a uma determinada atividade.

Para que esse processo seja eficaz, é necessário que a organização, em todos os níveis, entenda alguns princípios básicos (ISO-31000, 2009):

- a) O gerenciamento de risco cria e protege valor;

- b) O gerenciamento de risco é parte integrante de todos os processos organizacionais;
- c) O gerenciamento de risco é parte da tomada de decisões;
- d) O gerenciamento de risco aborda explicitamente a incerteza;
- e) O gerenciamento de risco é sistemática, estruturada e oportuna;
- f) O gerenciamento de risco se baseia nas melhores informações disponíveis;
- g) O gerenciamento de risco é feito sob medida;
- h) O gerenciamento de risco considera fatores humanos e culturais;
- i) O gerenciamento de risco é transparente e inclusiva
- j) O gerenciamento de risco é dinâmica, interativa e capaz de reagir a mudanças;
- k) O gerenciamento de risco facilita a melhoria contínua da organização.

Aderir a esses princípios traz um fator significativo no melhor alcance de custos e objetivos técnicos para as organizações, constituindo uma base sobre a qual um entendimento compartilhado das melhores práticas e um aumento da competência coletiva pode ser construído (OLECHOWSKI et al., 2016).

Aven (2016) identifica dois pilares básicos e bem estabelecidos no gerenciamento de risco:

- (i) Principais estratégias de gerenciamento de risco disponíveis;
- (ii) A estrutura do processo de gerenciamento de risco.

As três principais estratégias usadas para gerenciar riscos são: a baseada no risco, a cautelar/preventiva e a discursiva (RENN, 2008; SRA, 2015b).

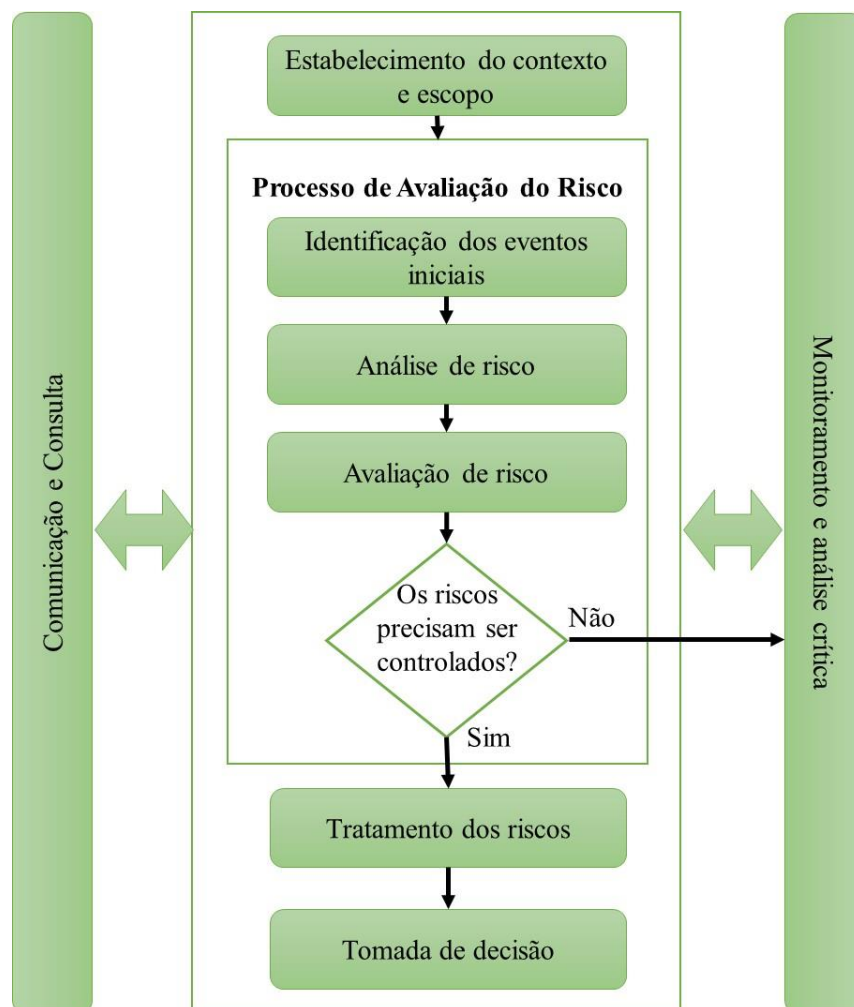
A estratégia baseada no risco refere-se ao tratamento do risco - prevenção, redução, transferência e retenção - usando avaliações de risco de forma absoluta ou relativa. A estratégia cautelar/preventiva destaca características como contenção, desenvolvimento de substitutos, fatores de segurança, redundância na concepção de dispositivos de segurança, bem como fortalecimento do sistema imunológico, diversificação dos meios para aproximação de finalidades idênticas ou similares, concepção de sistemas com opções de resposta flexíveis e melhoria das condições de gestão de emergência e adaptação do sistema. Um aspecto importante é a capacidade de ler adequadamente os sinais e os precursores de eventos graves.

Todos os regulamentos de risco são baseados em algum nível de tais princípios para atender às incertezas, riscos e potenciais para surpresas. Já a estratégia discursiva utiliza medidas para construir confiança e confiabilidade, através da redução de incertezas e ambiguidades, esclarecimentos de fatos, envolvimento de pessoas afetadas, deliberação e

responsabilidades (Renn, 2008; SRA, 2015b). Na maioria dos casos, a estratégia apropriada seria uma mistura dessas três estratégias (AVEN, 2016).

Para o segundo pilar, a estrutura do processo de gerenciamento de risco pode ser dividida nas seguintes etapas, conforme mostrada na Figura 1 e detalhadas nas subseqüentes subseções.

Figura 1 – Estrutura do processo de gerenciamento de risco



Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de ISO-31000 (2009)

3.2.1. Comunicação e consulta

A comunicação, seja ela interna ou externa, e consulta eficaz devem assegurar que os responsáveis pela execução do processo de gerenciamento de riscos e as partes interessadas compreendam o fundamento sobre as quais as decisões são tomadas e as razões pelas quais ações específicas são requeridas (TREINTA et al., 2013).

Os planos de comunicação e consulta devem ser desenvolvidos logo num estágio inicial. Estes devem ser desempenhados para favorecer, adequadamente, o processo de reporte interno e externo das decisões tomadas, assim como quaisquer alterações subsequentes, fazendo com que as informações pertinentes derivadas da aplicação do gerenciamento de riscos estejam disponíveis nos níveis e nos momentos apropriados (ISO-31000, 2009).

Destaca-se que essa fase deve ter lugar durante todas as etapas do processo do gerenciamento de riscos (RAMOS; AREZES; AFONSO, 2012)

3.2.2. Estabelecimento do contexto e escopo

É importante para as organizações que o processo de gerenciamento do risco leve em consideração o contexto ao qual o risco está sendo gerenciado, para que possa assegurar que a abordagem utilizada de gestão seja apropriada as circunstancias, à organização e aos riscos que afetam a realização de seus objetivos (HAUER, 1982; ISO-31000, 2009).

Nessa etapa, a organização articula suas metas, definindo os parâmetros externos e internos a serem levados em consideração ao gerenciar riscos, e estabelece o escopo e os critérios de risco para o restante do processo.

Os parâmetros externos são baseados no contexto de toda a organização, porém com detalhes específicos sobre requisitos legais e regulatórios, percepções das partes interessadas e outros aspectos dos riscos específicos para o escopo do processo de gerenciamento de risco. Já os parâmetros internos são alinhados com a cultura, processos, estrutura e estratégia da organização.

3.2.3. Processo de avaliação de Risco

O processo de avaliação de risco é uma parte central do gerenciamento de risco e tem por objetivo descrever o risco, identificando os eventos iniciais relevantes e estimando o risco através de suas causas e consequências (AVEN, 2008). Essa avaliação visa servir de ferramenta para uma tomada de decisão mais confiável no trato com o risco, buscando, para isso, medi-lo.

Esse processo pode ser realizado com diferentes graus de detalhes, dependendo do risco, do objetivo da avaliação e das informações, dados e recursos disponíveis (RAMOS; AREZES; AFONSO, 2012), sendo composto por três etapas principais: identificação dos eventos iniciais, análise dos riscos e avaliação dos riscos.

3.2.3.1. Identificação dos eventos iniciais

Na primeira etapa são identificados os eventos iniciais de risco, suas causas e seus efeitos, que podem ocorrer por meio de ameaças e oportunidades. É uma etapa caracterizada pelo levantamento de perigos associados a operação, a falha ou a características de uma potencial fonte de dados (Brito & de Almeida, 2009). O objetivo principal é gerar uma lista abrangente de eventos iniciais que possam criar, reforçar, prevenir, diminuir, acelerar ou retardar o cumprimento das metas da organização (RAMOS; AREZES; AFONSO, 2012).

Aven (2008) afirma que é difícil evitar ou reduzir as consequências de perigos que não foram identificados, por isso, essa etapa é uma tarefa crítica no processo de avaliação de riscos. Nesse sentido, é importante que a identificação dos eventos iniciais seja realizada de forma estruturada e sistemática e que envolva pessoas que tenham as competências necessárias (ISO-31000, 2009).

Várias são as técnicas que podem ser utilizadas para identificação de eventos iniciais: HAZOP, APP, *What-if*, Diagrama *Bow-tie*, entrevistas, entre outras. Uma característica comum de todas essas ferramentas é que elas são baseadas em um tipo de brainstorming estruturado no qual usam listas de verificação, palavras-chave, etc., adaptadas ao problema em estudo (AVEN, 2008)

O importante é saber as limitações de cada uma das técnicas e mesclar o seu uso, a fim de obterem-se benefícios de várias técnicas eliminando as limitações particulares a cada uma (SOUZA; BARCAUI, 2014). Essas e outras ferramentas para o gerenciamento de risco serão discutidas na subseção 3.3.

3.2.3.2. *Análise de risco (risk analysis)*

A segunda etapa é nomeada de análise de risco. Nela, os riscos identificados no passo anterior, são estimados segundo as probabilidades de ocorrência dos eventos iniciais e suas consequências. Essa estimativa resultará em uma medida de risco que auxiliará os especialistas no gerenciamento de risco (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014b).

Ramos *et al.* (2012) acredita que é importante levar em conta a forma como são expressas essas probabilidades e consequências e a forma como essas são combinadas para determinar se um nível de risco deve refletir o tipo de risco, as informações existentes e os fins para as quais vai ser utilizado o resultado do processo de avaliação de risco.

Para estimar as probabilidades de ocorrência dos eventos iniciais, três formas são determinadas: por análise histórica em banco de dados, ou *in loco*; pela elicitación do conhecimento e experiência do especialista ou pela combinação dos dois modos (KIRCHHOFF, 2004).

É importante frisar que os dados de falha resultado dos bancos de dados devem ser utilizados com bastante cuidado, pois diversos fatores podem influenciar nas taxas de falha, tais como, os tipos de falha, característica dos sistemas envolvidos, condições ambientais, tipos de operações envolvidas, existência de normas dos procedimentos operacionais, entre outros (GARCEZ et al., 2009).

Já para estimar as consequências são analisados os principais cenários de perigo decorrentes dos desdobramentos das hipóteses acidentais consideradas na etapa anterior, de modo que se tenha uma visão global da magnitude dos efeitos adversos decorrentes de eventos indesejados. Tal estimativa envolve o estudo do tipo, magnitude e comportamento do evento iniciador para que se possa melhor mensurar os danos causados por ele.

Além disso, um evento iniciador geralmente pode resultar em consequências de diferentes dimensões ou atributos, como por exemplo, perda financeira, perda de vidas e danos ambientais (GARCEZ & ALMEIDA, 2014). A análise da árvore do evento (ETA) é o método mais comum para analisar as consequências, fornecendo uma análise de risco com a probabilidade de ocorrência (ANDREWS; DUNNETT, 2000; DE ALMEIDA et al., 2015). Essa ferramenta será discutida na sessão 2.2.6.

Segundo Aven & Hiriart (2011), a análise de risco pode ser qualitativa, quantitativa ou uma combinação destas, dependendo das circunstâncias. Para o caso específico de indústria de processos químicos e petroquímicos, a análise de risco quantitativa (QRA) é um método amplamente aplicado (BONVICINI et al., 2015; CHU; LEE; CHANG, 2017; COZZANI et al., 2005; DI DOMENICO; VAZ; DE SOUZA, 2014; MARHAVILAS; KOULOURIOTIS, 2008; VAN DER VOORT et al., 2007; YOON et al., 2013). Apesar do fato óbvio de que o QRA não é uma descrição exata da realidade, pode representar os melhores dados de ferramentas preditivas analíticas disponíveis para avaliar os riscos de complexos processos (VILLA et al., 2016).

3.2.3.3. Avaliação de risco (*risk evaluation*)

Esta última etapa no processo de avaliação de risco tem por finalidade auxiliar na tomada de decisões com base nos resultados da fase anterior, comparando o nível de risco encontrado durante o processo de análise com os critérios de risco estabelecidos pelo contexto que foi considerado (ISO-31000, 2009).

Essa análise comparativa requer o estabelecimento de limites de aceitabilidade do risco sendo usado como sistema de referência que permite comparações em diversas situações. Uma vez estabelecido esses limites, faz-se necessário uma discussão sobre a tolerância do risco, que

irá depender de julgamentos subjetivos de pessoas sobre a percepção de risco, variando assim, de indivíduo para indivíduo, de comunidade para outra e especialmente entre comunidades competentes (por exemplo, governos, organizações não governamentais, instituições acadêmicas, etc.).

Existem na literatura diversas técnicas que abordam o conceito de tolerabilidade e aceitabilidade, dentre elas pode-se citar: princípio ALARP e Curva F-N. Essas ferramentas são utilizadas com uma maior frequência nos estudos visto o seu fácil entendimento, porém apresentam a desvantagem de não considerar múltiplas dimensões de danos/consequências (por exemplo, danos não-fatais, danos a propriedade, perda monetária de produção, etc.) que podem também serem considerados para permitir uma avaliação de risco realística (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014c).

Essa capacidade de compreensão aprofundada das consequências, juntamente com a mensuração das probabilidades (empíricas ou subjetivas) dos eventos, contribui sobretudo para o processo de tratamento e mitigação dos riscos, por meio de ações preventivas e mitigativas (DE ALMEIDA et al., 2015).

3.2.3.4. *Tratamento dos riscos*

A fase de tratamento do risco é muito importante, uma vez que as decisões tomadas nesta fase afetam diretamente a exposição ao risco (KASAP; KAYMAK, 2007). Essa etapa envolve a construção de planos de resposta ao risco, tendo como principal objetivo modificar os riscos identificados no estágio anterior.

As respostas aos riscos geralmente são agrupadas de acordo com o efeito pretendido sobre o risco a ser tratado, seguindo as seguintes estratégias (ASGARI; HAINES; WALLER, 2016; KASAP; KAYMAK, 2007):

- a) Evitar: gerar um curso de ação que elimine o risco.
- b) Transferência: transferir a responsabilidade pelo risco particular para um terceiro, utilizando um seguro ou, na arena internacional, formando tratados e acordos internacionais.
- c) Prevenção e mitigação: refere-se a ações tomadas para reduzir a probabilidade de ocorrência de um evento desfavorável ou o impacto desse evento. A mitigação geralmente é executada na forma de um plano projetado para lidar com eventos possíveis de alta ameaça.
- d) Planejamento de contingência: refere-se a ações específicas a serem tomadas quando ocorre um evento de risco potencial. Em geral, os planos de contingência

devem ser desenvolvidos com antecedência em preparação para o momento em que os eventos de risco são realizados.

Das quatro opções, apenas duas (transferência; prevenção e mitigação) envolvem um investimento real e exigem alocação orçamentária (GONEN, 2011). Além disso, selecionar a opção mais adequada de tratamento envolve equilibrar, de um lado, os custos e os esforços para uma implementação e, do outro, os benefícios decorrentes, relativos a requisitos legais, regulatórios ou quaisquer outros, tais como o de responsabilidade social e o de proteção ao ambiente (ISO-31000, 2009).

É importante destacar que os planos de resposta ao risco devem levar em consideração os riscos que demandam um trato economicamente não justificável, como por exemplo, os riscos severos (os da indústria química e petroquímica) que apresentam grande consequência negativa, porém são raros (com probabilidade muito baixa). A finalidade desses planos é documentar como as opções de tratamento escolhidas serão implementadas. O foco principal deste trabalho estará concentrado nesta etapa do gerenciamento de risco, sendo este tópico mais detalhado na seção 4.2.

3.2.3.5. Monitoramento e Análise crítica

O monitoramento é um processo contínuo de verificação, supervisão, observação crítica ou identificação da situação para identificar mudanças. Já a análise crítica é a atividade realizada para determinar a adequação, suficiência e eficácia do assunto em questão para atender os objetivos.

Assim como a etapa de comunicação e consulta, esse ponto também deve abranger todas as etapas do processo de gerenciamento de riscos, com a finalidade de: garantir que os controles sejam eficazes no projeto e na operação; obter informações adicionais para melhorar o processo de avaliação de riscos; analisar os eventos, mudanças, tendências, sucessos e fracassos e aprender com eles; detectar mudanças no ambiente interno e externo, incluindo alterações nos critérios de risco e no próprio risco, os quais podem requerer revisão dos tratamentos dos riscos e suas prioridades (ISO-31000, 2009).

Além disso, é necessário que o monitoramento e a análise crítica sejam planejados como parte do processo de gerenciamento de risco, envolvendo a checagem e a vigilância regulares, sendo de forma periódica ou em resposta a um fato específico.

3.3. Ferramentas utilizadas no processo de gerenciamento de risco

As ferramentas de gerenciamento de risco são metodologias ou técnicas que auxiliam na tomada de decisões, sendo projetados para prever e prevenir acidentes em grande escala (ÖZFIRAT et al., 2017). Existem, na literatura, várias técnicas, onde: umas são mais adequadas para avaliar as causas de um problema, outras as suas consequências; outras trazem apenas o aspecto qualitativo da análise; e outras trazem o aspecto quantitativo. A escolha desses métodos dependerá das necessidades dos gestores, podendo ser selecionados apenas uma ferramenta ou uma combinação delas.

Para o processo de avaliação de risco presente neste trabalho, as ferramentas e metodologias consideradas foram: Análise Preliminar de Perigo (APP), Análise de Árvore de Eventos (ETA) e o princípio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*). Já para o processo de tratamento do risco, a ferramenta considerada foi a *Bow-tie*. A escolha foi motivada pelo fato de a ferramenta ser uma maneira simples de descrever e analisar os caminhos de um risco, propondo barreiras preventivas ou de proteção para reduzir, respectivamente, sua ocorrência e gravidade. As ferramentas serão detalhadas nos próximos tópicos.

3.3.1. Análise Preliminar de Perigo (APP)

A análise Preliminar de Perigo (em inglês, *Preliminary Hazard Analysis – PHA*) é uma metodologia realizada, principalmente, na fase de concepção ou desenvolvimento de um novo sistema ou processo, embora também possa ser útil na análise de instalações existentes e na priorização dos perigos quando as circunstâncias não permitirem o uso de técnicas mais adequadas.

O principal objetivo da APP é identificar os potenciais eventos perigosos ou indesejáveis capazes de gerar perdas na fase de execução do sistema. Segundo Viana et al., (2014), essa técnica é uma análise de tipo qualitativa, portanto ela não fornece estimativas numéricas de risco e sim, uma classificação dos resultados em faixas qualitativas de frequência, severidade e risco.

A elaboração de uma APP passa por algumas etapas básicas, a saber (SHERIQUE, 2015):

- a) Revisão de problemas conhecidos: A busca por analogias ou similaridades com outros sistemas;
- b) Revisão da missão a que se destina: Atentar aos objetivos, exigências de desempenho, principais funções e procedimentos, estabelecer os limites de atuação e delimitar o sistema;

- c) Determinação dos riscos principais: Apontar os riscos com potencialidade para causar lesões diretas imediatas, perda de função, danos a equipamentos e perda de materiais;
- d) Revisão dos meios de eliminação ou controle de riscos: Investigar os meios possíveis de eliminação e controle de riscos, para estabelecer as melhores opções compatíveis com as exigências do sistema;
- e) Analisar os métodos de restrição de danos: Encontrar métodos possíveis e eficientes para a limitação dos danos gerados pela perda de controle sobre os riscos;
- f) Indicação de quem levará a sério as ações corretivas e/ou preventivas: Indicar responsáveis pela execução de ações preventivas e/ou corretivas, designando também, para cada unidade, as atividades a desenvolver.

A realização da análise propriamente dita é feita através do preenchimento de uma planilha de APP, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela.1 – Planilha de Análise Preliminar de Perigo

APP – Análise Preliminar de Perigo						
Empreendimento:			Subárea:			
Referência			Observações/Recomendações			
Ordem	Perigo	Causa	Consequência	Categoria		
				Freq.	Sev.	Risco

Fonte: O Autor (2018)

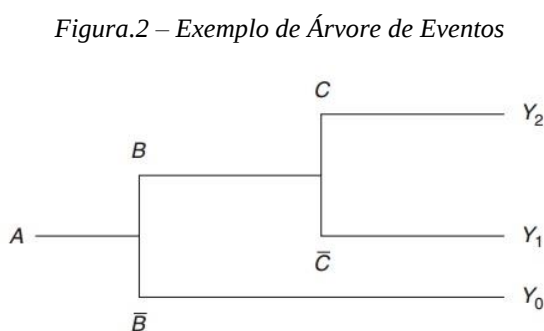
As definições de cada coluna apresentada na planilha são assim descritas: (i) Subárea: Etapas do processo a ser analisada; (ii) Ordem: Sequência dos perigos identificados no processo; (iii) Perigo: São os eventos geradores da hipótese acidental, associados normalmente a certas condições que podem causar danos ao meio ambiente, patrimônio ou pessoas; (iv) Causas: São os fatos que geram os eventos acidentais; (v) Consequências: São as possíveis consequências que se sucedem a um determinado perigo; (vi) Categoria Freq.: é a frequência de ocorrência correspondente às causas dos perigos identificados; (vii) Categoria Sev.: É o grau qualitativo para efeito correspondente ao cenário acidental; (viii) Categoria Risco: É a relação entre a frequência e a consequência de um risco; (ix) Observações/Recomendações: São as observações ou recomendações (ações preventivas ou mitigativas) pertinentes ao risco de cada cenário acidental a fim de eliminar ou reduzir as suas consequências.

Como o próprio nome já diz, é uma análise preliminar e indutiva, já que se origina do perigo presente em uma parte específica de uma instalação visando alcançar o principal risco que pode ser gerado pela falha dessa parte. De forma geral, a APP é vista como predecessora de outras análises, ajudando a selecionar algumas áreas de importância nas quais técnicas de análise de riscos mais completas possam ser empregadas.

3.3.2. Análise de Árvore de Eventos (ETA)

A análise da árvore de eventos é um método indutivo, que envolve a determinação dos eventos decorrentes da falha de um componente ou parte do sistema. A partir de um evento iniciador ou de uma falha de origem, a análise da árvore de eventos permite a estimativa do desvio do sistema, levando em conta de forma sistemática o funcionamento ou falha de dispositivos de detecção, alarme, prevenção, proteção ou intervenção (MAREŞ; STELEA, 2017)

Além disso, conforme Andrews & Dunnett (2000), o ETA é também comumente usada para identificar as consequências que podem resultar após a ocorrência de um evento potencialmente perigoso. Nesse sentido, o método baseia-se na computação das probabilidades de possíveis resultados de um evento, sendo listados em ordem cronológica em um diagrama em forma de árvore, conforme Figura 2.



Fonte: O Autor (2018)

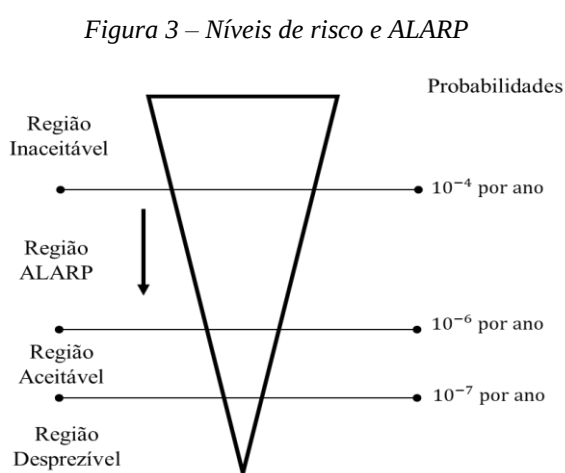
Nota: Adaptação de Aven (2008)

A partir de um evento inicial A, tem-se as probabilidades de ocorrência e de não ocorrência de eventos secundários B e C, onde Y representa as consequências relacionadas a cada evento. Após a construção de todas as árvores de eventos, as frequências dos cenários acidentais vinculadas às respectivas consequências são obtidas pelo produto entre a frequência do evento iniciador e as probabilidades dos eventos intermediários

Por ser uma ferramenta rápida e eficiente, o ETA tem sido amplamente utilizado em análises de risco e segurança em diferentes indústrias (ÖZFIRAT et al., 2017).

3.3.3. ALARP

A expressão ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) é um princípio que acredita que os riscos devem ser reduzidos a um nível que seja tão baixo quanto razoavelmente praticável. Essa abordagem trabalha com regiões aceitáveis, inaceitáveis, negligenciáveis e razoavelmente praticáveis (MELCHERS, 2001), como mostrado na Figura 3.



Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de Melchers (2001)

Os riscos são divididos em três regiões (BAYBUTT, 2014): riscos inaceitáveis que não podem ser justificados exceto em circunstâncias extraordinárias; riscos toleráveis que são considerados aceitáveis se a redução de risco adicional for impraticável, ou seja, o benefício não supera o impacto; e riscos aceitáveis, ou negligenciáveis, que são riscos tão baixos que não são motivo de preocupação.

Segundo Abrahamsen et al. (2018), a aplicação dessa abordagem baseia-se então, em primeiro lugar, na distinção entre um nível de risco intolerável, que não deve ser excedido, e um nível de risco insignificante que não suscita preocupação individual ou pública. Entre estes dois limites (a denominada região de tolerabilidade), a aplicação de medidas de redução de risco é prescrita.

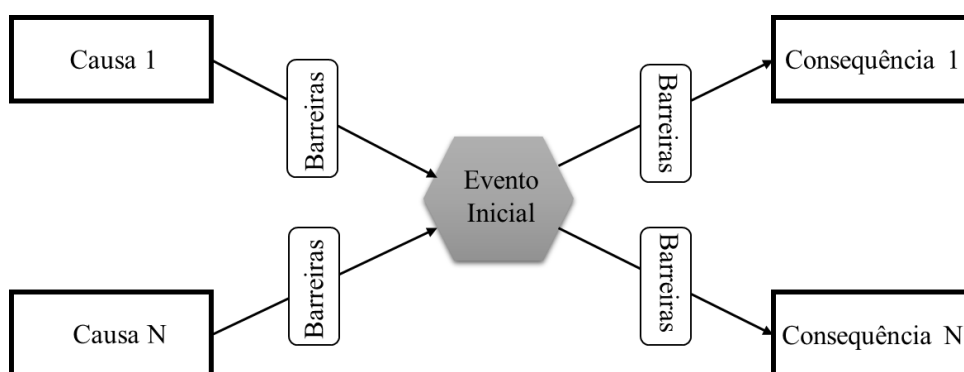
É importante destacar que essas medidas de redução de riscos devem ser implementada desde que não seja demonstrado que os custos de prevenção e/ou atenuação das consequências

de possíveis cenários acidentais sejam grosseiramente desproporcionais em relação aos ganhos obtidos (AVEN; HIRIART, 2011).

3.3.4. Bow-tie

Os diagramas *bow-tie* é uma ferramenta que descreve graficamente todo o cenário de um risco e propõe barreiras preventivas e mitigativas para reduzir, respectivamente, a ocorrência e a consequência dos riscos (BADREDDINE; AMOR, 2013). O princípio desta ferramenta é construir uma espécie de árvore para cada evento inicial identificado que representa todo o cenário de risco baseado em duas partes, como mostrado na Figura 4.

Figura 3.4 – Diagrama Bow-tie



Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de Nolan (2012)

Os cenários de causa típicos são identificados e representados no lado do pré-evento (lado esquerdo) do diagrama. Já as consequências e resultados de cenário são retratados no lado pós-evento (lado direito) do diagrama e as barreiras associadas estão incluídas.

A construção de diagramas de *bow-tie* é principalmente baseada no conhecimento dos especialistas e segue as mesmas regras básicas necessárias ao desenvolvimento de árvores de falhas e eventos, com o intuito de fornecer uma estimativa de risco subjacente de um evento perigoso selecionado (DUIJM, 2009; VILEINISKIS; REMENYTE-PRESCOTT, 2017).

Conforme Yaneira et al. (2013), a vantagem dessa técnica é que, por ser de natureza gráfica, facilita a compreensão do gerenciamento de riscos pelos gestores. O ponto fraco é que o diagrama ignora o aspecto dinâmico dos sistemas reais ficando restritos a uma representação gráfica de cenários diferentes (BADREDDINE; AMOR, 2013).

3.4. Modelo de decisão de risco multidimensional

De fato, várias são as definições e abordagens para risco. Contudo, como pode ser visualizado, a maioria dos conceitos permeia para um parecer de risco envolvendo impactos negativos (perdas) sobre cujos valores prevalece a incerteza associada a ocorrência dos eventos geradores destes impactos.

Para situações que envolvem incerteza, o risco pode ser definido matematicamente pela teoria da decisão (BERGER, 1985). Segundo Gomes et al. (2006), teoria da decisão é um conjunto de procedimentos e modelos de análise que procuram assegurar a coerência, a eficácia e a eficiência das decisões tomadas em função das informações disponíveis, antevendo cenários possíveis.

Garcez & de Almeida (2014) acreditam que essa teoria se baseia em hipóteses exaustivas sobre os estados da natureza (cenários de perigo), de experiências relativas a essas hipóteses, de um conjunto de ações permissivas e conjunto das consequências decorrentes da execução dessas ações.

Além disso, a teoria da decisão envolve aspectos como: Análise das informações passadas e presentes do sistema em estudo; Elicitação das distribuições de probabilidade que modelam as incertezas; Elicitação das preferências e valores dos tomadores de decisão quanto a problemática; Identificação ou concepção das alternativas de ação que direcionam os objetivos desejados; Combinação lógica matemática das alternativa de ação, das utilidades e das probabilidades com o modelo matemático do sistema, objetivando identificar o melhor curso de ações para o decisor; etc.

Para a formulação de um problema de decisão é importante definir alguns elementos usados pela teoria da decisão (SOUZA, 2007), conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela.2 – Elementos da teoria da decisão

Elemento	Significado
Estados da Natureza (θ)	Conjunto de estados de mundo, o objeto a respeito do qual o indivíduo está interessado. Estes estados devem apresentar uma descrição do objeto em análise, não deixando de fora nenhum aspecto relevante para o problema.
Ações (a)	Constituem o conjunto de alternativas ou conjunto de escolhas. Todo problema de decisão possui no mínimo duas possíveis ações disponíveis: escolher certa alternativa de ação ou não. Trata-se, portanto, de fazer a escolha adequada de uma ação a tomar, escolha esta que poderá ser baseada em dados (observações).

Payoffs (p)	Para cada ação a_i que o decisor escolha e para cada estado da natureza θ_k que venha a ser deflagrado, existe uma consequência P_{ik} que poderá ocorrer. Como as consequências das ações são sempre incertas, de forma que nunca se sabe exatamente qual bem ou perda que irá se obter em decorrência dessa combinação (estados da natureza e ação adotada), as distribuições de probabilidade sobre as consequências determinísticas é que são consideradas as consequências do problema.
Observações (x)	Em muitos problemas de decisão pode existir um conjunto de dados (observações) de uma variável ou de variáveis que guardem alguma relação com θ . Em muitas situações, não se pode observar diretamente os estados da natureza, seja por impossibilidade física, técnica ou ainda econômica, seja por que θ não tenha uma medida direta. Neste caso se trabalha com observações.
Função Consequência ($P(x \theta, a)$)	Uma vez adotada um curso de ação a , inicia-se um mecanismo probabilístico que vai escolher uma consequência para o decisor. Esta escolha probabilística é influenciada também pela natureza
Distribuição a priori dos estados da natureza ($\pi(\theta)$)	A incerteza sobre θ pode ser de natureza probabilística ou não probabilística. Será de natureza probabilística quando houver conhecimento mais preciso sobre θ na forma de distribuição de probabilidade $\pi(\theta)$ sobre os estados da natureza. Isto pode ser obtido por meio de duas fontes: dados objetivos sobre θ , ou de conhecimento dos especialistas.
Teoria da Utilidade	Teoria que quantifica a desejabilidade do decisor pelos bens que este poderá obter. Ela permite avaliar as consequências de um problema de decisão por meio de um processo de eliciação de preferências, buscando incorporar ao problema o comportamento do decisor em relação ao risco.
Função Utilidade ($u(c)$)	Representa a estrutura de preferência do decisor quanto as distribuições associadas as consequências. Essa função cria a escala de utilidade, que estabelece para cada <i>payoff</i> , um valor de utilidade (variando de 0 a 1, sendo 0 a menos preferida consequência e 1 a mais preferida consequência).

Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de Souza (2007)

A função perda, pela teoria da decisão, pode ser expressa como o negativo da função utilidade da consequência esperada (BERGER, 1985):

$$L(c) = -U(c) \quad (1)$$

A função utilidade, $u(c)$, é estimada de acordo com o domínio de consequências (KEENEY; RAIFFA, 1976). É calculada pela Equação 2.

$$u(\theta, s) = \int_c U(c)P(c|\theta, s) dc \quad (2)$$

Por sua vez, o risco corresponde à perda esperada quando o verdadeiro estado da natureza é θ e o decisor escolhe o curso de ação a . Conhecendo a distribuição *a priori* dos estados da natureza $\pi(\theta)$ que dependerá das características/condições do contexto de estudo e, baseando no estudo proposto por Brito & de Almeida (2009), o risco associado é expresso pela equação 3.

$$r(s) = \sum_{\theta} \left(\pi_s(\theta) \left(- \int_c U(c)P(c|\theta, s)dc \right) \right) + (-1)\pi_s(\theta_N) \quad (3)$$

onde r_s são os diversos riscos nos sistemas analisados; $\pi_s(\theta)$ será o valor da probabilidade *a priori* do cenário acidental na determinado sistema analisado; $U(c)$ é a utilidade calculada; $P(c|\theta, s)$ é a função de distribuição de probabilidade da consequência; e θ_N representa o cenário de normalidade do sistema onde não há consequências (por conta disso, o valor da função perda é igual a -1).

Dessa forma, o risco associado a uma alternativa de ação, como definido pela teoria da decisão, agrega tanto as incertezas sobre a obtenção de perdas $P(c|\theta, s)$, como as incertezas associadas aos estados da natureza $\pi_s(\theta)$, bem como as preferências do decisor $U(c)$ sobre o conjunto de consequências que o mesmo poderá obter (BRITO; DE ALMEIDA, 2009).

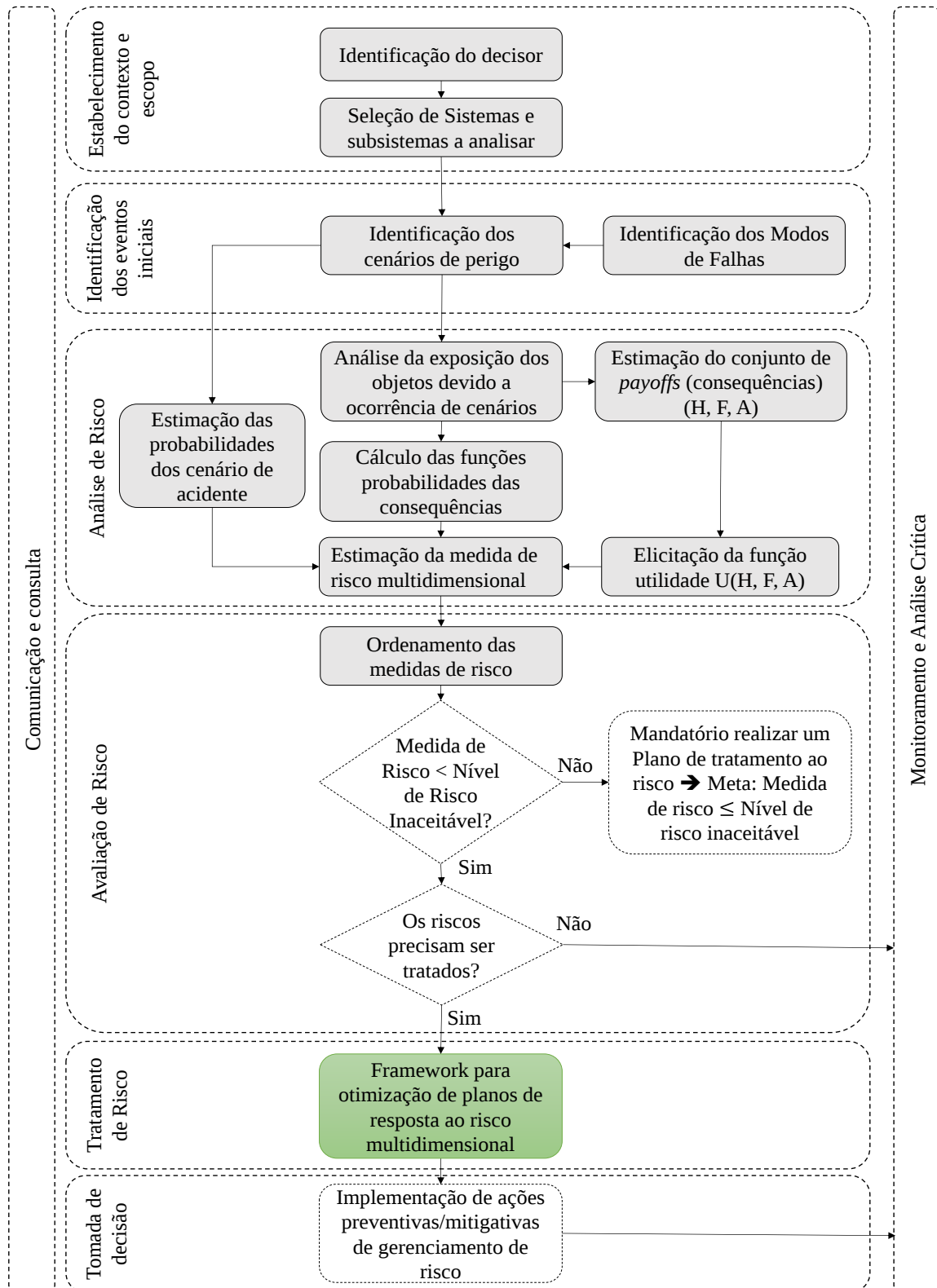
Alencar & Almeida (2010) afirmam que quando se estuda sobre risco, o conjunto de consequências apresenta diferentes distribuições espaciais e temporais e afetam diferentes grupos populacionais e diferentes gerações, afetando assim, a múltiplas dimensões ou a múltiplos critérios, caracterizando assim, um problema de decisão multicritério.

Entretanto, diversos estudos sobre tomada de decisão envolvendo risco não consideram as múltiplas dimensões existentes, pois na maioria dos casos é analisada através de diferentes índices que são difíceis de agregar em uma avaliação conjunta (ALMEIDA & ALMEIDA-FILHO, 2009). Os estudos consideram apenas questões relacionadas aos danos aos seres humanos, como atendida pelas maioria das metodologias de gerenciamento de risco clássicas (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

À luz da necessidade de contribuir para análise de diversos aspectos, Brito & de Almeida (2009) propuseram um modelo de análise de risco multidimensional agregando perspectivas de consequência nas dimensões financeira, humana e ambiental.

A partir da incorporação das preferências dos decisores, como definido pela teoria da decisão, é possível modelar seu comportamento na tomada de decisão ao exercer atividades de planejamento, manutenção e prevenção e possibilitar a mitigação dos riscos e consequentemente as consequências a eles associados (MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016). Esta é uma necessidade realística diária na tomada de decisão e, por conseguinte, Brito & de Almeida (2009) propuseram uma modelagem probabilística através da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), a partir de uma estrutura axiomática do estabelecimento de preferências do decisor. Dessa maneira, os autores construíram um fluxograma do modelo com suas etapas e relações, conforme apresentado na Figura 5, em destaque na cor cinza. O restante do *framework* apresentado na Figura 5 representa o complemento do processo de gerenciamento de risco clássico, definido na Figura 1 e destacando, em verde, o tratamento dos riscos, foco deste trabalho.

Figura.5 – Estrutura do modelo de decisão



Legenda:

 Framework de gerenciamento de risco

 Framework do modelo de análise de risco multidimensional proposto por Brito & Almeida (2009)

Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de Brito e de Almeida (2009)

3.4.1. Identificação do decisor

A etapa inicial do modelo proposto por Brito & de Almeida (2009) é composta pela identificação do decisor ou agentes de decisão. Segundo de Almeida (2013), os decisores são indivíduos ou um grupo de indivíduos que possuem poder sobre a tomada de decisão, influenciando de acordo com os juízos de valor que representam suas preferências e percepções, sendo responsabilizados pelas consequências da decisão tomada.

Acredita-se que o desempenho do decisor impacta diretamente na competitividade da organização, que depende fortemente da forma como os problemas de decisão são analisados (DE ALMEIDA, 2013). Nesse sentido, é de suma importância a correta identificação do decisor, sendo necessário que o mesmo preencha as características de conhecimento dos cenários acidentais, das dimensões das consequências causadas, das medidas de proteção e mitigação, além de ter a responsabilidade e a experiência necessárias acerca do contexto de decisão.

3.4.2. Seleção de sistemas e subsistemas a analisar

Esta etapa do modelo corresponde a segmentação da instalação objeto de estudo em áreas ou subáreas, estabelecendo-se uma seleção de alternativas, representados por $S = \{1, 2, \dots, s\}$. Esta seleção é um conjunto discreto e corresponde a união de todas as áreas ou subáreas distintas por suas características, que quando somadas, totalizam a extensão da análise de risco, e para os quais se deseja estabelecer uma adequada categoria de riscos a fim de que medidas próprias de prevenção, supervisão, controle e manutenção sejam adotados, observando para isso os múltiplos critérios e as preferências do decisor (BRITO; DE ALMEIDA, 2009).

É necessário destacar que as características que compõem essa segmentação (área) devem ser homogêneas, considerando tanto questões técnicas, como financeiras, ambientais, sociais, etc., para que o risco avaliado seja homogêneo a toda extensão dessa segmentação (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014b). Caso uma área não tenha características homogêneas pode-se subdividir essa área em novas subáreas, e assim por diante.

3.4.3. Identificação dos cenários de perigo

Nesta etapa são levantados todos os possíveis estados da natureza, formando o conjunto $\Theta = \{\theta_{11}, \theta_{12}, \dots, \theta_{21}, \theta_{22}, \dots, \theta_{jk}\}$, relacionados ao modo de falha j e ao cenário de perigo resultante k . Estes estados da natureza correspondem a uma descrição de todos os possíveis cenários resultantes de falhas operacionais incertas relacionadas ao modo de falha. Por

exemplo, no contexto de análise de risco em gasodutos de gás natural, dada o modo de falha e a presença de uma fonte de ignição, à existência de barreiras de confinamento, à existência de correntes de vento no local do vazamento, etc.

Essas falhas dispararão mecanismos probabilísticos que influenciarão a ocorrência desses cenários, que por sua vez afetarão as probabilidades de ocorrência dos impactos decorrentes do acidente (BRITO; DE ALMEIDA, 2009). Uma técnica útil para determinar esses possíveis cenários é a Análise de Árvore de Eventos (ETA), já mencionada anteriormente, que permite analisar a partir de um modo de falha, o sequenciamento de eventos iniciais e suas interações com os fatores que interferem no processo de evolução do evento.

3.4.4. Estimação das probabilidades dos cenários acidentais

Essa etapa corresponde a estimação das probabilidades *a priori* $\pi_s(\theta_{jk})$, dos cenários acidentais identificados na etapa anterior (3.4.3) para cada área ou seção da instalação, além do cenário de operação normal $\pi_s(\theta_N)$. Estas probabilidades podem ser obtidas de diversas maneiras, sendo evidenciado as seguintes:

- a) Elicitação do conhecimento *a priori* dos especialistas: decorre da hipótese bayesiana, segundo a qual um decisor ou especialista poderá expressar seus conhecimentos acumulados através de uma distribuição de probabilidade sobre θ .
- b) Análise de dados históricos sobre acidentes e os modos de falhas: Essa análise pode ser feita com bases de dados nacionais, internacionais ou até mesmo da própria empresa (GARCEZ; DE ALMEIDA-FILHO; DE ALMEIDA, 2011).

É primordial destacar que a análise de dados históricos pode se mostrar insatisfatória para calcular as probabilidades dos cenários acidentais, devido a se ter histórico de dados limitados e incompletos. Na tentativa de usufruir de vantagens das duas visões, Cagno et al. (2000) propuseram a integração dos dados históricos de falhas e o conhecimento de especialistas, mostrando que a abordagem Bayesiana aprimora as estimativas de taxa de falha.

3.4.5. Análise da exposição dos objetos devido a ocorrência dos cenários

Nesta etapa serão analisados os objetos que estão expostos aos impactos devido a ocorrência de um cenário acidental em determinada área da instalação, estimando os possíveis impactos a propriedade, ao meio ambiente e a saúde e segurança das pessoas, etc. expostas as fontes de perigo.

A princípio é necessário determinar a zona de perigo decorrente do cenário e seção específica, possibilitando a estimação dos impactos e consequências das dimensões consideradas. Segundo Fratzak et al. (2006), a zona de perigo é uma região em que os impactos ultrapassam os limites críticos, causando danos em pessoas, prejuízos em propriedades e ao meio ambiente.

3.4.6. Estimação do conjunto de *payoffs* (*c*)

A seguinte etapa é composta pela obtenção das possíveis consequências ou *payoffs* decorrentes dos cenários acidentais na zona de perigo estimada na etapa anterior. Conforme de Almeida et al. (2017), as principais dimensões de consequência encontradas na literatura estão relacionadas a aspectos ambientais, humanos, sociais, financeiros e técnicos de uma determinada situação.

Especificamente, no modelo proposto por Brito & de Almeida (2009), que analisa os riscos em gasodutos de gás natural, o conjunto é composto de três dimensões de consequências $\mathcal{P} = \{c_h, c_a, c_f\}$, que envolvem os riscos sobre os seres humanos (r_h), riscos ambientais (r_a) e os riscos financeiros (r_f). Já o modelo de Alencar & de Almeida (2010b), analisa os riscos nas três dimensões (humana, financeira e ambiental), porém acrescenta as dimensões operacionais (sem e com interrupção da operação), visto que o estudo está relacionado com decisões estratégicas de manutenção. O modelo proposto por Lins & de Almeida (2012) sugere uma desagregação da dimensão humana (danos fatais e danos não letais) e da dimensão ambiental (área de impacto e diversidade ambiental), no intuito de melhorar o entendimento das consequências em acidentes envolvendo gasodutos de hidrogênio.

As estimativas para as consequências na dimensão humana podem ser expressas pelo número de pessoas expostas a um nível mínimo de radiação que possa causar qualquer tipo de ferimento, queimaduras de primeiro ou segundo grau (BRITO; DE ALMEIDA, 2009), como também pelo o número de fatalidades, como é tratado no risco individual e no risco social através da curva F-N (FABER; STEWART, 2003; GURJAR et al., 2015). O trabalho de Medina-Herrera et al. (2014) traz a análise de risco social, porém os autores assumem o risco como a soma das frações de cada dano dentro de cada evento, vezes o número de trabalhadores mortos, vezes ainda a probabilidade de ocorrência do evento.

Para as consequências na dimensão ambiental pode-se limitar a estimativas referentes a incêndios, queimadas em área de vegetação e mortalidade da fauna. Porém, essas estimativas são de difícil mensuração, considerando portanto, de forma plausível, a área atingida em

decorrência das consequências, adotando o raio de alcance a partir do ponto de ocorrência da falha (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010; LINS; DE ALMEIDA, 2012)

Quanto as consequências na dimensão financeira, as estimativas podem ser expressas em despesas monetárias decorrentes dos prejuízos dos acidentes, podendo ser perdas diretas, que impactam na paralisação das operações, gastos esperados com a reestruturação dos elementos (mão-de-obra, equipamentos e matéria-prima); perdas com terceiros, no qual contabiliza as recuperações das propriedades privadas e públicas (residências, comércio e indústrias); e as indenizações por danos a propriedade de terceiros, por mortes e danos físicos a pessoas atingidas, multas ambientais e outros (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014c).

3.4.7. Elicitação da função utilidade multiatributo (u_c)

Esta etapa corresponde a elicitação das funções utilidade multiatributo sobre as consequências para incorporar a preferência do decisor ao risco nas perdas decorrentes dos cenários acidentais. Segundo de Almeida (2013), a função utilidade é obtida através de um protocolo estruturado e fundamentado na estrutura axiomática da Teoria da Utilidade, incluindo a questão probabilística sobre a avaliação de escolhas em diferentes consequências.

Keeney & Raiffa (1976) relataram esse procedimento de elicitação em cinco estágios:

- Introdução a terminologias e ideias;
- Identificação das suposições de independência;
- Avaliação das funções utilidades condicionais;
- Avaliação das constantes de escala;
- Verificação da consistência e reiteração.

É essencial que antes da elicitação dessa função, o decisor esteja familiarizado com os conceitos de análise de decisão, função utilidade e sua estrutura axiomática, e jogo de loterias de *payoffs* (GARCEZ et al., 2009).

Logo após confirmado o entendimento do decisor a respeito dos conceitos citados, estrutura-se o problema de decisão e o seu espaço das múltiplas dimensões de consequências. É importante destacar que o espaço de consequências ocorre em intervalos fechados, onde uma consequência nula (sem impactos) está associada ao valor máximo da utilidade, enquanto que o valor mínimo da utilidade está relacionado com o maior das consequências estimadas (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010a).

De acordo com a abordagem MAUT, cada forma analítica da função utilidade multiatributo tem condições de independência em preferência que devem ser verificadas, a fim de assegurar que as preferências do decisor estejam de acordo com os axiomas básicos da teoria

(KEENEY; RAIFFA, 1976). Atendendo a essa independência, a função utilidade assume-se como sendo aditiva. A forma geral da função utilidade aditiva é representada na equação 4.

$$U(c_1, \dots, c_n) = \sum_{i=1}^n k_{c_i} u(c_i) \quad (4)$$

onde $u(c_i)$ são as utilidades unidimensionais para as diversas dimensões i de consequências consideradas no modelo, e suas respectivas constantes de escala k_{c_i} , que são estimadas no processo de elicitacão baseado na comparação de loterias de *payoffs*, sendo $\sum_{i=1}^n k_{c_i} = 1$.

Na avaliação das utilidades unidimensionais, os ajustes de curva que retratam as preferências do decisor com relação às dimensões de consequência consideradas são realizados. Esses ajustes levam em consideração o comportamento do decisor, que pode ser propenso, avesso ou neutro ao risco para uma determinada situação em cada uma das dimensões de consequências analisadas. No tocante a esse comportamento do decisor com relação ao risco, o emprego de loterias é bastante utilizado (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010a).

A última etapa consiste em efetuar uma verificação da consistência e robustez da função utilidade obtida, certificando-se que a função expressa realmente as preferências do decisor. Essa verificação permite detectar possíveis erros que possam ter ocorrido no processo de avaliação e que recaem na elicitacão da função utilidade (ALMEIDA, 2013).

É importante destacar que essa verificação não é feita apenas na última etapa do processo de elicitacão, mas caso haja identificação de incoerência nas respostas do decisor em outras etapas, retorna-se logo ao ponto inicial de explicação dos limites do espaço consequência e introdução conceitual da utilidade (GARCEZ et al., 2009).

3.4.8. Cálculo das funções probabilidades das consequências

Nem sempre é possível prever deterministicamente quais serão as consequências de um acidente, em cada dimensão de consequência, causada pelos diversos cenários acidentais (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014c). Nesse sentido, esta etapa determina uma distribuição de probabilidade sobre os possíveis valores das consequências nas dimensões de consequências analisada, para cada sistema e cenário específico.

Segundo Brito & de Almeida (2009), as consequências podem possuir uma correlação insignificante e a combinação delas ocorre de forma aleatória e independente, em função das características específicas de cada sistema, fazendo com que as probabilidades $P(c_i | \theta_{jk}, s)$, possam ser estimadas de forma independente. Essas probabilidades são conhecidas como

função consequência e representa a probabilidade de se obter uma consequência c_i , dado que ocorreu um cenário θ_{jk} em um sistema s .

Em alguns casos, podem ocorrer algumas suposições deterministas sob as consequências em uma dada dimensão i , justificando como uma forma de simplificar a modelagem de consequências (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014a). Neste caso a função consequência será dada por $P(c|\theta_{jk}, s) = 1$.

3.4.9. Estimação da medida de risco multidimensional

Esta etapa corresponde a estimação dos riscos associados a cada sistema analisado. Para isso, somam-se as perdas associadas a cada sistema e cenário, nas dimensões de consequências abordadas, multiplicada pelas probabilidades dos cenários acidentais e adicionado a perda associada a um cenário de normalidade θ_N , conforme a Equação 5.

$$r(s) = \sum_i \left(\sum_j \sum_k \left(\pi_s(\theta_{jk}) \left(- \int_c u(c_i) P(c_i|\theta_{jk}, s) dc \right) \right) \right) + (-1)\pi_s(\theta_N) \quad (5)$$

onde os i representam as diversas dimensões de consequência da análise de risco, considerando a ocorrência do cenário de perigo θ_{jk} ; e, θ_N representa o cenário de normalidade do sistema. É importante frisar que a perda associada ao cenário de normalidade θ_N , nas diversas dimensões de consequência consideradas, é nula, ou seja, igual a -1 .

3.4.10. Ordenamento das medidas de risco

Estimado os valores de risco na etapa anterior, é possível ordenar os sistemas de forma decrescente, formando assim um *ranking* de riscos dos sistemas analisados. Garcez et al. (2009) acreditam que esse ordenamento pode auxiliar nas decisões de alocação de recursos, quando esses são escassos, principalmente na adoção de medidas de prevenção e mitigação dos riscos críticos.

3.5. Conclusão do Capítulo

A partir da base conceitual, apresentada neste capítulo, foi possível um maior embasamento para o desenvolvimento da presente pesquisa. De início definiu-se o conceito de risco, onde constatou diversos conceitos, porém a maioria deles permeando para um parecer de risco envolvendo impactos negativos (perdas) onde cujos valores prevalece a incerteza associada a ocorrência dos eventos geradores de impactos.

Além disso, examinou que esses impactos apresentam diferentes distribuições espaciais e temporais, afetando múltiplas dimensões ou a múltiplos critérios, caracterizando assim, um problema de decisão multicritério. Nesse sentido, o gerenciamento de risco tem que ser realizado para atender à multidimensionalidade dos impactos causados.

Desta forma, na base conceitual foram explanados os principais aspectos relacionados a análise de risco multidimensional, apresentando o modelo proposto por Brito & de Almeida (2009) e as etapas que o constitui.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma contextualização sobre o composto químico metanol, apresentando sua composição e especificações; suas etapas de produção; seu uso e aplicações no mundo; e os principais cenários de acidentes ocorridos. Além disso será feita uma revisão bibliográfica dos processos e metodologias analíticas de tratamento de risco envolvendo indústrias químicas

4.1. Metanol

O metanol (CH_3OH) é um composto químico líquido aquoso, incolor, volátil, inflamável e com um odor alcoólico, podendo também ser chamado de álcool metílico, álcool de madeira, carbinol, monohidroximetano, etc. É uma substância completamente miscível em água, álcoois, ésteres e na maior parte dos solventes orgânicos, além de possuir uma razoável solubilidade em óleos e gorduras (KULAY; SUGAWARA; SILVA, 2008). Por conta disso, o metanol é utilizado como solvente em muitos processos, e também como matéria prima para produção de diversos produtos químicos.

Segundo Sheldon (2017), a produção global atual de metanol gira em torno de 85 milhões de toneladas métricas. Essa alta demanda é caracterizada, principalmente, pela facilidade de armazenamento e transporte do composto químico (JADHAV et al., 2014). Porém, para chegar até essa demanda, muitos processos de produção de metanol foram se aprimorando ao longo dos anos.

O primeiro processo data dos antigos egípcios que usavam a substância química, através da pirólise da madeira, para embalsamar os corpos. Porém, foi apenas em 1661 que Robert Boyle isolou, pela primeira vez, o metanol composto o qual denominou de álcool de madeira. Em meados de 1830, o processo de pirólise de madeira, também conhecido como destilação, foi consolidado para produção de metanol e em 1834, Jean-Baptiste Dumas e Justus von Liebig determinaram a estrutura molecular do metanol (SHELDON, 2017).

Madeira era a única matéria prima para produção de metanol durante o período entre 1830 até 1920, quando surge o primeiro processo de produção de metanol sintético, criado pela indústria química BASF, que utilizava hidrogênio (H_2) e óxidos de carbono (CO) como matéria prima, produzida a partir de carvão (WIESBERG et al., 2016). Devido ao grande desenvolvimento tecnológico ocorrido na década de 30, a reforma a vapor de gás natural começou a ser utilizada para produção de gás de síntese, substituindo definitivamente o uso do

carvão. Até os dias atuais, esse é o método comercialmente comprovado mais utilizado para a produção de metanol (BERTAU et al., 2014).

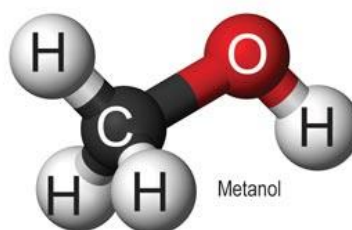
Além das tecnologias de produção de metanol através de gás de síntese, segundo alguns estudos recentes (GARCÍA-TRENCO et al., 2018; TURSUNOV; KUSTOV; KUSTOV, 2017; LI et al., 2014b; POROSOFF; YAN; CHEN, 2016) o álcool metílico pode ser produzido por um processo de hidrogenação de CO_2 . Essa técnica é caracterizada pela captura de dióxido de carbono oriundos de gases de combustão para o processamento como matéria prima, substituindo os insumos de origem fóssil (gás natural).

Esse processo traz, como consequência, uma redução na emissão de gases do efeito estufa e a dependência em combustíveis renováveis. Essa é a rota mais provável para a transição, em longo prazo, para um futuro mais sustentável na produção de metanol (ARAÚJO; DE MEDEIROS; MARIA, 2014).

4.1.1. Composição e Especificações

O metanol é composto orgânico da família dos álcoois, com um átomo de carbono, três átomos de hidrogênio e uma hidroxila, sendo líquido a temperatura ambiente (ANP, 2017). A molécula é representada na Figura 6.

Figura 6 – Representação da molécula de metanol (CH_3OH)



Fonte: Google Imagens (2017)

As especificações do composto químico metanol encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados físico-químicos do metanol

Aspecto	Metanol
Peso Molecular	32,04
Cor	Incolor
Odor	Odor Característico
Ponto de Ebulição	64,5°C
Ponto de Fulgor	-97,5°C a 760 mm Hg
Densidade (H ₂ O = 1 a 15°C)	0,7932
Densidade de Vapor (ar =1)	1,1 g/cm ³

Pressão de vapor (mm Hg)	96 mm Hg a 20°C
Limite Inferior de Explosividade	6,7% vol
Limite Superior de Explosividade	36,5% vol.
Calor de combustão (gás)	5,683 cal/g a 25°C
Calor de combustão (liq.)	5,420 cal/g a 25°C
Calor específico do Líquido	0,599 cal/g a 20°C
Pressão Crítica	78,7 atm.
Temperatura Crítica	240,0°C
Temperatura de Alto Ignição	470°C

Fonte: Copenor (2017)

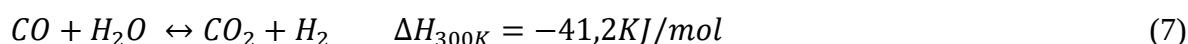
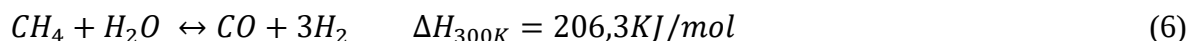
4.1.2. Etapas de Produção do Metanol via gás de síntese

Gás de síntese é uma mistura contendo basicamente CO e H_2 (e uma pequena quantidade de CO_2) em proporções variadas, que possui diferentes aplicações, cada uma exigindo determinada relação ótima entre os componentes. Pode ser produzido a partir de quase toda fonte de carbono, incluindo biomassa, carvão, gás natural, petróleo. Entretanto, o gás natural é a matéria-prima mais utilizada (OLAH et al., 2013). A produção de metanol via gás de síntese está dividida em três etapas.

4.1.2.1. Produção de Gás de Síntese

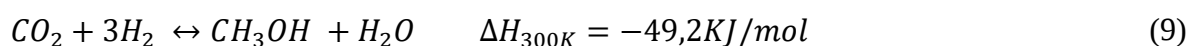
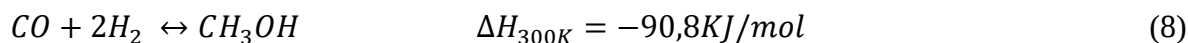
A primeira etapa da produção de metanol por tecnologias comprovadas é a produção do gás de síntese através da reforma de gás natural. Conforme Wiesberg et al. (2016), essa reforma pode ser realizada de diversas maneiras, como por exemplo, reforma a vapor, oxidação parcial, reforma auto térmica, reforma seca, ou até uma combinação dos mesmos, como a bi-reforma (reforma seca e a vapor). Como já dito anteriormente, o método mais usado é o de reforma a vapor.

O processo é composto por cerca de 98% em volume de metano livre de impurezas, tais como compostos a base de enxofre, entre outros, onde, em um leito catalítico de níquel, ocorre a mistura a partir da reforma de vapor do gás natural. Segundo Kulay et al. (2008), a composição média do gás de síntese após a reforma é de, aproximadamente, 15% de CO , 8% de CO_2 , 74% de H_2 e 3% de CH_4 , em volume. As principais reações envolvidas encontram-se nas Equações 6-7.



4.1.2.2. Síntese do Metanol

Essa etapa converte o gás de síntese em metanol através da reação de mistura de óxidos de carbono com hidrogênio sobre um leito catalítico de cobre, zinco e alumínio no reator. Em uma primeira passagem do gás de síntese pelo reator, apenas 50% do volume deste é convertido a metanol. As reações dessa etapa encontram-se nas Equações 8-9.



É importante destacar que, as reações de formação de metanol são extremamente exotérmicas e, portanto, é necessário o resfriamento do reator, já que a síntese é limitada pelo equilíbrio (WIESBERG et al., 2016).

Além disso, a produção do metanol diminui fortemente o volume molar do sistema, sendo vantajoso, portanto, altas pressões no reator (OLAH et al., 2013). Para isso, o gás de síntese produzido deve passar por uma etapa de compressão para atingir a pressão necessária no reator. Condições reacionais típicas são 50-100 bar e 200-300°C (HUANG; TAN, 2014; BEHRENS et al., 2012)

Na sequência do processo, o metanol e a água resultantes são condensados e removidos e o gás de síntese remanescente é recirculado, através de um *loop* existente no sistema (STERNBERG; JENS; BARDOW, 2017).

4.1.2.3. Destilação do Metanol

O metanol cru, que deixa o reator, contém água e impurezas. Essa última etapa é composta pela destilação ou purificação desse metanol, onde, geralmente, de uma a três colunas de destilação são utilizadas, dependendo da qualidade do produto desejado.

Existe uma grande interação entre essas três etapas acima representadas devido a extensiva recuperação de calor e reciclo de vapor entre elas, sendo essa subdivisão das etapas meramente didáticas (KULAY; SUGAWARA; SILVA, 2008).

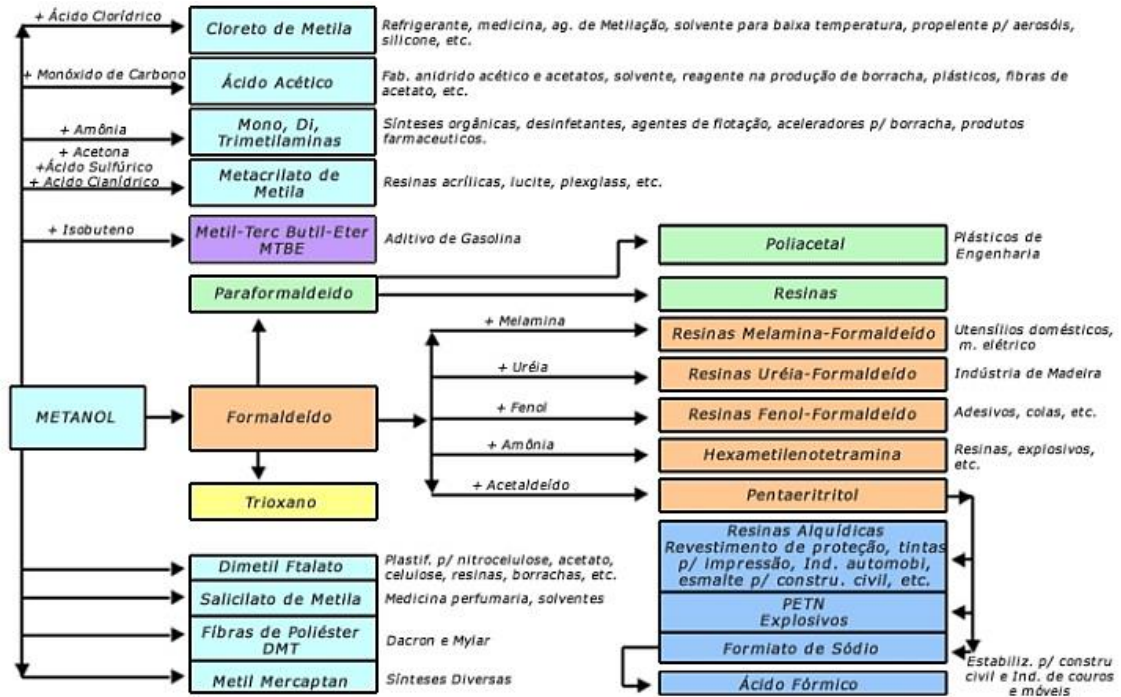
4.1.3. Uso e Aplicações do Metanol

Metanol é um dos compostos químicos mais versáteis e úteis pois serve como matéria prima para centenas de outros compostos (ARESTA, 2010). Na indústria química, o metanol é utilizado como matéria prima para produção de outros produtos químicos, em especial aqueles relacionados a indústria de plásticos.

Além disso, esse composto serve como fonte de energia, seja ele de forma direta, por meio de combustível automotivo; ou de forma indireta, por meio da síntese para obtenção de

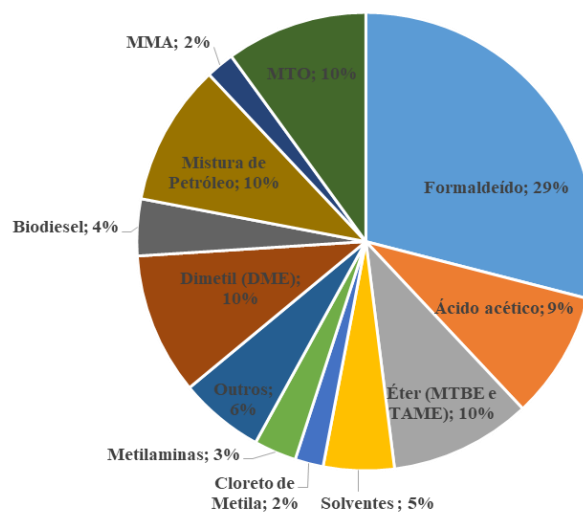
dimetileter (DME), do metiltérciobutileter (MTBE) e sua conversão em gasolina (CALLARI; GEROSA; MATAI, 2007). Nas Figuras 7-8 apresentam os principais derivados e os dados de uso mundial da produção do metanol, respectivamente.

Figura 7 – Derivados do Metanol



Fonte: Google Imagens (2017)

Figura 8 – Dados de uso mundial do Metanol



Fonte: IHS MARKIT (2015)

No Brasil, segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2016), o metanol possui papel crucial para a produção de biodiesel no país, sendo registrado um consumo do composto em 439,6 mil m³, 15,7% maior do que o ano anterior. Essa produção baseia-se no processo de transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais (WIESBERG et al., 2016).

Dentre as vantagens de se utilizar o metanol para a produção de biodiesel tem-se: produz menos poluição ambiental do que outras fontes de combustíveis fósseis; pode ser obtido a partir de materiais renováveis e de resíduos; etc. Por outro lado, o metanol é altamente tóxico e a exposição intensa pode causar sérios problemas de saúde; é corrosivo para alguns metais (ex.: alumínio), tendo que substituir as peças dos carros; etc.

É importante destacar que em 2016 a última produtora de metanol no Brasil, a Metanor S.A, suspendeu sua produção em razão da queda dos preços desse *commodity* no mercado internacional e do alto custo do gás natural (que representa mais de 80% do custo de produção do composto). Nesse sentido, todo o metanol utilizado no país é importado, sendo algo próximo de um milhão de toneladas por ano (MATIAS, 2017).

4.1.4. Perigo envolvendo vazamentos de líquidos inflamáveis na produção de metanol

Conforme Huang & Huang (2018), perigo está associado à capacidade intrínseca de um agente ou situação de causar incidente adverso a um alvo, sejam ele objetos, pessoas, meio ambiente, ativos, etc. Essa habilidade pode até mesmo nunca se materializar se, por exemplo, os alvos não estiverem expostos aos perigos ou forem resilientes contra o efeito perigoso.

A maioria dos incidentes adversos na produção de metanol é seguido por uma série de eventos que desencadeia num acidente (CROWL; JO, 2007), que podem incluir incêndios, explosões e liberação tóxica. Destes três, o fogo é o mais comum, mas a explosão é mais significativa em termos de seu potencial de danos, muitas vezes levando a fatalidades e prejuízos à propriedade (KHAN; ABBASI, 2001).

Os acidentes são frequentemente causados pelas seguintes categorias (PAPADAKIS, 1999; YUHUA; DATAO, 2005):

- Corrosão;
- Atividade de Terceiros;
- Construção defeituosa ou falhas mecânicas;
- Fenômenos naturais em geral;
- Operação incorreta;
- Outras causas ou causas desconhecidas.

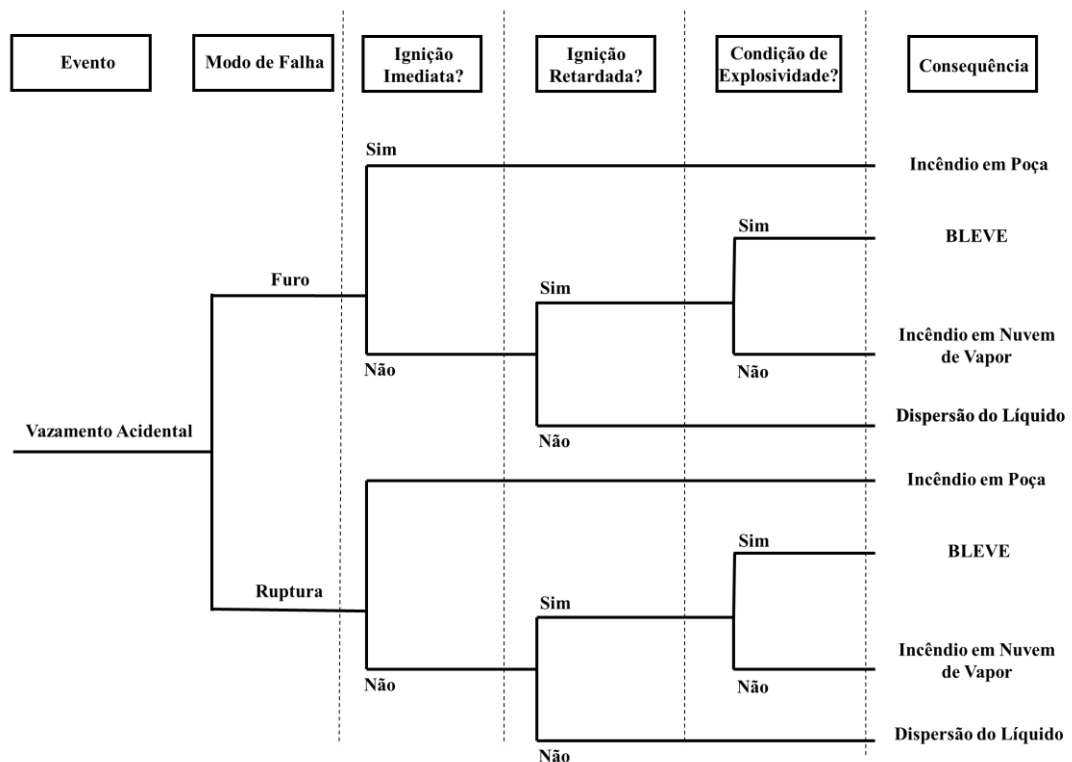
Lins & de Almeida (2012) acreditam que o conhecimento dessas causas representa um passo importante na fase de avaliação dos riscos. Segundo dados da *Failure and Accidents Technical Information System* (FACTS, 2017), dentre o período compreendido entre 1963-2014, ocorreram 83 acidentes envolvendo o composto químico metanol, sendo 39% deles por causa desconhecida, seguidos de falhas mecânicas (22%) e falhas humanas (17%), e o resto enquadrado em atividades de terceiros, corrosão, etc.

Identificar os acidentes é uma tarefa que consiste basicamente em descrever todos os possíveis cenários resultantes dos eventos perigosos (LINS; DE ALMEIDA, 2012). Neste contexto, Di Domenico et al. (2014) apresentam diferentes cenários de acidentes que podem surgir a partir da indústria de metanol:

1. **Incêndio em poça:** É o incêndio que ocorre sob determinadas condições em uma poça de produto inflamável lançado ao solo, a partir de um furo/rompimento de equipamento ou tubulação.
2. **Explosão:** É um processo onde ocorre uma rápida e violenta liberação de energia, associada a uma expansão de gases acarretando o aumento da pressão acima da pressão atmosférica. Essa consequência pode se manifestar quando, depois de uma liberação de produto inflamável, houver a simultaneidade de uma massa significativa de gás ou vapor normalmente com certo grau de confinamento onde a queima ocorra em velocidades suficientes para a formação de ondas de choque.
3. **Flash fire:** É a combustão e queima de gás ou vapor que sofreu uma dispersão, representando um incêndio em nuvem de vapor.
4. **Nuvem tóxica:** Ocorre quando o produto vazado é capaz de formar uma nuvem tóxica de vapor podendo acarretar intoxicação das pessoas expostas;
5. **Bola de fogo:** É um fenômeno que ocorre quando o volume de um vapor ou gás inflamável, que se encontra inicialmente comprimido, escapa repentinamente para a atmosfera e, devido à despressurização, forma um volume esférico de gás;
6. **Jato de fogo (Jet fire):** Fenômeno que ocorre devido ao escoamento em alta velocidade de um gás inflamável pressurizado que encontra uma fonte de ignição próxima ao ponto de vazamento.
7. **BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion):** Liberação repentina de uma grande massa de líquido superaquecido pressurizado para a atmosfera. A liberação súbita pode ocorrer devido a falhas de contenção causadas por corrosão, defeitos de fabricação, superaquecimento interno, etc.

Uma técnica bastante útil para determinar esses cenários é a Análise de Árvore de Eventos (ETA), já mencionada anteriormente na subseção 3.3.2. Estes cenários de acidente estão diretamente associados com o momento de ignição, seja na ignição imediata, retardada, intermediária, tardia ou não ignição (SKLAVOUNOS; RIGAS, 2006). Desta forma, pode-se resumir os possíveis cenários acidentais relacionados ao vazamento de líquidos inflamáveis como descrito na árvore de eventos, mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Árvore de Eventos de vazamento acidental



Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de Hosseinnia; Khakzad; Reniers (2018)

4.2. Processo de tratamento dos riscos nas indústrias químicas

O processo de tratamento de risco é apresentado como a atividade de selecionar e implementar medidas de controle adequadas para modificar o risco (ISO-31000, 2009). Como já dito anteriormente, o tratamento de risco inclui como elemento principal, controle de risco (ou mitigação), mas se estende para, por exemplo, prevenção de riscos, transferência de risco e financiamento de risco.

Qualquer sistema de tratamento de risco deve fornecer controles internos eficientes e eficazes, sendo a eficácia medida pelo grau em que o risco será eliminado ou reduzido pelas

medidas de controle propostas; e a eficiência relacionada ao custo de implementação do controle em relação aos benefícios de redução de risco alcançados (AIRMIC; ALARM; IRM, 2010).

Segundo a OHSAS 18001 (2007), as medidas de controle giram em torno de:

- a) Eliminação: Modificação do projeto para eliminar o perigo;
- b) Redução ou substituição: substituição de um material perigoso por um menos perigoso ou redução da energia do sistema (ex.: abaixe a força, a amperagem, a pressão, a temperatura, etc.);
- c) Equipamentos de proteção coletiva (EPC): Instalação de sistemas de ventilação, proteção na máquina, bloqueios, redutores de ruído, etc.
- d) Procedimentos ou controle administrativos: Instalação de alarmes, procedimentos de segurança, inspeção de equipamento, controles de acesso;
- e) Equipamentos de proteção individual (EPI): Utilização de óculos de segurança, protetores de ouvido, protetores de rosto, respiradores e luvas.

Essas medidas de controle não são necessariamente mutuamente exclusivas ou apropriadas em todas as circunstâncias (KOLOMIYETS, 2017). Muitas vezes, uma resposta de risco pode combinar duas ou mais dessas estratégias para alcançar os resultados desejados. Por exemplo: se o objetivo é reduzir o nível de risco, o tratamento pressupõe a remoção da fonte de risco; a alteração da probabilidade de ocorrência (para menor); a alteração da consequência (para menos grave); ou uma combinação entre essas três alternativas (ABNT ISO-31000, 2009).

Além disso, conforme *European Union Agency for Network and Information Security* (2017), o processo de modificar o risco deve obedecer aos requisitos legais, bem como às políticas governamentais e organizacionais. Portanto, as decisões sobre se o tratamento de risco é necessário, podem ser baseadas em critérios operacionais, técnicos, financeiros, legais, sociais, ambientais, entre outros. Esses critérios devem refletir o contexto da organização e depender de suas políticas, metas e objetivos internos, bem como as necessidades de suas partes interessadas.

Nesse sentido, o desafio principal de problemas referentes ao tratamento de risco é determinar um conjunto de respostas adequadas que forme uma estratégia consistente e integrada, de modo que o risco restante caia dentro do nível aceitável de exposição do mesmo (KOLOMIYETS, 2017).

Contudo, quando se fala em processos de tratamento na indústria química, o termo associado é o “*process safety*”, que em tradução livre representa segurança do processo. A

segurança do processo é um *framework* que gerencia a integridade dos sistemas operacionais e dos processos de tratamento de substâncias perigosas (CAPP, 2014).

Ao contrário da abordagem de segurança ocupacional, que se concentra em perigos que podem resultar em problemas de saúde (por exemplo, deslizamentos, quedas, etc.), a segurança do processo se concentra na prevenção e mitigação de riscos envolvendo a liberação de produtos químicos ou de energia, resultando em sérios impactos, incluindo perda da saúde humana, danos ambientais, perda de ativos e perda de produção (HSE, 2015; KHAN et al., 2016).

Porém, a origem do termo "segurança do processo" e sua evolução internacional está associada aos principais acidentes da indústria química ocorridos durante o período entre 1960 e 1990 como resultado da rápida industrialização e do movimento tecnológico (MANNAN et al., 2016), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais acidentes na indústria química, suas causas e impactos

Lugar	Ano	Causas	Impactos
Flixborough, Reino Unido	1974	Vapor vazou de tubagens rompidas, criando nuvem de vapor colossal que logo encontrou a fonte de ignição.	Matou 28 pessoas e feriu-se 36 Custo estimado: 150 milhões de dólares
Seveso, Itália	1976	Explosão resultante do superaquecimento do reator, formando nuvem tóxica.	477 pessoas relataram lesões cutâneas; Dentro de dias um total de 3300 animais foram encontrados mortos. Custo de limpeza foi de 110 milhões de dólares.
Cidade do México, México	1984	A explosão inicial de nuvem de vapor foi o início de uma reação em cadeia de explosões, houve 19 explosões.	Matou 600 pessoas e feriu-se 7000
Bhopal, Índia	1984	Vazamento de gás isocianato de metilo.	Cerca de 10000 mil pessoas morreram; Custos estimados: 470 milhões de dólares
Cubatão, Brasil	1984	Rompimento de um duto de gasolina seguido de incêndio.	500 vítimas, dos quais 93 fatais.
Chernobyl, Ucrânia	1986	Resultado de um projeto de reator defeituoso que foi operado com pessoal inadequadamente treinado.	Matou 30 pessoas; O custo da perda direta é de cerca de 15 bilhões de dólares.
Piper Alpha, Reino Unido	1988	Falha no sistema de permissão, onde a válvula de alívio de	Matou 167 trabalhadores

		pressão não estava no lugar e a flange cega não estava devidamente segura	A perda total segurada foi de cerca de 3,4 bilhões de dólares
Cidade do Texas, EUA	2005	Uma série de explosões ocorreu quando uma unidade de isomerização de hidrocarbonetos foi reiniciada e uma torre de destilação inundada com hidrocarbonetos	Morto 15, ferido 180 Custo estimado: 1,6 bilhões de dólares para compensar as vítimas
Fukushima, Japão	2011	Após um grande terremoto, um tsunami de 15 metros desativou o fornecimento de energia e o resfriamento de três reatores Fukushima Daiichi	Estima-se em 1000 mortes de pessoas

Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de Eljack e Kazi (2016)

É importante destacar que os acidentes acima citados mostram uma flutuação não uniforme acerca das ocorrências e consequências dos incidentes. Segundo Khan et al. (2015), esta tendência não uniforme confirma o comportamento incerto e imprevisível dos acidentes e suas consequências, reforçando a necessidade de uma segurança eficiente dos processos e gerenciamento de riscos através da implementação de medidas de segurança preventivas e atenuantes para reduzir tanto a probabilidade quanto a gravidade dos acidentes industriais.

Porém, existem inúmeras medidas de segurança relevantes para prevenir e controlar os acidentes ocorridos nas plantas químicas, que vão desde inerentes à engenharia ou projeto até medidas de segurança processuais, cada uma com suas próprias características (custo, tempo, etc.) e aplicações específicas (YUAN et al., 2015). A seleção dessas medidas costuma ser feita através da experiência, conhecimento e intuição dos gerentes de segurança, entretanto entram sempre no dilema de balancear as reduções de risco com os custos de cada ação preventiva e/ou mitigativa, dentro de recursos limitados (SATO, 2012). Nesse sentido, alguns estudos trouxeram abordagens relevantes relacionadas ao uso de modelos matemáticos na tomada de decisão estratégica associados a escolha de medidas de prevenção e mitigação dos riscos.

4.2.1. Modelos matemáticos de tratamento de risco

Sherali et al. (1994) propuseram vários modelos de otimização, baseados em único ou múltiplos riscos, de modo a minimizar o risco total referente a um determinado conjunto de atividades de risco, sujeito a orçamentos e restrições operacionais, sendo o risco visto aqui como

o valor esperado entre a probabilidade e a consequência. Esses modelos foram formulados através de problemas de programação biconvexa, examinando vários tipos diferentes de estratégias de atenuação de risco e seus efeitos, preocupando-se com questões relacionadas com a obtenção de níveis de risco aceitáveis, busca de equidade entre os eventos de risco e lidando com as incertezas nos parâmetros do modelo. Como solução, foram apresentados algoritmos especializados que permitem a visualização gráfica (*Computer-Aided-Design*) do processo de solução, possibilitando que o tomador de decisão examine subjetivamente outras soluções viáveis para o comprometimento entre o custo esperado e a política operacional.

Guikema & Paté-Cornell (2002) preconizaram um estudo voltado para o uso de modelo matemático na escolha de componentes que minimizam a probabilidade de falha de um sistema de comunicação via satélite, assumindo orçamento limitado. Eles apresentaram uma formulação geral do problema de risco, que pode ser usado para modelar qualquer situação de gerenciamento de risco em que as funções objetivo para cada possível opção de mitigação do risco podem ser representadas de forma analítica, ou seja, baseado apenas na escolha discreta do componente, ou no aumento contínuo da robustez de um componente com despesa adicional, ou ainda numa mistura de ambos. Para resolução do problema, os autores compararam três métodos principais utilizados: relaxações contínuas da função, algoritmo *branch-and-bound* e algoritmos genéricos, chegando à conclusão que ao modelar e resolver problemas de risco que minimizam os riscos, a precisão necessária da solução deve ser cuidadosamente ponderada contra os recursos computacionais necessários.

Glickman (2008) introduziu a ideia de construção de modelos de otimização que envolvam a redução ótima do risco levando em consideração a prioridade de cada risco analisado. O principal problema neste estudo versa sobre a seleção de portfólio de programas de mitigação de risco dada a dimensão inicial de cada risco, o nível de prioridade atribuído e a eficácia estimada de cada programa em consideração. O autor aplica este modelo como uma estratégia de mitigação dos riscos para a proteção de infraestrutura crítica, ou seja, segurança contra-ataques terroristas, porém ele afirma que o modelo pode ser empregado nas mais diversas situações, onde é necessário reduzir uma variedade de riscos priorizados, como é o caso das indústrias químicas. O método utilizado para encontrar a solução emprega um modelo de otimização lexicográfica, onde resolve uma série de problemas de programação linear 0-1 inteiro que correspondem aos diferentes níveis de prioridade.

Georgiadou et al. (2010) apresentaram um modelo de otimização de respostas ao risco em situações de emergência em torno de plantas químicas que processam substâncias perigosas, levando em consideração múltiplos objetivos conflitantes decorrentes da implementação de

várias ações de proteção, tendo que minimizar os potenciais efeitos sobre a saúde dos trabalhadores e do público, bem como a minimização dos impactos socioeconômicos associados do plano de emergência. O modelo em questão foi baseado na Fronteira ótima de Pareto, evitando, desta forma, os julgamentos subjetivos e *trade-off* de valor, descartando sem muitos problemas as soluções que implicam grandes custos com uma diminuição mínima de proteção oferecida. Além disso, os autores utilizaram algoritmos evolutivos, permitindo, desta forma, cálculo de otimização mais precisa das consequências da escolha de uma determinada resposta de risco.

Sato (2012) centrou o seu modelo na otimização do planejamento orçamentário para o investimento de segurança de uma empresa química no Japão e na correlação entre as medidas de segurança e o grau de redução de risco, através da presença de fatores intangíveis tanto na avaliação, como escolha de medidas de segurança adequadas. Os riscos inerentes neste estudo foram quantificados com base no valor esperado das despesas com o risco. O processo de otimização proposto considerou não apenas a minimização de custos, mas também a proteção ambiental global, que oferece justificativa quantitativa para o orçamento de medidas de segurança. Nesse sentido, o autor utilizou a técnica tradicional de Programação Linear (PL) para otimizar o planejamento do investimento em medidas de segurança em termos de critérios de proteção ambiental global e redução de custos; e trouxe o método de suporte à decisão, o AHP, que é capaz de incorporar julgamentos quantitativos e qualitativos nas avaliações, sendo usado para chegar aos parâmetros empregados no PL.

Fang et al. (2013) criaram um quadro quantitativo de análise para apoiar a tomada de decisão no planejamento de resposta ao risco em um ambiente de concepção de projeto. O modelo de otimização formulado considerou apenas minimizar a exposição global ao risco ou perda financeira esperada em sentido global na busca de alocar otimamente recursos apertados para mitigação de risco, isto é, selecionado o melhor plano de resposta de risco a partir de uma lista de ações. Para exemplificação, um algoritmo genérico (GA) e algoritmo *greedy* SFS foram usados como uma ferramenta para escolher ações de resposta e alocar reservas orçamentárias. As comparações dos resultados obtidos por esses dois algoritmos de otimização mostraram que o GA teve desempenho superior.

Wang et al. (2016a) desenvolveram um modelo de otimização que determina um conjunto de ações protetoras para reduzir o nível de vulnerabilidade do sistema crítico de segurança. No estudo, eles definiram um problema de classificação inversa e indicadores de sensibilidade foram introduzidos para avaliar as combinações de ações em relação à sua capacidade de reduzir a vulnerabilidade dos sistemas críticos. Os resultados mostraram que as ações classificadas

como as melhores de acordo com os indicadores propostos dão um desempenho satisfatório em termos de redução da vulnerabilidade, mesmo na presença de restrições orçamentárias.

Toppila & Salo (2017) criaram um modelo de otimização que visa identificar a melhor combinação (ou portfólio) de melhorias ou componentes redundantes no intuito de aumentar a confiabilidade do sistema, sujeitos a restrições econômicas e técnicas. Eles resolvem o problema de alocação de redundância quando a incerteza epistêmica é caracterizada dentro de limites inferiores e superiores de probabilidade, sendo esses limites a determinação de um intervalo dentro do qual os valores de probabilidades podem variar. Então, os autores desenvolvem um algoritmo de domínio em pares para determinar quando um portfólio é melhor do que outro: um portfólio domina outro se aumentar a confiabilidade do sistema pelo menos tanto para todas as probabilidades viáveis e, além disso, aumenta a confiabilidade do sistema estritamente mais para algumas probabilidades viáveis. Esse algoritmo foi capaz de resolver o resultado do conjunto de portfólios não dominados que caracterizaram soluções razoáveis para o problema.

Já Mancuso et al. (2017) apresentou um modelo de otimização que apoia a seleção de portfólios econômicos de medidas de segurança, fornecendo uma abordagem sistêmica baseado em Redes Bayesianas. Essas redes são derivadas das tradicionais árvores de falhas, sendo capazes de codificar dependências de eventos e comportamentos de falhas de vários estados. O objetivo principal do modelo é minimizar o risco residual do sistema de suspensão de ar numa indústria nuclear, levando em conta as restrições de viabilidade e orçamento. Como solução, os autores construíram um algoritmo de enumeração para identificar quais combinações de medidas de segurança atenderia ao objetivo proposto. A comparação dos resultados com a escolha de medidas de segurança com base em medidas de importância de risco baseados apenas em árvores de falhas mostraram que abordagem proposta por eles levam a um risco residual consideravelmente menor em diferentes níveis de custo.

É importante notar que os estudos citados acima mostram modelos de otimização para o gerenciamento eficaz e eficiente de medidas de segurança (relacionados a escolha de medidas preventivas e mitigativas) nos mais diversos acidentes químicos. Porém, fica claro que eles não tratam a otimização da resposta de risco na presença de incerteza. Este é o caso quando uma grande variedade de incidentes pode ocorrer cada uma com uma probabilidade diferente de ocorrência e uma consequência associada. Tais situações surgem quando o planejamento de resposta deve ser feito antecipadamente e ser aplicável ou não, com pequenas variações em todos os casos de cenários acidentais.

Por outro lado, a maioria dos modelos de otimização de resposta ao risco analisam os riscos sob a ótica de apenas uma única dimensão de consequência, principalmente aqueles relacionados a humanos, não sendo suficientemente abrangentes para tratar os problemas reais, como já dito anteriormente. Essas lacunas favorecem os pesquisadores na área a melhorar e ampliar os modelos de otimização existentes na literatura voltados ao planejamento de resposta ao risco, obtendo soluções mais reais e robustas, sendo estes o objetivo deste trabalho.

4.2.2. Método de otimização Lexográfico

A maioria dos problemas reais de otimização envolve múltiplas funções objetivos, consideradas conflitantes quando não existe uma única solução ótima (MICHALEWICZ, 1996; DEB, 2011). Para este tipo de problema, chamados na literatura de Problemas de Otimização Multiobjetivo (POM), deve-se buscar um conjunto de boas soluções.

Conforme Coello et al. (2002), os problemas de otimização multiobjetivo possuem o propósito de encontrar um vetor de variáveis de decisão y , que maximiza ou minimiza um vetor de m funções objetivos $z_i(y)$ onde $i = 1, 2, \dots, m$ sujeito a J restrições de desigualdade $g_j(y)$ e K restrições de igualdade $h_k(y)$ onde $j = 1, 2, \dots, J$ e $k = 1, 2, \dots, K$, sendo representado matematicamente como:

$$\text{minimizar ou maximizar } [z_i(y) = [z_1(y), z_2(y), \dots, z_m(y)]] \quad (10)$$

$$\text{s. a. } g_j(y) \leq 0; j = 1, 2, \dots, J \quad (11)$$

$$h_k(y) = 0; k = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

Existem várias ferramentas de apoio que ajudam na otimização de problemas relacionados a múltiplos objetivos (LAWRENCE; PASTERNAK, 2002). Porém, quando os problemas preservam o uso de prioridades nas funções objetivos, sendo a primeira função objetivo incomparavelmente mais importante do que a segunda que, por sua vez, é incomparavelmente mais importante do que a terceira, etc., a abordagem principal utilizada é a lexográfica (COCOCCIONI; PAPPALARDO; SERGEYEV, 2018).

A abordagem lexográfica, apresentada por Charnes & Cooper (1962), mostrou as funções objetivos organizadas em vários níveis de hierarquia de prioridades. Inicialmente, somente os objetivos e as restrições correspondentes ao primeiro nível de hierarquia de prioridade são considerados na formulação matemática do problema. Em seguida, outro problema é formulado considerando os objetivos e as restrições correspondentes ao segundo nível de hierarquia de prioridade. A solução encontrada no primeiro nível torna-se uma restrição do problema do

segundo nível. Este processo continua com os demais objetivos de nível superior até que seja encontrada uma solução ótima que não viole as metas dos níveis antecedentes.

É necessário atentar que quando se fala em problemas de alocação de recursos escassos para escolha de medidas de atenuação de risco em acidentes, as prioridades de risco podem auxiliar nessas decisões (GARCEZ et al., 2009). Nesse sentido, a abordagem lexográfica atende aos requisitos necessários do modelo de otimização envolvendo a seleção de medidas preventivas e mitigativas para o gerenciamento de risco.

No próximo capítulo, será realizado a descrição do modelo proposto nesse trabalho, com as premissas e delimitações necessárias.

5. MODELO PROPOSTO

Neste capítulo é apresentado uma proposta de modelo para orientar o processo de planejamento de resposta ao risco na indústria química, que consiste em determinar e implementar ações preventivas e mitigativas para evitar, reduzir ou transferir riscos.

Este modelo atende a multidimensionalidade dos impactos gerados pelos acidentes, como também as preferências dos tomadores de decisão, respeitando os recursos limitados e escassos disponíveis (monetários, tempo, equipes de trabalho, tecnologia, etc.). A abordagem usada para encontrar a solução emprega um modelo de otimização lexicográfica no qual resolve-se uma série de problemas de programação linear inteiros binários, correspondendo aos diferentes níveis prioritários dos riscos, começando com o risco mais alto e progredindo para riscos sucessivamente mais baixos.

Essas variáveis de decisão binárias são usadas para indicar se alguma estratégia de resposta ao risco será ou não implementada para lidar com eventos de risco. Desta forma, o *framework* apoia o processo de tomada de decisão dos decisores para lidar com a complexidade dos riscos e restrições de recursos.

5.1. Os pressupostos e delimitações do modelo proposto

Embora a formulação de pressupostos simplifique a grande complexidade dos fenômenos do mundo real, tornando muitas vezes um modelo aplicado a problemas bastante específicos, as mesmas fornecem condições para sair-se de uma postura passiva, a fim de fazer estimativas para que medidas de precisão satisfatórias sejam tomadas (BRITO; DE ALMEIDA, 2009). Dessa forma, os pressupostos a serem observados para a implementação do modelo proposto de ações de resposta ao risco multidimensional são as seguintes:

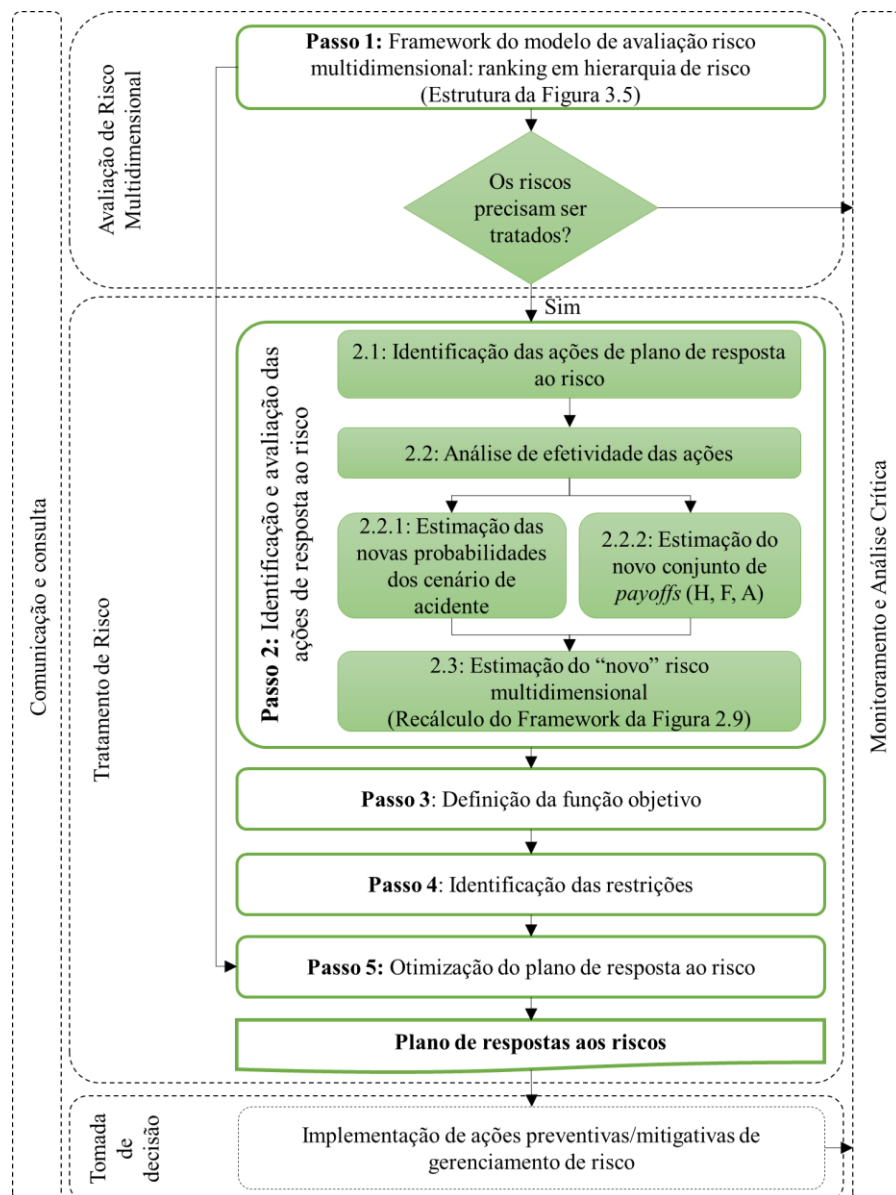
1. O risco é medido através de um único valor com base em modelo de decisão de risco multidimensional;
2. As variáveis de decisão são consideradas binárias (0; 1), ou seja, as ações que serão selecionadas corresponderão a 1, caso contrário 0;
3. A efetividade de ações preventivas é medida numa escala em porcentagem que varia entre (0; -1), sendo “0” nenhuma redução na probabilidade dos cenários acidentais e “-1” redução máxima no mesmo parâmetro.
4. A efetividade de ações mitigativas é medida numa escala em porcentagem que varia entre (0; -1), sendo “0” nenhuma redução nos *payoffs* e “-1” redução máxima no mesmo parâmetro.

5. Será assumido que as ações referentes a cada nível de prioridade associados aos riscos serão mutuamente exclusivas, de maneira que, por exemplo, não haja a escolha de duas ações a serem implementadas no mesmo risco.

5.2. A Estrutura do Modelo

O modelo proposto neste trabalho está relacionado a etapa de tratamento de risco descrito no modelo de gerenciamento de risco clássico, conforme visto na Figura 5. A estrutura para essa etapa é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Estrutura do modelo de decisão para o planejamento de resposta ao risco



Fonte: O Autor (2018)

5.2.1. Passo 1: Framework do modelo de avaliação de risco multidimensional

Este primeiro passo é caracterizado pelo modelo baseado em Brito & De Almeida (2009), conforme detalhado na seção 3.4, onde foi proposto um modelo de decisão para avaliação e ordenamento dos riscos multidimensionais, apoiado pela teoria da utilidade multiatributo. Posteriormente, será realizada a descrição de cada etapa no decorrer da aplicação numérica numa planta de produção de metanol.

Nesta etapa tem-se como resultado uma hierarquia dos diversos riscos multidimensionais analisados ($r(s^x)$), com seus respectivos níveis de prioridade x estabelecido pelo ranking decrescente de risco.

5.2.2. Passo 2: Identificação e avaliação das ações de resposta ao risco

Esse passo é dividido em três etapas, iniciando pela construção de uma lista de ações de resposta que pode incluir diferentes tipos de ações em termos de prevenção e de mitigação do risco (Etapa 2.1). Essas ações formam o conjunto $\mathcal{A} = \{1, 2, \dots, |a|\}$, onde o $|\cdot|$ representa a cardinalidade do conjunto; e podem ser identificadas através da ferramenta Análise Preliminar de Perigo (APP), citada na seção 3.3.1 deste trabalho.

A realização das ações de resposta tem os efeitos de alterar os valores de alguns dos parâmetros do modelo de risco. Segundo Garcez et al. (2009), as ações preventivas reduzem as probabilidades de ocorrência do risco $\pi_s(\theta_{jk})$ e as ações mitigativas reduzem as diversas dimensões de consequências do acidente $\mathcal{P} = \{c_1, \dots, c_i\}$. Nesse sentido, é necessário a realização de análise de efetividade das ações (Etapa 2.2).

Essa análise consiste em avaliar, em primeiro lugar, as ações tecnicamente possíveis, ou seja, aquelas ações que são viáveis sob o olhar técnico, consequentemente, excluindo desse conjunto aquelas ações inviáveis. Posteriormente, do conjunto de ações viáveis, calcula-se, a eficácia delas em relação a um determinado risco, tanto na visão da ação de prevenção (reduzindo o parâmetro $\pi_s(\theta_{jk})$) quanto na visão da ação de mitigação do risco (reduzindo o parâmetro $\mathcal{P} = \{c_1, \dots, c_i\}$), variando de nenhuma redução à eliminação total do risco.

Tendo estimado os novos parâmetros para cada ação do plano de resposta ao risco, faz-se necessário o recálculo dos riscos (Etapa 2.3). Esse recálculo trará uma nova medida de risco multidimensional $r(s_a)$ e que servirá de *input* para o passo seguinte.

5.2.3. Passo 3: Definição da função objetivo

O objetivo do modelo proposto é selecionar um conjunto de ações de prevenção e mitigação de risco que minimizem ao máximo a diferença entre os riscos, dada as dimensões de cada risco multidimensional antes e depois das ações de resposta, respeitando o nível de prioridade estabelecido pelo *ranking* dos riscos definidos no passo 1. Esse objetivo deve ser traduzido em uma função objetivo que impulsiona a soluções dentro de um modelo de pesquisa operacional (DUNN; THOMPSON; CALKIN, 2017), conforme Equação 10.

$$\min z = \sum_x y_a^x \Delta R^x = \sum_x y_a^x (r(s_a^x) - r(s^x)) \quad (10)$$

onde y_s^x refere-se a variável de decisão binária (correspondendo em 1 se ação a for selecionada e 0 caso contrário, para cada nível de prioridade x estabelecido); $r(s_a^x)$ corresponde ao risco multidimensional final depois da aplicação da ação de resposta a no nível de prioridade x do risco calculado no passo 2 deste modelo e $r(s^x)$ corresponde ao risco multidimensional inicial calculado no passo 1, antes da adoção de qualquer ação de resposta. Portanto, ΔR^x representa a diferença entre os riscos antes e depois da adoção da ação de resposta a .

5.2.4. Passo 4: Identificação das restrições

As decisões de gerenciamento de riscos podem ser limitadas por condições ambientais, limitações de recursos (financeiros, operacionais ou administrativos) e padrões ou convenções operacionais (DUNN; THOMPSON; CALKIN, 2017). Além disso, é importante destacar que as ações de resposta ao risco sempre consomem tempo, dinheiro e outros recursos técnicos da empresa (FANG et al., 2013). Portanto, esse passo do modelo caracteriza-se pela construção dessas restrições do problema.

Segundo Zhang & Fan (2014), geralmente em modelos de otimização que envolvam problemas relacionados a seleção de respostas ao risco, apresentam como principal restrição o orçamento limitado, representado, no modelo aqui proposto, pela Equação 11.

$$\sum_a \sum_x C_a^x y_a^x \leq O \quad (11)$$

onde C_a^x representa o custo de cada ação a para cada nível de prioridade de risco x , y_a^x é a variável de decisão binária de cada ação a para cada nível de prioridade de risco x ; e O como o orçamento geral disponível.

Além da restrição orçamentária, para o modelo em questão, adota-se a restrição de tempo necessário de implementação das ações, conforme Equação 12.

$$\sum_a \sum_x t_a^x y_a^x \leq T \quad (12)$$

onde t_a^x representa o tempo de cada ação a para cada nível de prioridade de risco x , y_a^x é a variável de decisão binária de cada ação a para cada nível de prioridade de risco x ; e T como tempo limite disponível.

Ademais, como as ações de resposta do modelo proposto são mutualmente exclusivas faz necessário a restrição dada pela Equação 13.

$$\sum_a y_a^x \leq 1 \quad (13)$$

5.2.5. Passo 5: Otimização do plano de resposta ao risco

Este último passo corresponde a construção da modelo de otimização do plano de resposta ao risco. Como já dito anteriormente, o modelo proposto utiliza a abordagem lexicográfica, conforme seção 4.2.1, para atender ao *ranking* dos riscos. Nesse sentido, baseado no princípio de que cada risco, em um determinado nível de prioridade x , deva ser reduzido tanto quanto possível antes que qualquer risco em um nível de prioridade menor seja reduzido ($x + 1$); portanto, juntando as Equações 10 a 13, tem-se:

$$\text{minimizar } z = \sum_x y_a^x \Delta R^x = \sum_x y_a^x (r(s_a^x) - r(s^x)) \quad (14)$$

sujeito a

$$\sum_x y_a^x \Delta R^x = z^{x*}, \text{ para } x = 1, \dots, x - 1$$

$$\sum_a \sum_x C_a^x y_a^x \leq 0$$

$$\sum_a \sum_x t_a^x y_a^x \leq T$$

$$\sum_a y_a^x \leq 1$$

$$y_a \in (0,1)$$

O próximo capítulo mostrará uma aplicação numérica do modelo em indústria hipotética de produção de metanol.

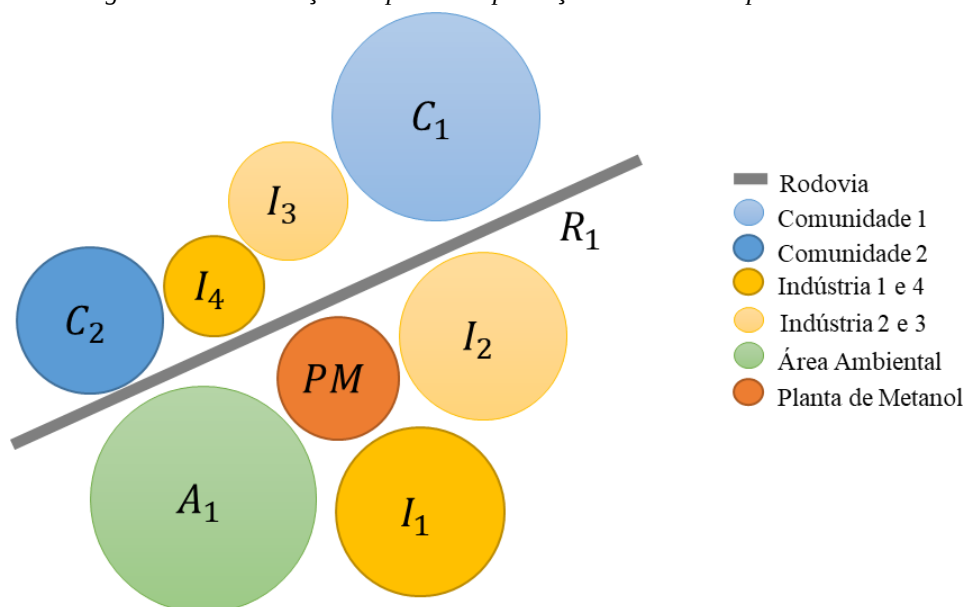
6. APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÕES

Realiza-se neste capítulo uma aplicação numérica e algumas discussões com o propósito de ilustrar o modelo de otimização do planejamento de resposta ao risco na indústria química, proposto neste trabalho. Para todas as etapas do modelo de decisão descrito na Figura 10, o software empregado foi o Microsoft EXCEL® 2016, utilizando a extensão SOLVER para a otimização.

6.1. Aplicação numérica numa planta de produção de metanol

Para visualizar a aplicação numérica do modelo proposto, será realizado um estudo hipotético numa planta de produção de metanol. É importante frisar que esse processo de produção de metanol é feito via sequestro de CO_2 , e utiliza vários compostos químicos: Hidrogênio, Dióxido de Carbono, Ácido Fórmico, Etanol e Metanol. A planta hipotética está localizada próximo a quatro indústrias, duas comunidades e uma área de preservação ambiental, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Localização da planta de produção de metanol hipotética



Fonte: O Autor (2018)

6.1.1. Framework do modelo de avaliação de risco multidimensional

O primeiro passo da aplicação consiste em calcular e ordenar os riscos baseados no modelo de risco multidimensional definido por Brito & de Almeida (2009). Conforme Figura

5, a primeira etapa consiste na identificação do decisor. Em uma indústria química de metanol, este pode corresponder ao gerente apoiado pelo comitê de especialistas ou outros responsáveis pelo gerenciamento de segurança e operação da planta. No contexto do problema em estudo, em que o modelo se propõe a servir de ferramenta de apoio a decisão de planos de resposta ao risco nas indústrias químicas, foi adotado um único decisor.

A planta está dividida em nove subáreas principais de acordo com as características dos compostos químicos, como: tipo de fluido, temperatura, estado físico e sessões isoláveis. Neste trabalho, apenas irá contemplar as subáreas que apresentam líquidos inflamáveis no seu processo, sendo apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Seleção das subáreas analisadas

Nomenclatura	Subárea
Aestac	Área de Estacionamento de Carretas
EstocEtan	Recebimento e Estocagem de Etanol
AlEtan	Alimentação de Etanol
SepEtan	Separação Etanol
ProdMetan	Produção de Metanol
EstocMetan	Estocagem de Metanol
RecircEtan	Recirculação de Etanol
ReatMetan	Reator de Metanol

Fonte: O Autor (2018)

Para exemplificação da aplicação numérica, na Tabela 6, serão considerados os seguintes modos de falhas, que podem causar grandes vazamentos de líquidos inflamáveis, assim como valores das probabilidades associadas a cada cenário encontrados na Figura 9 deste trabalho, baseado no estudo de Di Domenico et al. (2014).

Tabela 6 – Estimação das probabilidades dos cenários de acidentes

Subárea	Modo de Falha	Incêndio em Poça $\pi_s(\theta_1)$	Explosão em Nuvem $\pi_s(\theta_2)$	Flash Fire $\pi_s(\theta_3)$	Dispersão Líquida $\pi_s(\theta_4)$	$\pi_s(\theta_N)$
Aestac	Ruptura do Tanque do Caminhão	1,57E-08	8,12E-08	1,22E-07	2,25E-08	0,999999759
EstocEtan	Ruptura em Tanque de Estocagem	1,21E-06	6,25E-06	9,38E-06	1,74E-06	0,999981426
AlEtan	Ruptura no Compressor	1,36E-05	7,07E-05	1,06E-04	1,96E-05	0,999790080
SepEtan	Ruptura dos vasos	2,19E-06	1,13E-05	1,70E-05	3,15E-06	0,999966298
ProdEtan	Ruptura na Torre	4,10E-07	2,12E-06	3,18E-06	5,89E-07	0,999993699

EstocMetan	Ruptura no Tanque de Estocagem	1,86E-06	9,63E-06	1,44E-05	2,67E-06	0,999971400
RecircEtan	Ruptura nas bombas	4,87E-06	2,52E-05	3,78E-05	7,00E-06	0,999925098
ReatMetan	Ruptura no Reator	3,25E-07	1,68E-06	2,53E-06	4,65E-07	0,999995000

Fonte: O Autor (2018)

Nota: Adaptação de Di Domenico et al. (2014)

Na etapa de análise da exposição dos objetos devido a ocorrência dos cenários feita pelo cruzamento de cada cenário acidental θ_{jk} com cada subárea s , foi estimada o raio da zona de perigo para cada subárea. Conforme Georgiadou et al. (2010), normalmente a extensão da zona é baseada na intensidade do fenômeno extremo após o acidente maior. Então, de maneira conservadora, consideram-se as zonas de perigo mais críticas, associadas ao pior cenário acidental, que pode ocorrer naquela subárea, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Raio crítico da zona de perigo para cada subárea (metros)

Subárea	Raio Crítico
Aestac	703
EstocEtan	1000
AlEtan	147
SepEtan	397
ProdEtan	320
EstocMetan	893
RecircEtan	369
ReatMetan	164

Fonte: O Autor (2018)

A estimação dos raios foi realizada com a ajuda do software ALOHA (versão 5.4.7). Essa ferramenta computacional, desenvolvida pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA), permite a inserção de detalhes sobre uma versão química real ou potencial e, em seguida, gerar as estimativas da zona de perigo para as diferentes fontes de ameaças. As premissas utilizadas no software encontram-se na Tabela 20 (Apêndice A). Algumas telas do software para o cenário mais crítico encontram-se nas Figuras 15 a 22 (Apêndice A).

Respeitado as características de cada subárea, as zonas de perigo associadas a cada uma e as características da planta, além da concordância do decisor, delimitam-se três conjuntos de *payoffs*: sobre os seres humanos (c_h), sobre o meio-ambiente (c_a), e sobre a perda financeira (c_f).

O primeiro conjunto de *payoffs* $\mathcal{P}_h = \{c_h\}$, está relacionado a dimensão humana, sendo considerado, para esta aplicação, como o número de pessoas expostas devido uma radiação de

3Kw/m² por um tempo inferior a 60 segundos dos líquidos inflamáveis. Essa análise é mais conservadora pois engloba qualquer tipo de ferimentos, queimaduras, dores; e não apenas a morte de pessoas, como é tratado no risco individual (GARCEZ et al., 2009; BRITO; DE ALMEIDA, 2009).

Considerando a densidade demográfica na planta, conforme Tabela 21 (Apêndice B) e a zona de perigo de cada subárea na Tabela 7, tem-se o conjunto do número de pessoas expostas ao risco mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Número máximo de pessoas expostas dentro da zona de perigo

Subárea	Nº Máximo de Pessoas Expostas
Aestac	1920
EstocEtan	6110
AlEtan	105
SepEtan	420
ProdEtan	280
EstocMetan	5259
RecircEtan	350
ReatMetan	118

Fonte: O Autor (2018)

O segundo conjunto de *payoffs*, $\mathcal{P}_a = \{c_a\}$, está relacionado a dimensão ambiental, sendo tomado como a área em metros quadrados atingida em decorrência do cenário de vazamento de líquido inflamável no processo da indústria de metanol, adotando o raio de alcance para isso, conforme mostrado na Tabela 9

Tabela 9 – Área em decorrência do vazamento de líquido inflamável (metros²)

Subárea	Área
Aestac	254,47
EstocEtan	615,75
AlEtan	201,06
SepEtan	113,10
ProdEtan	1017,88
EstocMetan	1256,64
RecircEtan	615,75
ReatMetan	452,39

Fonte: O Autor (2018)

A área máxima exposta ao risco acidental é limitada superiormente à subárea de Estocagem de Metanol, com uma área equivalente a 1256,64 m². Desta maneira, limita-se o conjunto $\mathcal{P}_a = \{c_a\}$ em 1256,64 m² de área contaminada. Como a simulação é realizada numa

planta de produção de metanol que se encontra localizada numa área industrial hipotética, pode-se perceber uma pequena exposição ao impacto ambiental, quando se compara a outras dimensões analisadas. Mesmo assim, é necessário perceber que, mesmo sendo baixo o impacto ambiental levando em consideração a área que pode ser contaminada, a perda referente aos danos ao meio ambiente pode ser grande, pois podem existir espécies importantes e raras em uma determinada região. Além disso, o apelo público voltado a conservação da natureza cresceu atualmente, sendo de grande peso à imagem das empresas modernas.

O terceiro conjunto de *payoffs* $\mathcal{P}_f = \{c_f\}$ considerou a dimensão do montante de perdas financeiras decorrente dos prejuízos monetariamente contabilizados (gastos esperados com a reestruturação de mão de obra, equipamentos e matéria prima) derivado de um acidente com vazamento de líquidos inflamáveis na indústria de metanol. Nesse sentido, através do raio das zonas de perigos obtido na Tabela 7, considerando o gasto de \$1 por metro quadrado, e um fator de perda ρ , obtém-se a Tabela 10 os valores dos prejuízos financeiros máximos para cada subárea.

Esse fator de perda ρ está associado com os esforços de reestruturação dos danos causados pelos cenários de acidentes k , ou seja, quando maior for o valor de ρ , maior será o impulso financeiro para reestruturar o ambiente afetado. As matrizes de consequências (humanas, ambientais e financeiras) utilizadas na simulação estão representadas nas Tabelas 22-24 (Apêndice B).

Tabela 10 – Prejuízos financeiros derivado do vazamento de líquidos inflamáveis (\$)

Subárea	Prejuízos Financeiros
Aestac	\$ 2.328.905,05
EstocEtan	\$ 4.712.388,98
AlEtan	\$ 101.830,01
SepEtan	\$ 742.714,91
ProdEtan	\$ 482.548,63
EstocMetan	\$ 3.757.889,88
RecircEtan	\$ 641.643,60
ReatMetan	\$ 126.744,41

Fonte: O Autor (2018)

Como é suposto que a estrutura do decisor é independentemente aditiva entre os critérios, desta forma as funções utilidade unidimensionais podem ser elicitadas individualmente, sendo este procedimento chamando de avaliação intra-critério. Nesta avaliação, os ajustes das curvas que retratam as preferências do decisor com relação as dimensões de consequência são

realizados, levando em conta o comportamento do decisor à respeito do risco (DE ALMEIDA et al., 2015).

Desta maneira, o comportamento do decisor é feito através do procedimento de loterias, conforme descrito em Alencar & de Almeida (2010). O cálculo das utilidades $u(c_h)$, $u(c_a)$, $u(c_f)$ recaem no intervalo $c_0 \leq c \leq c_1$, onde “ c_0 ” representa o menor valor do dano relacionado a cada dimensão, “ c ” um valor dentro desse intervalo e “ c_1 ” o maior valor de perda considerado.

Para avaliar a atitude do decisor com relação ao risco, considera-se uma loteria de 50-50, ou seja, 50% de chance de obter a consequência c_0 e 50% de chance de obter a consequência c_1 , onde os extremos de c são comparados com a consequência esperada. Então, pergunta-se ao decisor se uma chance de 50-50 para c_0 e c_1 é preferível, indiferente ou menos preferível, a uma consequência certa $\bar{c} = (c_0 + c_1)/2$. Se ocorrer uma preferência pela consequência certa, indica uma aversão ao risco; porém se houver uma preferência pela loteria, indica uma propensão ao risco; e caso ocorra a indiferença entre as loterias e consequências certa, indica uma neutralidade ao risco.

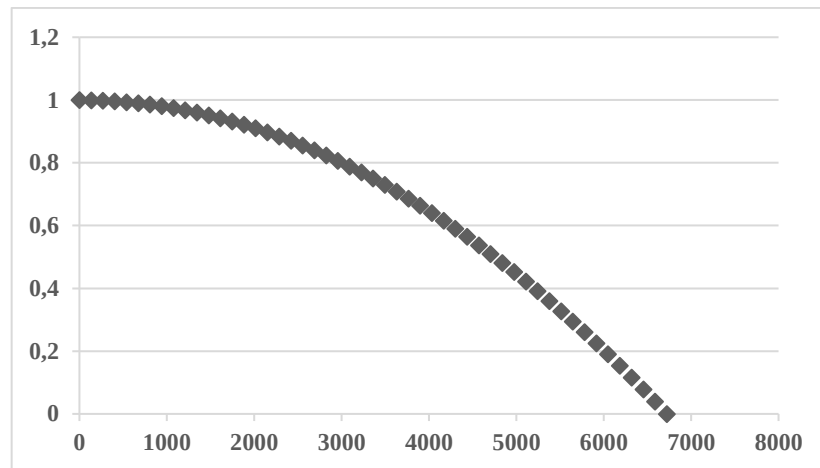
Para essa aplicação numérica, supôs que o decisor apresentou um perfil aversão ao risco nas dimensões humanas e ambientais; e propensão ao risco na dimensão financeira. A equação utilizada para o cálculo das funções utilidade multidimensionais levando em consideração as atitudes do decisor com relação ao risco está descrito na Equação 15.

$$u(c_i) = 1 - \left(\frac{y}{\max(y)} \right)^N \quad (15)$$

onde, y define os valores da consequência considerada numa dada dimensão i de consequências, enquanto “ N ” representa o fator de ajuste da curva, sendo $N = 2$ para a dimensão humana, $N = 1,5$ para dimensão ambiental, e $N = 0,8$ para a dimensão financeira. O sinal negativo da função representa o decréscimo, conforme a ideia referente a consequência nula (sem impactos) está associada ao valor 1 da utilidade, enquanto que o valor 0 da utilidade está relacionado com o maior das consequências estimadas.

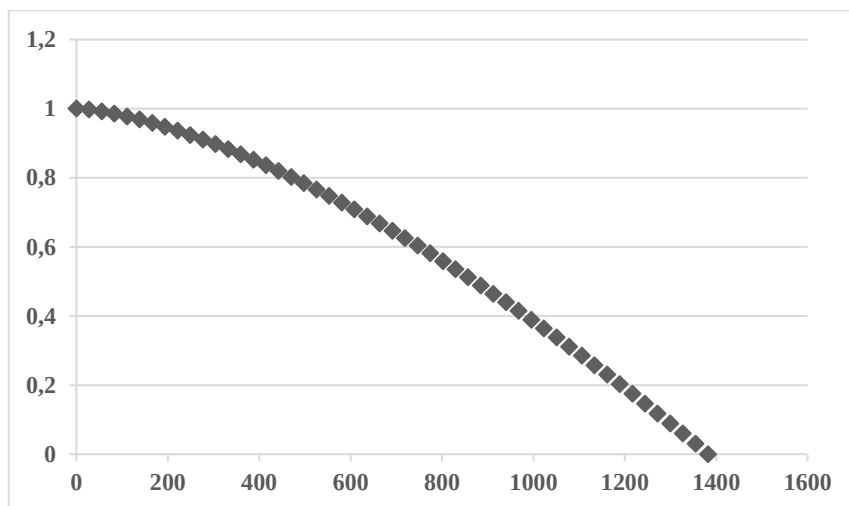
É importante ressaltar que, para fins de estimação da função utilidade, o conjunto de consequência pode ser considerado de forma continua, apesar dos valores serem discretos e enumeráveis (GARCEZ; DE ALMEIDA, 2014a). Desta forma, os comportamentos do decisor, para esta simulação, nas três dimensões analisadas, podem ser verificados nas Figuras 12-14.

Figura 12 – Função Utilidade Humana – Aversão ao risco



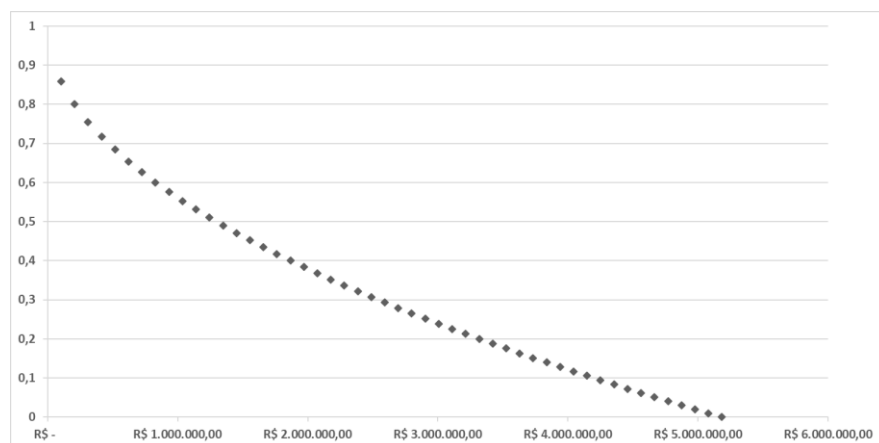
Fonte: O Autor (2018)

Figura 13 – Função Utilidade Ambiental – Aversão ao risco



Fonte: O Autor (2018)

Figura 14 – Função Utilidade Financeira – Propensão ao risco



Fonte: O Autor (2018)

A elicitação das constantes de escala k_{ch} , k_{ca} , k_{cf} foi feito utilizando as matrizes de consequências das Tabelas 22-24 (Apêndice B) e o método de elicitação baseado na comparação de loterias proposto por Keeney & Raiffa (1976). Os valores das constantes de escala consideradas foram $K_{ch} = 0,275$, $K_{ca} = 0,115$ e $K_{cf} = 0,61$.

Por simplificação, foram feitas suposições determinísticas para o cálculo das funções probabilidades das consequências. Essas suposições foram baseadas de acordo com os graus de severidades, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Categoria de Severidade

Categoria de Severidade		Descrição/Características		
		Segurança Pessoal	Segurança das Instalações	Meio Ambiente
I	Desprezível	Não acontece mortes/lesões de funcionários ou terceiros	Sem danos a equipamentos ou instalações	Sem danos ao Meio Ambiente
II	Marginal	Lesões leves em funcionários e terceiros	Danos leves a equipamentos ou instalações	Danos ao Meio Ambiente devido a emissão direta de até 8m ³ de óleos em corpo d'água.
III	Crítica	Lesões Moderadas em funcionários e terceiros Lesões leves em pessoas fora da instalação.	Danos severos a equipamentos ou instalações	Danos ao Meio Ambiente devido a emissão direta de até 200m ³ de óleos em corpo d'água.
IV	Catastrófica	Morte e lesões graves em uma ou mais pessoas	Danos irreparáveis a equipamentos ou instalações	Danos ao Meio Ambiente devido a emissão direta de mais de 200m ³ de óleos em corpo d'água.

Fonte: O Autor (2018)

Nesse sentido, as suposições seguem a seguinte legenda representada na Tabela 12.

Tabela 12 – Suposições determinísticas sobre as funções consequências

Grau de Severidade	Função Consequência $P(c s, \theta)$
Inexistente	0
Desprezível	0,25
Marginal	0,50
Crítica	0,75
Catastrófica	1,00

Fonte: O Autor (2018)

Conforme a tabela de análise preliminar de perigos (APP) encontrados no estudo de Di Domenico et al. (2014), as funções de probabilidades das consequências (humanas, ambientais e financeiras) estão representados nas Tabelas 25-27 (Apêndice B).

Todos os *inputs* necessários para calcular os riscos de cada subárea foram calculados, sendo substituído na Equação 5, representado o ranking de risco na Tabela 13.

Tabela 13 – Riscos estimados para cada subárea na planta de produção de metanol

Subárea	Risco	Ranking do risco
Aestac	-0,999999836260	8º.
EstocEtan	-0,999992179094	5º.
AlEtan	-0,999956676535	1º.
SepEtan	-0,999992159542	4º.
ProdMetan	-0,999998614999	6º.
EstocMetan	-0,999989298728	3º.
RecircEtan	-0,999982730523	2º.
ReatMetan	-0,999998959545	7º.

Fonte: O Autor (2018)

6.1.2. Identificação e avaliação das ações de resposta ao risco

Ordenado os riscos, o próximo passo é a identificação e avaliação das ações de resposta ao risco. Quando se fala em incidentes envolvendo produtos químicos, é necessário sempre manter cuidado e apresentar medidas específicas para o controle de diferentes situações que possam ocorrer, razão pela qual a intervenção de pessoas devidamente capacitadas e equipadas é fundamental para o sucesso dessas operações.

Nesse sentido ações gerais como: Uso de equipamentos de proteção individual e coletiva, como por exemplo, luvas de proteção, óculos de proteção, roupas apropriadas, protetores auriculares, máscaras, etc.; Uso de ventilação e exaustão adequada; Uso de iluminação adequada; Equipamentos de manuseio de matérias a prova de explosão; Uso de equipamentos de contenção; Uso de sinalizadores de risco; Redução do tempo de exposição ao material químico; Uso de equipamentos de detecção de liberação de gases; Alarmes; Construção de Planos de Resposta a Emergência (PRE); dentre outros; fazem parte dos planos de ações de resposta ao risco nas indústrias químicas.

Para o caso específico do metanol e etanol, outras ações podem ser incorporadas ao plano de resposta ao risco sendo subdivididas conforme sua área de atuação:

- Para área de Engenharia e Instalações:
 - Aderência de normas de engenharia internacionais / nacionais no projeto, construção e teste de tanques de armazenamento e equipamentos;
 - Os tanques de armazenamento com indicadores de nível, amortecedores de chamas, válvulas de respiro e sistema de injeção de espuma;
 - O uso de vedação mecânica para evitar vazamentos e emissão fugitiva;
 - Utilizar água aplicada na forma de spray para não danificar o equipamento, podendo ser usado para limpar as chamas na a superfície do líquido.

- Para área Administrativa:
 - As áreas de armazenamento devem estar livres de acumulação de materiais;
 - Construção de um sistema de comunicação disponível perto da área do tanque sala de controle, devendo ser à prova de fogo;
 - Desenvolvimento de um layout que favoreça acesso adequado contra incêndio, meios de fuga e também segregação de instalações para que as instalações adjacentes não estejam em perigo durante o acidente;
 - Desenvolver procedimentos detalhados de manutenção / contratação que exigem a identificação física das aberturas do tanque durante o passeio e outros dispositivos que não cobrem as atividades de manutenção.
 - Barricar a área de derramamento com areia / terra;
- Para saúde ocupacional dos trabalhadores:
 - Métodos de isolamento elétrico sendo exibido nos locais necessários.
 - O treinamento adequado a todos os funcionários em um período de tempo regular para conscientizar os trabalhadores
 - Os funcionários serão equipados com Equipamentos de proteção pessoal, como tampões de ouvido, sapatos, luvas, sempre que necessário.

Como pode-se ver, existem muitas ações preventivas e mitigativas que podem ser usadas para controle dos riscos referentes a indústria química. Além disso, algumas ações afetam tanto a probabilidade de ocorrência do evento acidental, bem como as consequências advindas da ocorrência do acidente. Para esta aplicação numérica, foram consideradas 24 ações hipotéticas, conforme mostradas na Tabela 14.

Para cada subárea, foram considerados três ações, visto que o modelo proposto irá escolher apenas uma para implementação. Por simplificação do exemplo numérico, os custos e o tempo foram encontrados de maneira aleatória.

Como se sabe, cada ação atua na modificação dos parâmetros (probabilidades de ocorrência e consequências) do modelo de risco multidimensional, ou seja, apresentam múltiplas influências sobre os parâmetros. Nesse sentido, para o caso hipotético, foi considerado as seguintes efetividades das ações para cada cenário de perigo k , conforme as Tabelas 28-31 (Apêndice C). Como um exemplo básico, pode-se citar a barricada do espaço afetado com areia, que pode reduzir em 20% a probabilidade de ocorrência; e 60% as consequências ambientais.

De posse desses dados, calcula-se os novos riscos $r(s_a)$ e as diferenças existentes entre o risco sem as ações (Tabela 6.9), sendo representados na Tabela 14.

Tabela 14 – Lista de ações de prevenção e mitigação dos riscos multidimensionais

Ações	Subárea Associada	Custo (\$)	Tempo (dias)
A1	Aestac	\$ 10.500,00	6
A2	Aestac	\$ 7.655,00	15
A3	Aestac	\$ 2.961,00	9
A4	EstocEtan	\$ 4.541,00	10
A5	EstocEtan	\$ 2.874,00	8
A6	EstocEtan	\$ 7.037,00	16
A7	AlEtan	\$ 15.324,00	10
A8	AlEtan	\$ 6.002,00	5
A9	AlEtan	\$ 7.096,00	15
A10	SepEtan	\$ 14.344,00	12
A11	SepEtan	\$ 8.637,00	14
A12	SepEtan	\$ 11.542,00	8
A13	ProdMetan	\$ 7.733,00	10
A14	ProdMetan	\$ 9.666,00	8
A15	ProdMetan	\$ 10.222,00	10
A16	EstocMetan	\$ 3.346,00	19
A17	EstocMetan	\$ 3.342,00	12
A18	EstocMetan	\$ 4.884,00	8
A19	RecircEtan	\$ 4.883,00	9
A20	RecircEtan	\$ 2.441,00	12
A21	RecircEtan	\$ 13.615,00	9
A22	ReatMetan	\$ 8.296,00	11
A23	ReatMetan	\$ 9.378,00	11
A24	ReatMetan	\$ 3.281,00	6

Fonte: O Autor (2018)

6.1.3. Processo de Otimização

O objetivo é prevenir e mitigar a exposição ao risco, e para isso, a função objetivo, representada pela Equação 10, é usada como a função para a qual a minimização é procurada. Supôs que, neste exemplo, o orçamento esteja limitado em $O = \$50.000,00$, e o tempo máximo estimado, em dias, seja de $T = 60$, para implementação do plano de resposta ao risco, conforme Equações 11 e 12.

Através do solver do Excel, utilizando o método de algoritmo evolutivo, e seguindo o passo a passo da abordagem lexográfica, conforme descrito na seção 4.2.1, o resultado encontrado está descrito na Tabela 15, tendo o risco de forma decrescente na Tabela 16.

Tabela 15 – Diferenças entre os riscos multidimensionais antes e depois da aplicação das ações

Subárea	Ações	$r(s_a) - r(s)$
Aestac	A1	-1,31748E-08
	A2	-8,43993E-08
	A3	-2,48443E-08
EstocEtan	A4	-1,54132E-06
	A5	-1,70688E-06
	A6	-1,76897E-06
AlEtan	A7	-3,15204E-05
	A8	-2,16299E-05
	A9	-2,64928E-05
SepEtan	A10	-3,39811E-07
	A11	-1,85627E-06
	A12	-3,91778E-06
ProdMetan	A13	-6,58681E-07
	A14	-5,0948E-07
	A15	-5,20906E-08
EstocMetan	A16	-6,19926E-06
	A17	-5,83517E-06
	A18	-4,74843E-06
RecircEtan	A19	-5,28711E-06
	A20	-3,87161E-06
	A21	-6,28406E-06
ReatMetan	A22	-3,98816E-07
	A23	-2,53834E-07
	A24	-2,70948E-07

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 16 – Conjunto de ações ótimas para cada subárea na planta de produção de metanol

Subárea	Ranking do risco	Ações
AlEtan	1º.	A7
RecircEtan	2º.	A21
EstocMetan	3º.	A16
SepEtan	4º.	A12
EstocEtan	5º.	A5
ProdMetan	6º.	-
ReatMetan	7º.	A24
Aestac	8º.	-

Fonte: O Autor (2018)

O resultado ótimo contém 6 ações. O orçamento total e o tempo de execução utilizado são de, respectivamente, R\$ 49.982,00 e 60 dias. Aplicando esse conjunto de ações de resposta ao risco, a redução total encontrada foi de -4,98993E-05

6.2. Discussões

Apesar dos eventos envolvendo a produção de metanol serem raros, as suas consequências são desastrosas, envolvendo não apenas impactos aos seres humanos, mas todo um ambiente afetado pelo vazamento de líquidos inflamáveis. Desta forma, o gerenciamento de risco se torna crítico e importante para essas indústrias.

Primeiramente, deve-se levar em conta que os riscos correspondem aos valores esperados de perda. A perda, conforme Equação 1 e 2, representa o negativo da utilidade de uma distribuição de probabilidade $P(c|\theta_{jk}, s)$. Dessa maneira, estando as utilidades em uma escala de 0 a 1, as perdas, e consequentemente os riscos estarão numa escala de -1 a 0. Para esse caso hipotético, as medidas de risco para cada subárea mostradas na Tabela 13 seguem essa ideia e estão próximos ao valor -1 .

Outro ponto para observar é o fato de que a maior contribuição para o risco é o do cenário de normalidade, ou seja, o cenário sem a ocorrência de acidentes. Isso se dá pelo fato de que os acidentes em plantas de produção de metanol são raros, justificando o uso de probabilidades de ocorrência $\pi_s(\theta_{jk})$ baixos. Nesse sentido, quando não há impactos acidentais no cenário onde não ocorre o vazamento de líquidos inflamáveis, a utilidade da consequência neste cenário é 1 e a perda, consequentemente, -1 . Por conseguinte, quando existe o vazamento, as perdas são ponderadas pelas probabilidades pequenas, gerando contribuições de pequeno valor, resultando em valores de risco próximos a -1 .

Sob a análise ainda das medições de risco multidimensional no caso hipotético, a subárea referente a Alimentação de Etanol foi considerada a com maior risco, sendo esta a que deverá receber primeiro os esforços para seu tratamento. Conforme o resultado da otimização das ações, tem-se os novos riscos e as melhorias, de acordo com a Tabela 17.

É importante observar que apesar de aplicada as melhores ações disponíveis nos dois primeiros riscos prioritários e levando a uma melhora considerável das estimativas desses riscos, os mesmos ainda continuam como prioritários no novo *ranking*. Dessa forma, conclui-se que esses riscos merecem uma atenção maior nos planejamentos de seus processos.

Tabela 17 – Resultado dos novos riscos com as melhorias de cada ação em cada subárea

Subárea	Ranking do risco	Ações	Novo Risco	Ranking do novo risco	Melhoria (%)	Melhoria no Risco Total (%)
AlEtan	1º.	A7	-0,9999882	1º.	0,00315218 %	0,00039400 %
RecircEtan	2º.	A21	-0,9999890	2º.	0,00062842 %	0,00007855 %
EstocMetan	3º.	A16	-0,9999955	4º.	0,00061993 %	0,00007749 %

SepEtan	4º.	A12	-0,9999961	5º.	0,00039178 %	0,00004897 %
EstocEtan	5º.	A5	-0,9999939	3º.	0,00017069 %	0,00002133 %
ProdMetan	6º.	-	-0,9999986	6º.	0,00000000 %	0,00000000 %
ReatMetan	7º.	A24	-0,9999992	7º.	0,00002709 %	0,00000338 %
Aestac	8º.	-	-0,9999998	8º.	0,00000000 %	0,00000000 %

Fonte: O Autor (2018)

Além disso, a aplicação mostrou que não houve alocação de ação no risco relacionada a subárea de produção de metanol. Apesar de ser um risco prioritário em relação ao Reator de Metanol, o modelo decidiu escolher a ação que envolve a subárea do Reator. Quando se fala em decisões gerenciais, é necessário observar o porquê dessa escolha, e no quão irá impactar o processo. Quando se olha a Tabela 15, percebe-se que as ações relacionadas ao Reator de Metanol apresentam um impacto maior do que as ações referentes a Produção de Metanol. Desta forma, a escolha é acertada, visto que o modelo procura as ações que minimizem ao máximo o risco ocasionado a planta de produção de metanol.

Portanto, de certa maneira, é necessário que ocorra um estudo detalhado na escolha de ações de prevenção e mitigação por parte dos tomadores de decisão, para que as ações tratem sempre os riscos de prioridade maior.

Além disso, foi realizado uma comparação dos resultados da abordagem lexográfica para a abordagem de risco global, utilizando as mesmas premissas de todas as etapas do modelo. Obteve-se por coincidência, o mesmo resultado. Porém, é notório que, apesar da escolha das alternativas serem as mesmas nas duas abordagens no exemplo numérico da planta de produção de metanol, analisar sobre a ótica de risco global não garante que os riscos mais críticos sejam tratados, não atendendo, desta forma, os objetivos principais dos tomadores de decisão.

6.2.1. Análise de sensibilidade sobre os parâmetros de restrição do modelo

A solução de vários problemas envolvendo pesquisa operacional requer a criação de modelos quantitativos, sendo a análise de sensibilidade um passo crucial no processo de construção desse modelo e comunicação dos resultados obtidos (BORGONOVO; PLISCHKE, 2016).

Pianosi et al. (2016) define análise de sensibilidade como uma investigação do comportamento, da estrutura, e da resposta do modelo através de variações nos fatores de entrada. Essa análise permite ao decisor aprofundar-se nos efeitos das variações dos dados no

resultado final da aplicação numérica, e consequentemente, verificar a robustez do modelo aplicado, auxiliando, desta forma, na tomada de decisão.

Desta maneira, analisou-se o impacto no resultado da aplicação numérica pela variação dos parâmetros de restrição de orçamento total e tempo máximo de execução das ações no modelo proposto. Primeiro, considerou apenas a variação de orçamento disponível, deixando o tempo máximo constante ($T = 60$), conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Resultado da análise de sensibilidade sobre a restrição de orçamento

	AlEtan	Recirc Etan	Estoc Metan	SepEtan	Estoc Etan	Prod Metan	Reat Metan	Aestac
-30%	A7	A21	A16	-	-	-	-	-
-15%	A7	A21	A16	A11	-	-	-	-
-10%	A7	A21	A16	A12	-	-	-	-
-5%	A7	A21	A16	A12	A5	-	-	-
0	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
5%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
10%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
15%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
30%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-

Fonte: O Autor (2018)

O que se percebe é que, a solução permanece a mesma quando há variação positiva até 30% do orçamento, mantendo as 6 ações, considerando, desta forma, o modelo robusto para essas alterações. Já para variações negativas do orçamento, o modelo reduziu o número de alternativas escolhidas (de 6 para 5 ações, e depois para 4 ações e 3 ações), sempre favorecendo os riscos de prioridade maior, resultando na interpretação de quanto menos recursos financeiros se têm, menos ações serão realizadas.

Porém, apesar de manter as mesmas três ações dos riscos de prioridade maior (AlEtan, RecircEtan e EstocMetan), o modelo proposto trocou a ação A12 para A11, no quarto risco (Separação de Etanol), quando se altera em -15% o orçamento. Essa troca favoreceu o sistema, pois mesmo reduzindo o orçamento, continuou quatro ações sendo realizadas. A alteração é justificável, pois, o modelo atua na alocação ótima dos recursos escassos, ou seja, mesmo que exista uma ação que não seja a melhor, será realizado a ação que se encaixa no orçamento que se tem.

Agora considerou a variação do tempo máximo de execução das ações, deixando o orçamento disponível constante (\$50.000,00), conforme Tabela 19.

Percebe-se que, para variações positivas do tempo de execução máximo, a solução permaneceu a mesma, ou seja, foi robusto. Porém, para variações negativas, o número de ações escolhidas foram diminuindo, resultando na ideia de quanto menos recursos de tempo se tem,

menos ações podem ser realizadas. Além disso, o modelo não foi robusto para variação em - 30%, pois houve uma troca da ação A12 para A24. Essa troca também favoreceu o sistema, pois mesmo reduzindo o tempo de execução das ações, continuou a escolha por quatro ações.

Comparando as duas Tabelas 18 e 19, o modelo de forma geral é considerado robusto perante as mudanças nos parâmetros de restrições.

Tabela 19 – Resultado da análise de sensibilidade sobre a restrição de tempo máximo de execução das ações

	AlEtan	Recirc Etan	Estoc Metan	SepEtan	Estoc Etan	Prod Metan	Reat Metan	Aestac
-30%	A7	A21	A16	-	-	-	A24	-
-15%	A7	A21	A16	A12	-	-	-	-
-10%	A7	A21	A16	A12	A5	-	-	-
-5%	A7	A21	A16	A12	A5	-	-	-
0	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
5%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
10%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
15%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-
30%	A7	A21	A16	A12	A5	-	A24	-

Fonte: O Autor (2018)

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Apesar das indústrias químicas serem controladas por diretrizes técnicas que visam minimizar os riscos quanto ao meio ambiente, danos a equipamentos e preservação a saúde do trabalhador, é inevitável que falhas ocorram e, consequentemente, acidentes afetem as diversas dimensões de consequência (humana, ambiental, financeira, operacional, etc.), gerando repercussões desagradáveis, não só para as indústrias, mas para sociedade como um todo. Assim, torna-se evidente a necessidade de gerenciar os riscos dessas indústrias complexas, sob a ótica multidimensional do risco, através do uso de planos de respostas ao risco, servindo como forma de tratamento aos riscos referentes ao sistema.

Os planos de resposta ao risco são formados por diversas ações, sejam elas de prevenção (afetam as probabilidades de ocorrência dos eventos acidentais) e mitigação (afetam as consequências indesejadas dos eventos acidentais). Porém, um dos grandes desafios enfrentados pelos tomadores de decisão é saber escolher as medidas que trarão melhores resultados no tratamento dos riscos, sob limitações de recursos.

É importante observar que os modelos de risco que tratam de alocação de recursos limitados ou escassos, a problemática de ordenamento dos riscos torna-se mais adequada. Nesse sentido, este trabalho apresentou um modelo de apoio a decisão que otimiza as ações de resposta ao risco multidimensional na indústria química, agregando ideias como Teoria da Decisão e Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), para avaliação dos riscos das subáreas em cada dimensão de impacto, incorporando as preferências de um tomador de decisão e o seu comportamento em relação ao risco; assim como ideia de otimização lexográfica, que permite encontrar soluções ótimas, obedecendo prioridades pré-estabelecidas dos riscos.

Como em quaisquer situações envolvendo tomada de decisão, é importante levar em consideração as particularidades dos problemas. Desta maneira, o modelo proposto é passível de modificações e melhorias, que podem torná-lo abrangente a outros problemas. Pode haver mudanças tanto na parte de avaliação dos riscos multidimensionais, com aplicação em outras indústrias; como a escolha de qual conjunto de atributos e cenários de perigo a serem considerações, quais metodologias de cálculo das funções consequências adotadas; como na parte da otimização, com a aplicação de diferentes abordagens (Risco Global, Markovitz, Portfólio, etc.), conforme sua problemática.

Com o propósito de ilustrar o modelo proposto do planejamento de resposta ao risco, proposto neste trabalho, realizou-se uma aplicação numérica numa planta hipotética de produção de metanol. Nesta aplicação, foi admitido a possibilidade de ocorrência de diferentes

cenários de grandes vazamentos de líquidos inflamáveis encontrados na indústria química de metanol, relacionados a ruptura da estrutura, assim como taxas de falhas constantes a curto e médio prazo, possibilitando que a probabilidade associada a ocorrência de cada evento na árvore da Figura 9, seja considerada constante, e não em função do tempo.

Além disso, a aplicação numérica foi adequada para zonas de perigo com raios de algumas centenas de metros, de modo que a combinação das consequências humanas, ambientais e financeiras se dão de forma independente, em função das características geográficas particulares de cada subárea. Outra delimitação utilizada para a aplicação foi que os riscos estimados se encontraram na região ALARP, então recomenda-se que se tomem medidas para tratamento desses riscos.

Para a alocação otimizada de recursos apertados para prevenção e mitigação de riscos priorizados, ou seja, selecionar o melhor plano de resposta ao risco de uma lista de ações com muitas opções, um algoritmo Lexográfico foi investigado, levando em consideração restrições orçamentárias e de tempo de execução. Essa abordagem atendeu à problemática proposta de priorização dos riscos.

Os resultados da aplicação mostraram que o risco na subárea de alimentação de etanol (AlEtan) apresentou maior valor de risco, sendo este a primeira subárea a ser priorizada com os as ações de tratamento dos riscos, e assim sucessivamente nas outras subáreas com riscos menores, seguindo o ordenamento na Tabela 13. Nesse sentido, as ações hipotéticas foram escolhidas seguindo essa ordem de prioridade, e oferecendo sempre a melhor opção a cada interação, ou seja, aquela que minimizava a diferença entre os riscos, conforme função objetivo e restrições estabelecidas.

Foi realizado a análise de sensibilidade do exemplo numérico para determinar a robustez do modelo sobre as variações dos parâmetros do modelo. A análise foi feita sobre os parâmetros que se achava de grande impacto para o modelo. Como resultado da análise de sensibilidade, considera-se o modelo, de forma geral, robusto a variações positivas desses dados, justificando a ideia de que cada vez mais forem escassos os recursos, menos será alocado as ações para atenuação dos riscos.

Como apresentado ao longo do modelo e da aplicação numérica realizada, a maior contribuição deste trabalho está relacionada a junção da estrutura axiomática da Teoria da Utilidade e da Teoria da Decisão com o apoio Multicritério a Decisão, recaindo na estrutura de medição do risco multidimensional, procurando avaliar os riscos de maneira mais consistente as incertezas associadas; e propondo, através disso, ações de resposta ao risco eficazes e eficientes, otimizando os riscos.

Assim sendo, algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser feitas:

- Agregação de outras dimensões de risco que possam ser tratadas pelo modelo, e que atendam as expectativas do decisor;
- Análise da decisão sob a ótica de múltiplos decisores, podendo ser agregado diferentes pensamentos ao problema, considerando órgãos regulamentadores, representantes da população, investidores, etc.;
- Aplicação do modelo em um caso real, para visualização de possíveis entraves e melhorias para o modelo;
- Aplicação do modelo em casos que haja a escolha de duas ou mais ações a serem implementadas no mesmo risco, e;
- Utilização de outros algoritmos de otimização, como por exemplo, meta-heurísticas (algoritmos genéricos), para comparação dos dados de resposta.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAMSEN, E. B. et al. Using the ALARP principle for safety management in the energy production sector of chemical industry. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 169, p. 160–165, jan. 2018.
- AIRMIC; ALARM; IRM. A structured approach to Enterprise Risk Management (ERM) and the requirements of ISO 31000 Contents. **Risk Management**, v. 7, n. 1, p. 20, 2010.
- ALENCAR, M. et al. Multicriteria risk analysis application in a distribution gas pipeline system in Sergipe. In: **Reliability, Risk, and Safety**. [s.l.] CRC Press, 2009.
- 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**, v. 35, n. 8, p. 3610–3619, 2010a.
- 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**, v. 35, n. 8, p. 3610–3619, abr. 2010b.
- ALMEIDA, A. T. DE. **Processo de decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2013.
- ALMEIDA, A. T. DE; ALMEIDA-FILHO, A. T. Multiple dimension risk evaluation framework. In: Bris R, Soares CG, Martorell S (eds). European Safety and Reliability Conference (ESREL), Prague, 2009. **Reliability, Risk and Safety: Theory and Applications**, p 1049.
- ALMEIDA, A. T. DE; ALENCAR, M. H; GARCEZ, T. V; FERREIRA, R. J. P. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 28, n. 2, p. 153-184, 2017.
- ALMEIDA, A. T. DE; CAVALCANTE, C. A. V; ALENCAR; M. H; FERREIRA, R. J. P; ALMEIDA-FILHO; A. T; GARCEZ, T. V. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**. Springer International Publishing, 2015.
- ANDRETTA, M. Some Considerations on the Definition of Risk Based on Concepts of Systems Theory and Probability. **Risk Analysis**, v. 34, n. 7, p. 1184–1195, 2014.
- ANDREWS, J. D.; DUNNETT, S. J. Event-tree analysis using binary decision diagrams. **Reliability, IEEE Transactions on**, v. 49, n. 2, p. 230–238, 2000.
- ANP. Anuário Estatístico do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2016. **Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis**, p. 1–264, 2016.

- APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da Ciência - Filosofia e Prática da Pesquisa**. São Paulo: Thompson Learning, 2006.
- AQLAN, F.; MUSTAFA ALI, E. Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 29, n. 1, p. 39–48, 2014.
- ARESTA, M. **Carbon Dioxide as Chemical Feedstock**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
- ASGARI, H.; HAINES, S.; WALLER, A. Security Risk Assessment and Risk Treatment for Integrated Modular Communication. **Ares**, p. 503–509, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000/2009: Gestão de Riscos – Princípios e Diretrizes**. Rio de Janeiro, 2009.
- AVEN, T. **Risk Analysis: Assessing Uncertainties beyond Expected Values and Probabilities**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- AVEN, T. The risk concept-historical and recent development trends. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 99, n. 951, p. 33–44, 2012.
- AVEN, T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. **European Journal of Operational Research**, v. 253, n. 1, p. 1–13, 2016.
- AVEN, T.; HIRIART, Y. The use of a basic safety investment model in a practical risk management context. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 96, n. 11, p. 1421–1425, 2011.
- BADREDDINE, A.; AMOR, N. BEN. A Bayesian approach to construct bow tie diagrams for risk evaluation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 91, n. 3, p. 159–171, 2013.
- BAYBUTT, P. The ALARP principle in process safety. **Process Safety Progress**, v. 33, n. 1, p. 36–40, mar. 2014.
- BEHRENS, M. et al. The Active Site of Methanol Synthesis over Cu/ZnO/Al₂O₃ Industrial Catalysts. **Science**, v. 336, n. 6083, p. 893–897, 18 maio 2012.
- BERGER, J. **Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis: An Integrated Approach**. 2. ed. [s.l.] Springer Series in Statistics, 1985.
- BERTAUE, M. et al. **Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, fev. 2002.
- BHAWANA, P.; FULEKAR, M. H. Review Paper Environmental Management- strategies for

chemical disaster. v. 1, n. 1, 2011.

BIALAS, A.; FLISIUK, B. Towards Mixed-Mode Risk Management – A Concept. In: **Advances in Intelligent Systems and Computing**. [s.l.] Springer Verlag, 2018. v. 582p. 13–25.

BONVICINI, S. et al. Quantitative assessment of environmental risk due to accidental spills from onshore pipelines. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 93, p. 31–49, jan. 2015.

BORGONOVO, E.; PLISCHKE, E. Sensitivity analysis: A review of recent advances. **European Journal of Operational Research**, v. 248, n. 3, p. 869–887, 2016.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 2, p. 187–198, fev. 2009.

BRITO, A. J.; DE 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**, v. 200, n. 3, p. 812–821, 2010.

CAGNO, E. et al. Using AHP in determining the prior distributions on gas pipeline failures in a robust Bayesian approach. v. 67, p. 275–284, 2000.

CALLARI, R.; MAGALHÃES GEROSA, T.; HELENA LARA DOS SANTOS MATAI, P. Production of liquid hydrocarbons employing natural gas: a study of the technical and economical feasibility of a GTL plant in Brazil. **Studies in Surface Science and Catalysis**, v. 167, p. 135–140, 2007.

CAO, H. et al. An integrated emergency response model for toxic gas release accidents based on cellular automata. **Operations Research**, v. 255, n. 1–2, p. 617–638, 2017.

CAPP. Process Safety Management: Regulatory Scan. p. 1–48, 2014.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Management models and industrial applications of linear programming**. 1. ed. [s.l.] JohnWiley & Sons Inc, 1962.

CHOOBINEH, F.; BEHRENS, A. Use of intervals and possibility distributions in economic analysis. **Journal of the operational research society**, v. 43, n. 9, p. 907–918, 1992.

CHU, B.; LEE, S.; CHANG, D. Determination of design accidental fire load for offshore installations based on quantitative risk assessment with treatment of parametric uncertainty. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 45, p. 160–172, jan. 2017.

COCOCCIONI, M.; PAPPALARDO, M.; SERGEYEV, Y. D. Lexicographic multi-objective linear programming using grossone methodology: Theory and algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, v. 318, p. 298–311, fev. 2018.

COELLO COELLO, C. A.; VAN VELDHUIZEN, D. A.; LAMONT, G. B. **Evolutionary**

- Algorithms for Solving Multi-Objective Problems.** Boston, MA: Springer US, 2002. v. 5
- COPENOR. **Informações Técnicas: Metanol.** Disponível em: <<http://www.copenor.com.br/compos.php?m=site.pagina&pag=168&idioma=br>>. Acesso em: 11 nov. 2017.
- COZZANI, V. et al. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 127, n. 1–3, p. 14–30, 9 dez. 2005.
- CROWL, D. A.; JO, Y.-D. The hazards and risks of hydrogen. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 20, n. 2, p. 158–164, mar. 2007.
- DEB, K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms: an introduction. **Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing**, v. 1, p. 1–24, 2011.
- DI DOMENICO, J.; VAZ, C. A.; DE SOUZA, M. B. Quantitative risk assessment integrated with process simulator for a new technology of methanol production plant using recycled CO₂. **Journal of Hazardous Materials**, v. 274, p. 164–172, 2014.
- DILLON, R. L.; PATE-CORNELL, M. E.; GUIKEMA, S. D. Programmatic Risk Analysis for Critical Engineering Systems Under Tight Resource Constraints. **Operations Research**, v. 51, n. 3, p. 354–370, 2003.
- DUAN, W. et al. The situation of hazardous chemical accidents in China between 2000 and 2006. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 2–3, p. 1489–1494, fev. 2011.
- DUIJM, N. J. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, n. 2, p. 332–341, 2009.
- DUNN, C. J.; THOMPSON, M. P.; CALKIN, D. E. A framework for developing safe and effective large-fire response in a new fire management paradigm. **Forest Ecology and Management**, v. 404, n. August, p. 184–196, 2017.
- DZIUBIŃSKI, M.; FRĄTCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 5, p. 399–408, set. 2006.
- ELJACK, F.; KAZI, M. K. Process safety and abnormal situation management. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 14, p. 35–41, 2016.
- ESTRADA, J. A. F. D.; SANTOS, H. R. DA F.; GUTIERREZ, R. H. Gestão de Mudanças em processos industriais: o caso da aplicação da ferramenta SIGM. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 33., 2013, Salvador. **Anais...** Salvador: ABEPRO, 2013.
- EUROPEAN UNION AGENCY FOR NETWORK AND INFORMATION SECURITY, E. **Threat and Risk Management.** Disponível em: <<https://www.enisa.europa.eu/topics/threat->

risk-management/risk-management/current-risk/risk-management-inventory/rm-process/risk-treatment>. Acesso em: 26 nov. 2017.

F. ARAÚJO, O. DE Q.; DE MEDEIROS, J. L.; MARIA, R. CO₂ Utilization: A Process Systems Engineering Vision. In: **CO₂ Sequestration and Valorization**. [s.l.] InTech, 2014.

FABER, M. H.; STEWART, M. G. Risk assessment for civil engineering facilities: Critical overview and discussion. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 80, n. 2, p. 173–184, 2003.

FACTS. **Failure and Accidents Technical Information System Database**. Disponível em: <<http://www.factsonline.nl/>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

FANG, C. et al. An integrated framework for risk response planning under resource constraints in large engineering projects. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 60, n. 3, p. 627–639, 2013.

FROSDICK, S. The techniques of risk analysis are insufficient in themselves. v. 6, n. 3, p. 165–177, 1997.

GARCEZ, T.; DE ALMEIDA-FILHO, A.; DE ALMEIDA, A. Procedures for aggregating experts' knowledge and group decision model approaches. In: **Advances in Safety, Reliability and Risk Management**. [s.l.] CRC Press, 2011. p. 2176–2182.

GARCEZ, T. V. et al. **Multicriteria risk analysis application in a distribution gas pipeline system in Sergipe**. (Taylor & Francis Group, Ed.)European Safety and Reliability Conference. **Anais...Prague: Reliability, Risk, and Safety. Theory and Applications**, 2009

GARCEZ, T. V.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk assessment of underground electricity distribution systems based on MAUT. **Safety, Reliability and Risk Analysis: beyond the horizon**, London, v.1, cap. 240, 2014a.

GARCEZ, T. V.; DE ALMEIDA, A. T. A risk measurement tool for an underground electricity distribution system considering the consequences and uncertainties of manhole events. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 124, n. 0, p. 68–80, abr. 2014b.

GARCEZ, T. V.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional Risk Assessment of Manhole Events as a Decision Tool for Ranking the Vaults of an Underground Electricity Distribution System. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 2, p. 624–632, abr. 2014c.

GARCÍA-TRENCO, A. et al. PdIn intermetallic nanoparticles for the Hydrogenation of CO₂ to Methanol. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 220, p. 9–18, jan. 2018.

GEORGIADOU, P. S. et al. Multi-objective evolutionary emergency response optimization for major accidents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, n. 1–3, p. 792–803, 2010.

GHADGE, A. et al. A systems approach for modelling supply chain risks. **Supply Chain**

- Management: An International Journal**, v. 18, n. 5, p. 523–538, 29 jul. 2013.
- GLICKMAN, T. S. Program portfolio selection for reducing prioritized security risks. **European Journal of Operational Research**, v. 190, n. 1, p. 268–276, 2008.
- GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. **Tomada de decisão gerencial - Enfoque Multicritério**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- GONEN, A. Optimal risk response plan of project risk management. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, p. 969–973, 2011.
- GOOGLE IMAGENS. **Representação da molécula de metanol**. Disponível em: <https://www.google.com.br/search?q=formula+do+metanol&dcr=0&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjA-pzm4fPXAhVDHZAKHcgWASsQ_AUICigB&biw=1366&bih=662#imgsrc=GqWLVzdjuqYdNM:>>. Acesso em: 5 dez. 2017.
- GUIKEMA, S. D.; PATÉ-CORNELL, M. E. Component choice for managing risk in engineered systems with generalized risk/cost functions. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 78, n. 3, p. 227–238, 2002.
- GURJAR, B. R. et al. Individual and Societal Risk Assessment for a Petroleum Oil Storage Terminal. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 19, n. 4, p. 4015003, 2015.
- HAMPEL, J. Different concepts of risk - A challenge for risk communication. **International Journal of Medical Microbiology**, v. 296, n. SUPPL. 1, p. 5–10, 2006.
- HAUER, E. Traffic conflicts and exposure. **Accident Analysis & Prevention**, v. 14, n. 5, p. 359–364, out. 1982.
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. **The Control of Major Accident Hazards Regulations 2015**, 2015.
- HOSSEINNIA, B.; KHAKZAD, N.; RENIERS, G. Multi-plant emergency response for tackling major accidents in chemical industrial areas. **Safety Science**, v. 102, p. 275–289, 1 fev. 2018.
- HUANG, C. H.; TAN, C. S. A review: CO₂ utilization. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 14, n. 2, p. 480–499, 2014.
- HUANG, C.; HUANG, Y. An information diffusion technique to assess integrated hazard risks. **Environmental Research**, v. 161, n. October 2017, p. 104–113, 2018.
- IHS MARKIT. **Methanol Database**. Disponível em: <<http://www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/methanol.html>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

- INTERNATIONAL FEDERATION OF ACCOUNTANTS IFAC; IAASB. The Evolving Nature of Financial Reporting : Disclosure and Its Audit Implications. n. January, p. (FRC), F. R. C. (2011). Cutting Clutter. Writing., 2011.
- JADHAV, S. G. et al. Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 11, p. 2557–2567, 2014.
- KASAP, D.; KAYMAK, M. Risk Identification Step of the Project Risk Management. **PICMET 2007 Proceedings**, p. 5–9, 2007.
- KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decision with Multiples Objectives Preferences and value trade-offs**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1976.
- KHAKZAD, N.; KHAN, F.; AMYOTTE, P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 91, n. 1–2, p. 46–53, 2013.
- KHAN, F. et al. Dynamic risk management: a contemporary approach to process safety management. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 14, p. 9–17, 2016.
- KHAN, F. I.; ABBASI, S. . Reply to comments on “Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences”. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 14, n. 1, p. 85, 2001.
- KHAN, F.; RATHNAYAKA, S.; AHMED, S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 98, p. 116–147, 2015.
- KIRCHHOFF, D. **Avaliação de risco ambiental e o processo de licenciamento : o caso do gasoduto de distribuição gás brasileiro trecho São Carlos - Porto Ferreira**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2 jun. 2004.
- KOLOMIYETS, T. **Guideline on Risk Management**. Disponível em: <<https://statswiki.unece.org/display/GORM/4.+Risk+treatment>>. Acesso em: 26 nov. 2017.
- KULAY, L. A.; SUGAWARA, E. T.; SILVA, G. A. Life Cycle Inventory of Brazilian Methanol: a Contribution for the National Database. In: Life Cycle Assessment, 8., 2008, Seattle. **Anais...Seattle**. 2008
- LAWRENCE, J. A.; PASTERNAK, B. A. **Applied Management Science: Modeling, Spreadsheet Analysis, and Communication for Decision Making**. 2. ed. [s.l.] Wiley, 2002.
- LEE, K. et al. Improvements of safety management system in Korean chemical industry after a large chemical accident. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 42, p. 6–13, jul. 2016.
- LETTA, M. C. K. et al. Análise de Risco de Operações em Instalações especiais com Aplicação

- da Composição Probabilística de Preferências. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 48., 2016, Espírito Santo. **Anais...Espírito Santo: UFES** p. 1–12
- LI, Y. et al. Statistical analysis of sudden chemical leakage accidents reported in China between 2006 and 2011. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, n. 8, p. 5547–5553, 2014a.
- LI, Y.-N. et al. Homogeneous hydrogenation of carbon dioxide to methanol. **Catal. Sci. Technol.**, v. 4, n. 6, p. 1498–1512, 2014b.
- LINS, P. H. C.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 18, p. 13545–13554, 2012.
- MANCUSO, A. et al. Portfolio optimization of safety measures for reducing risks in nuclear systems. **Reliability Engineering & System Safety**, 2017.
- MANNAN, M. S. et al. The Evolution of Process Safety: Current Status and Future Direction. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v. 7, n. 1, p. 135–162, 2016.
- MAREȘ, R.; STELEA, M. P. The application of event tree analysis in a work accident at maintenance operations. **8th International Conference on Manufacturing Science and Education**, v. 121, p. 1–6, 2017.
- MARHAVILAS, P. K.; KOULOURIOTIS, D. E. A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: Application in an aluminum extrusion industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 21, n. 6, p. 596–603, nov. 2008.
- MATIAS, F. Nova tecnologia pode viabilizar a retomada da produção de metanol no Brasil. **TN Petroléo**, 2017.
- MEDEIROS, C. P.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Hydrogen pipelines: Enhancing information visualization and statistical tests for global sensitivity analysis when evaluating multidimensional risks to support decision-making. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 47, p. 22192–22205, 2016.
- MEDINA-HERRERA, N.; JIMÉNEZ-GUTIÉRREZ, A.; GROSSMANN, I. E. A mathematical programming model for optimal layout considering quantitative risk analysis. **Computers and Chemical Engineering**, v. 68, p. 165–181, 2014.
- MELCHERS, R. . On the ALARP approach to risk management. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 71, n. 2, p. 201–208, 2001.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**: Third, Revised and Extended Edition. Springer, 1996.
- MIGUEL, P. A. C; FLEURY, A; MELLO, C. H. P; NAKANO, D. N; LIMA, E. P DE;

- TURRIONI, J. B; HO, L. L. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevie, 2012.
- MOURA, L. A. A. **Qualidade e gestão ambiental**. São Paulo: Editora Juarez de Oliveira, 2000.
- NATIONAL DISASTER MANAGMENT AUTHORITY. **National Disaster Management Guidelines (Draft) -Community Based Disaster Management**, 2014.
- NOLAN, D. P. Specialized Reviews—Bow-Tie Analysis, Layers of Protection Analysis, and Safety Integrity Levels. **Safety and Security Review for the Process Industries**, p. 17–23, 2012.
- OHSAS - OCCUPATION HEALTH AND SAFETY ADMINISTRATION STANDARD 18001. **Sistemas de gestão da saúde e segurança ocupacional**, 2007.
- OLAH, G. A. et al. Bi-reforming of Methane from Any Source with Steam and Carbon Dioxide Exclusively to Metgas ($\text{CO}-2\text{H}_2$) for Methanol and Hydrocarbon Synthesis. **Journal of the American Chemical Society**, v. 135, n. 2, p. 648–650, 16 jan. 2013.
- OLECHOWSKI, A. et al. The professionalization of risk management: What role can the ISO 31000 risk management principles play? **International Journal of Project Management**, v. 34, n. 8, p. 1568–1578, nov. 2016.
- ÖZFIRAT, M. K. et al. Integration of risk matrix and event tree analysis: a natural stone plant case. **Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences**, p. 1–9, 2017.
- PAPADAKIS, G. A. Major hazard pipelines: A comparative study of onshore transmission accidents. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 12, n. 1, p. 91–107, 1999.
- PIANOSI, F. et al. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. **Environmental Modelling and Software**, v. 79, p. 214–232, 2016.
- POROSOFF, M. D.; YAN, B.; CHEN, J. G. Catalytic reduction of CO_2 by H_2 for synthesis of CO, methanol and hydrocarbons: challenges and opportunities. **Energy Environ. Sci.**, v. 9, n. 1, p. 62–73, 2016.
- QINQIN, C. et al. Environmental risk source management system for the petrochemical industry. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 92, n. 3, p. 251–260, 2014.
- RAMOS, D.; AREZES, P.; AFONSO, P. Cost-benefit analysis in occupational health and safety: A proposal model. In: International Probabilistic Safety Assessment and Management, 11., 2012, Finland. **Anais...Finland: ESREL**, 2012
- RAZ, T.; BEN-DAVID, I. An integrated approach for risk response development in project planning. **Journal of Operational Research Society**, v. 52, n. 1, p. 14–25, 2001.
- RENN, O. Risk Governance: Coping with uncertainty in a complex world. In: **Risk Governance**. [s.l.] Routledge, 2008.

- RUPPENTHAL, J. E. **Gerenciamento de Riscos**. Santa Maria: UFSM, 2013
- SALES, J. et al. Study of Major Accidents Involving Chemical Reactive Substances. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 85, p. 117–124, 2007.
- SATO, Y. Optimal budget planning for investment in safety measures of a chemical company. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 2, p. 579–585, 2012.
- SHELDON, D. Methanol Production – A Technical History. **Johnson Matthey Technology Review**, v. 61, n. 3, p. 172–182, 2017.
- SHERALI, H. D.; ALAMEDDINE, A.; GLICKMAN, T. S. Biconvex Models and Algorithms for Risk Management Problems. **American Journal of Mathematical and Management Sciences**, v. 14, n. 3–4, p. 197–228, 1994.
- SHERIQUE, J. **Aprenda como fazer: Perfil Profissiográfico Previdenciário — PPP, Riscos Ambientais do Trabalho — RAT/FAP (novo), PPRA/NR-9, PPRA-DA(INSS), PPRA/ NR-32, PCMAT, PGR, LTCAT, laudos técnicos, Custeio da Aposentadoria Especial, GFIP**. 8. ed. [s.l: s.n.].
- SKLAVOUNOS, S.; RIGAS, F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 19, n. 1, p. 24–31, 2006.
- SOUZA, F. M. C. **Decisões Racionais em situações de incerteza**. 2. ed. Recife: Livro Rapido, 2007.
- SOUZA, F. H. DE; BARCAUI, A. Gerenciamento de Riscos Aplicado à Contratação de Serviços em Projetos de Manutenção na Indústria Petroquímica. **Sistemas & Gestão**, v. 9, n. 1, p. 142–154, 2014.
- SRA. **Glossary society for risk analysis**. Disponível em: <<http://sra.org/resources>>. Acesso em: 7 ago. 2017a.
- SRA. **Risk Analysis Foundations**. Disponível em: <<http://www.sra.org/resources>>. Acesso em: 7 ago. 2017b.
- STEDILE, M. Gerenciamento de risco para indústria química de médio porte. **Revista Oswaldo Cruz**, p. 14, 2014.
- STERNBERG, A.; JENS, C. M.; BARDOW, A. Life cycle assessment of CO₂-based C1-chemicals. **Green Chem.**, v. 19, n. 9, p. 2244–2259, 2017.
- TESFAMARIAM, S.; SADIQ, R.; NAJJARAN, H. Decision making under uncertainty - An example for seismic risk management. **Risk Analysis**, v. 30, n. 1, p. 78–94, 2010.
- TOPPILA, A.; SALO, A. Selection of risk reduction portfolios under interval-valued probabilities. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 163, p. 69–78, 2017.
- TREINTA, F. T; LIMA, G. B. A; LIMA, A. J. Q; FERREIRA, R. O. Contribuição do “círculo

de stakeholders” na etapa de comunicação e consulta da ISO 31000 em uma empresa do setor de energia. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 33., 2013, Salvador. **Anais...**Salvador: ABEPRO, 2013.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção: Estratégias, Métodos e Técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. **Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI**, p. 191, 2012.

TURSUNOV, O.; KUSTOV, L.; KUSTOV, A. A Brief Review of Carbon Dioxide Hydrogenation to Methanol Over Copper and Iron Based Catalysts. **Oil & Gas Sciences and Technology – Revue d’IFP Energies nouvelles**, v. 72, n. 5, p. 30, 20 set. 2017.

VALDES, M. E. **Adapting failure mode and effects analysis (FMEA) to select hazard mitigation measures**. 2012 Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC). **Anais...**IEEE, set. 2012Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6549659/>>

VAN DER VOORT, M. M. et al. A quantitative risk assessment tool for the external safety of industrial plants with a dust explosion hazard. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 20, n. 4–6, p. 375–386, jul. 2007.

VEYRET, Y. **Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente**. São Paulo: Contexto, 2015.

VIANA, M. G. P.; ALVES, C. S.; JERÔNIMO, C. E. D. M. Análise Preliminar De Riscos Ambientais Na Atividade De Acabamento E Revestimento Externo De Um Edifício. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 3, p. 3289–3298, 2014.

VILEINISKIS, M.; REMENYTE-PRESCOTT, R. Quantitative risk prognostics framework based on Petri Net and Bow-Tie models. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 165, n. March, p. 62–73, 2017.

VILLA, V. et al. Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry. **Safety Science**, v. 89, p. 77–93, 2016.

WANG, T.-R.; PEDRONI, N.; ZIO, E. Identification of protective actions to reduce the vulnerability of safety-critical systems to malevolent acts: A sensitivity-based decision-making approach. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 147, p. 9–18, 2016a.

WANG, T. R.; PEDRONI, N.; ZIO, E. Identification of protective actions to reduce the vulnerability of safety-critical systems to malevolent acts: A sensitivity-based decision-making approach. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 147, p. 9–18, 2016b.

WIESBERG, I. L. et al. Carbon dioxide management by chemical conversion to methanol: HYDROGENATION and BI-REFORMING. **Energy Conversion and Management**, v. 125, p. 320–335, 2016.

- YANEIRA, E. S.; KUMAR, I. C.; J, G. Bow-Tie Diagrams in Research of Visualization Intelligent Decision Support System for Drilling Risk Control. **Process Safety Progress**, v. 25, n. 4, p. 326–330, 2013.
- YANG, J. et al. A survey on hazardous materials accidents during road transport in China from 2000 to 2008. **Journal of Hazardous Materials**, v. 184, n. 1–3, p. 647–653, dez. 2010.
- YOON, H. et al. Integration of qualitative and quantitative risk assessment methods for gas refinery plants. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 30, n. 7, p. 1368–1374, 23 jul. 2013.
- YUAN, Z. et al. Risk-based optimal safety measure allocation for dust explosions. **Safety Science**, v. 74, p. 79–92, 2015.
- YUHUA, D.; DATAO, Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 18, n. 2, p. 83–88, 2005.
- ZHANG, Y.; FAN, Z.-P. An optimization method for selecting project risk response strategies. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 3, p. 412–422, 2014.

APÊNDICE A – PREMISSAS E TELAS DO SOFTWARE

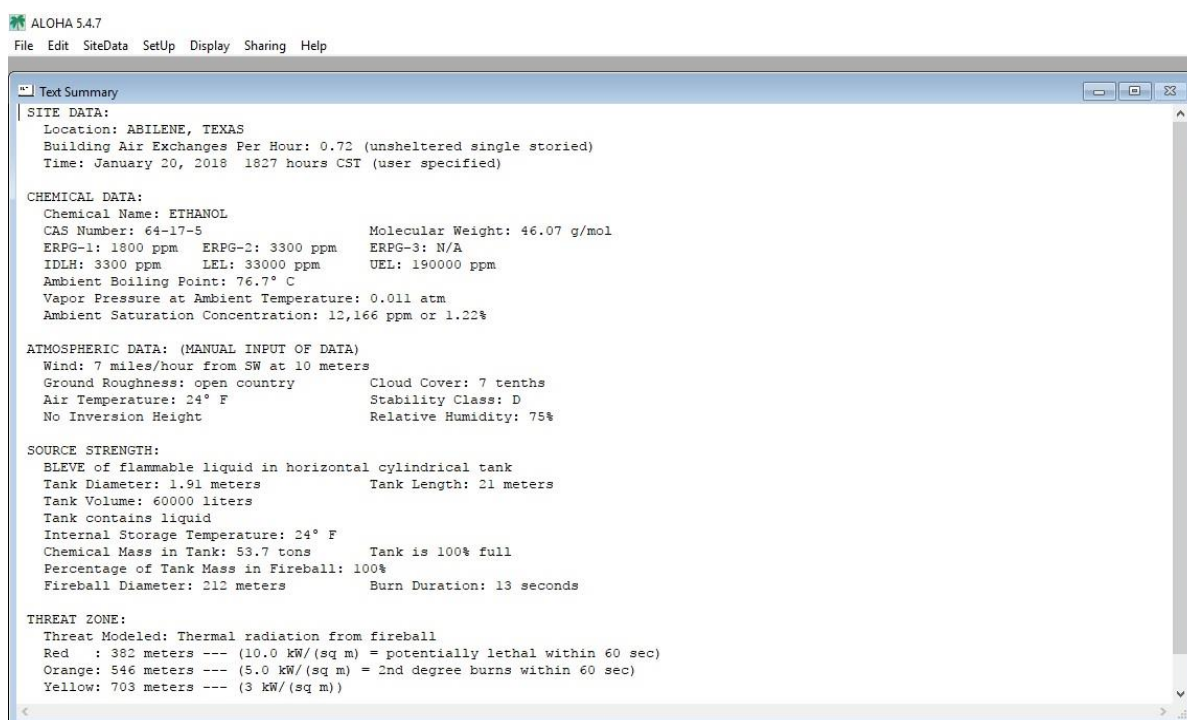
Este apêndice apresenta uma tabela com as premissas e algumas telas referentes ao software ALOHA utilizados na aplicação numérica do modelo de análise de risco

Tabela 20 – Premissas individuais para cálculo das zonas de perigo

Subárea	Origem da liberação	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Volume (m ³)	Abertura (cm)
Aestac	Tanque	1,91	21	60	8
EstocEtan	Tanque	6,03	7	200	8
AlEtan	Compressor	0,54	2	0,45	8
SepEtan	Vaso	1,60	5	10	8
ProdMetan	Torre	0,92	12	8	8
EstocMetan	Tanque	4,12	15	200	8
RecircEtan	Bomba	0,92	12	8	8
ReatMetan	Reator	0,56	4	1	8

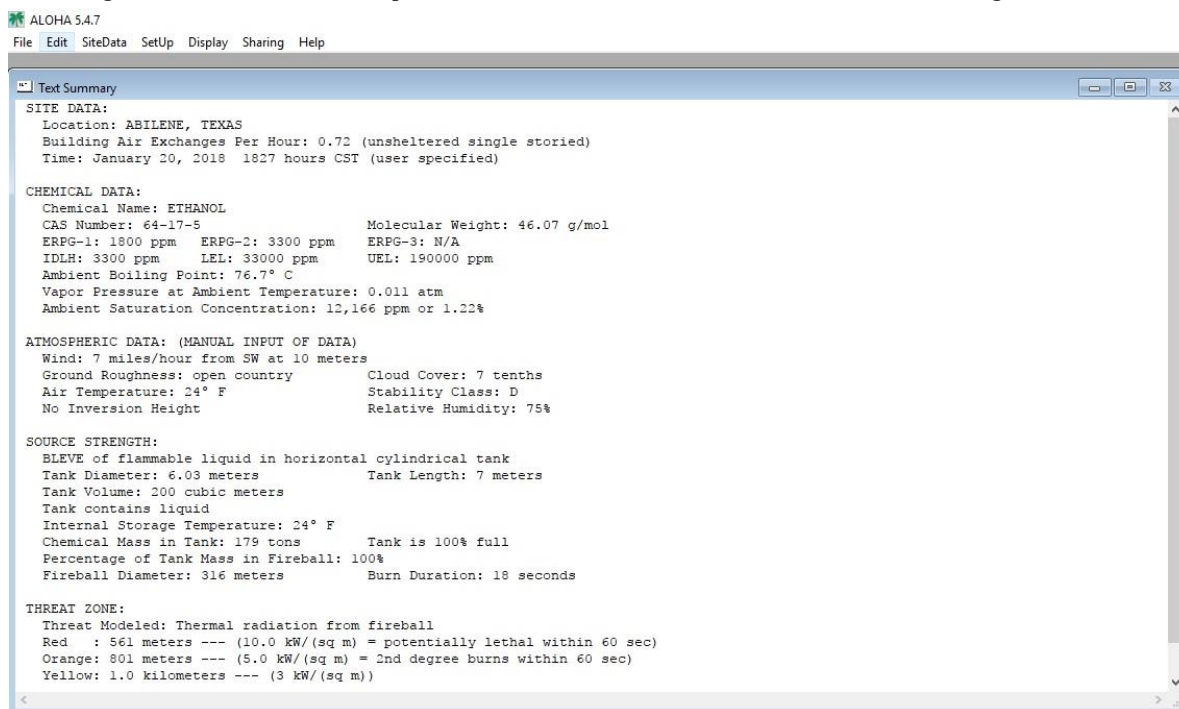
Fonte: O Autor (2018)

Figura 15 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Estacionamento de Carretas



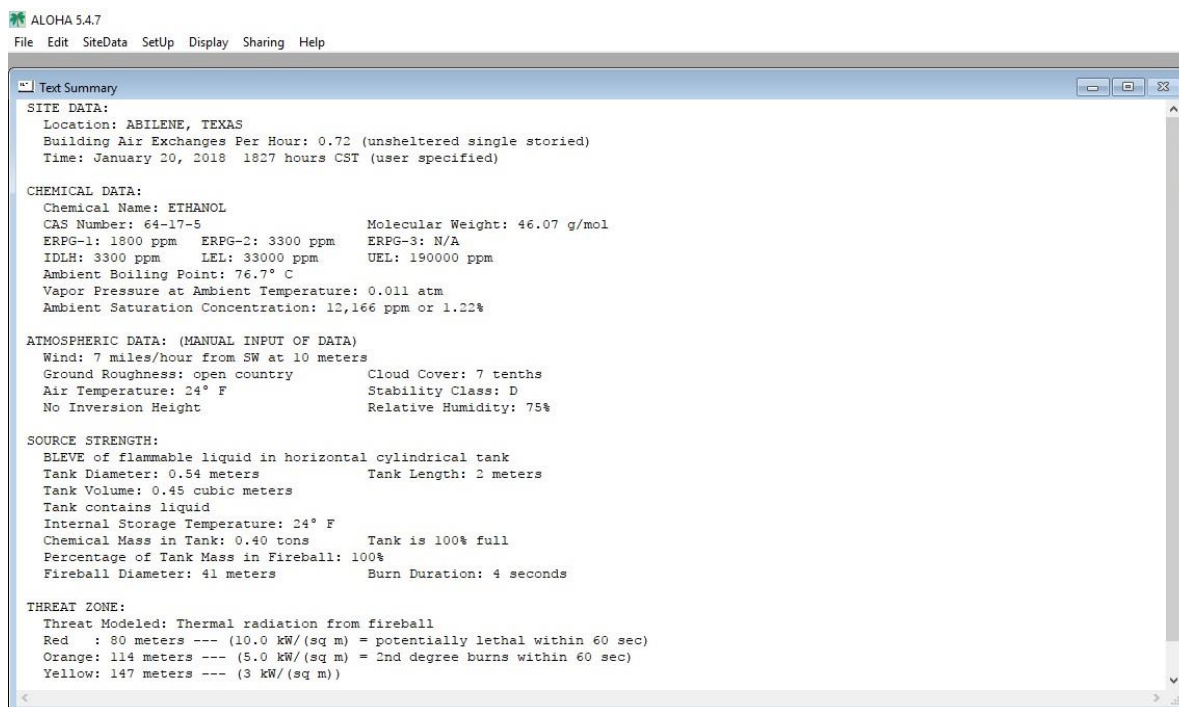
Fonte: O Autor (2018)

Figura 16 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Estocagem de Etanol



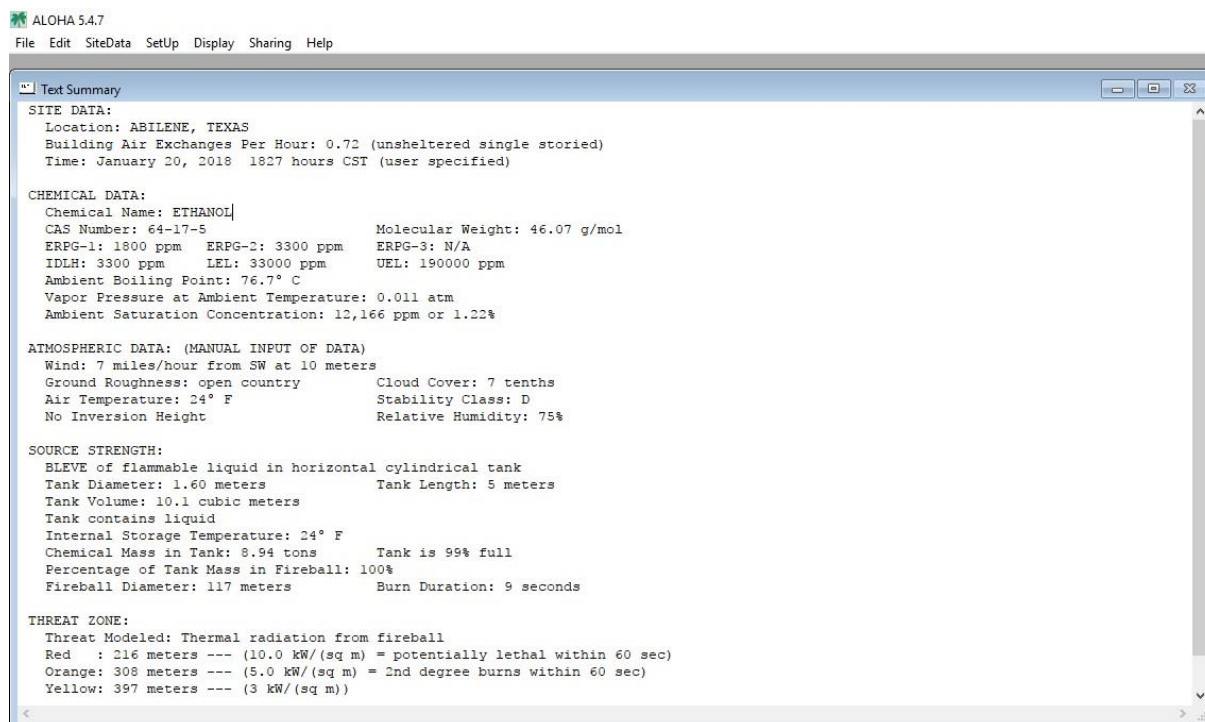
Fonte: O Autor (2018)

Figura 17 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Alimentação de Etanol



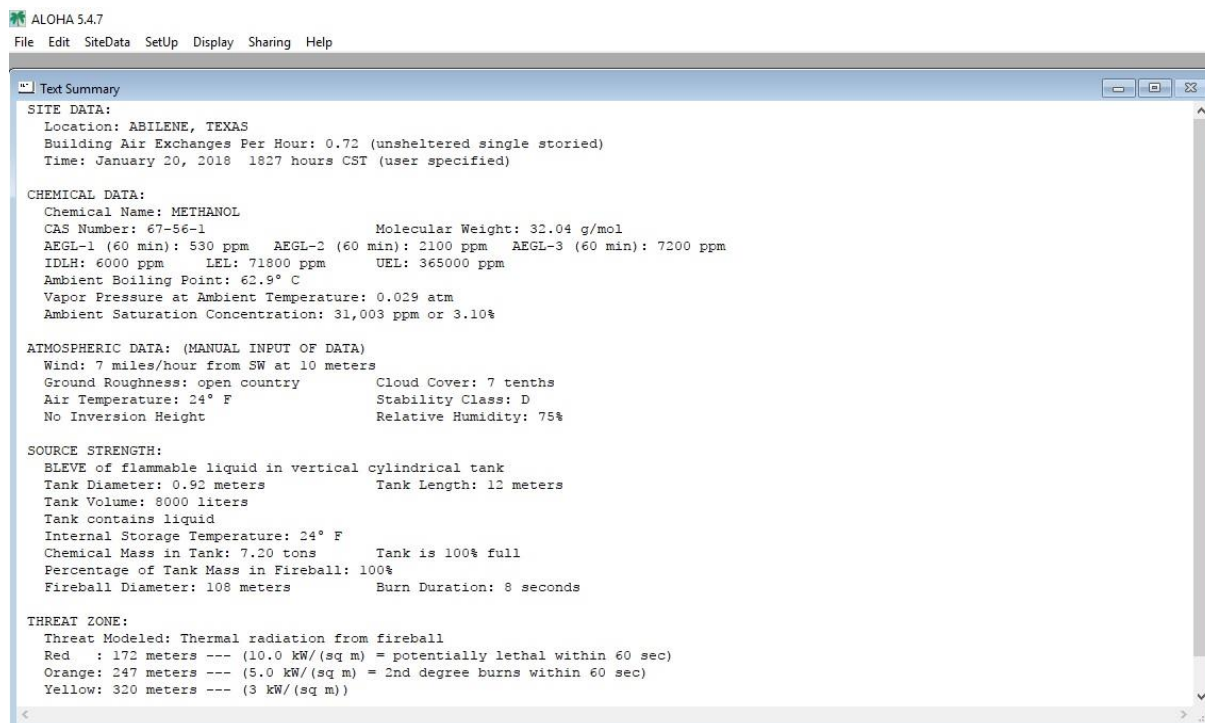
Fonte: O Autor (2018)

Figura 18 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Separação de Etanol



Fonte: O Autor (2018)

Figura 19 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Produção de Metanol



Fonte: O Autor (2018)

Figura 20 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Estocagem de Metanol

ALOHA 5.4.7
File Edit SiteData SetUp Display Sharing Help

Text Summary

SITE DATA:
Location: ABILENE, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 0.72 (unsheltered single storied)
Time: January 20, 2018 1827 hours CST (user specified)

CHEMICAL DATA:
Chemical Name: METHANOL
CAS Number: 67-56-1 Molecular Weight: 32.04 g/mol
AEGL-1 (60 min): 530 ppm AEGL-2 (60 min): 2100 ppm AEGL-3 (60 min): 7200 ppm
IDLH: 6000 ppm LEL: 71800 ppm UEL: 365000 ppm
Ambient Boiling Point: 62.9° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: 0.029 atm
Ambient Saturation Concentration: 31,003 ppm or 3.10%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Wind: 7 miles/hour from SW at 10 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 7 tenths
Air Temperature: 24° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
BLEVE of flammable liquid in vertical cylindrical tank
Tank Diameter: 4.12 meters Tank Length: 15 meters
Tank Volume: 200000 liters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: 24° F
Chemical Mass in Tank: 180 tons Tank is 100% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 317 meters Burn Duration: 18 seconds

THREAT ZONE:
Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 479 meters --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 690 meters --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 893 meters --- (3 kW/(sq m))

Fonte: O Autor (2018)

Figura 21 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Recirculação de Etanol

ALOHA 5.4.7
File Edit SiteData SetUp Display Sharing Help

Text Summary

SITE DATA:
Location: ABILENE, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 0.72 (unsheltered single storied)
Time: January 20, 2018 1827 hours CST (user specified)

CHEMICAL DATA:
Chemical Name: ETHANOL
CAS Number: 64-17-5 Molecular Weight: 46.07 g/mol
ERPG-1: 1800 ppm ERPG-2: 3300 ppm ERPG-3: N/A
IDLH: 3300 ppm LEL: 33000 ppm UEL: 190000 ppm
Ambient Boiling Point: 76.7° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: 0.011 atm
Ambient Saturation Concentration: 12,166 ppm or 1.22%

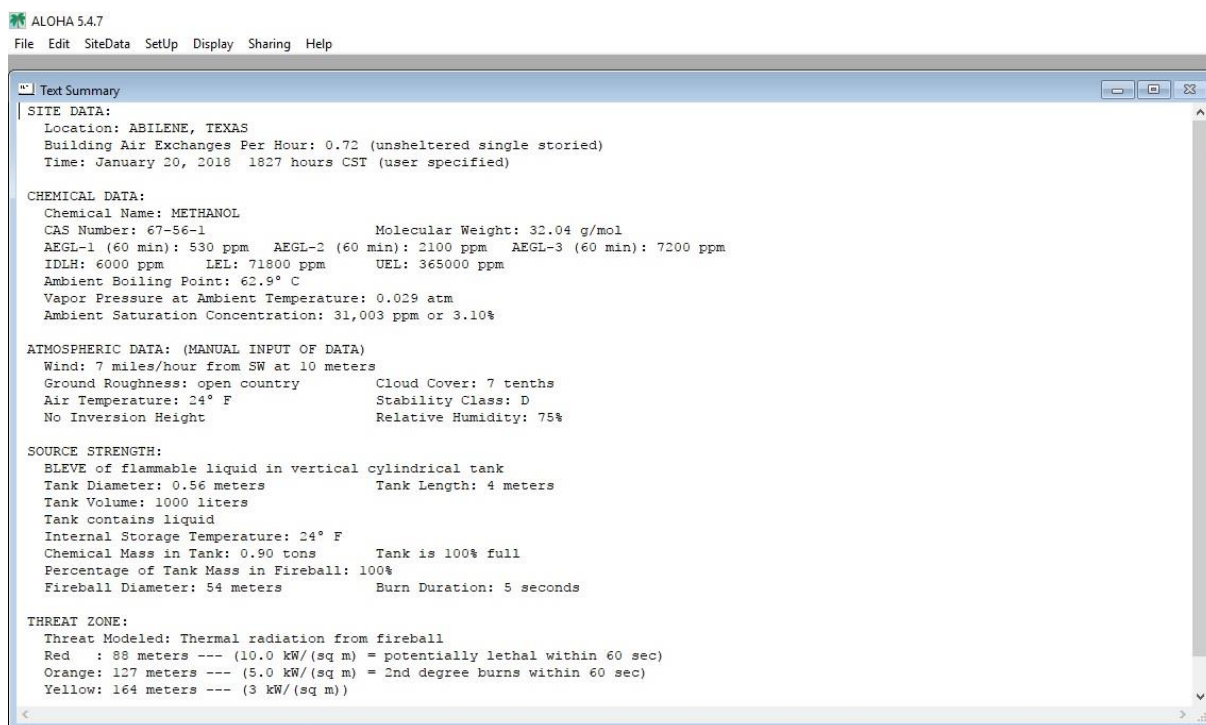
ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Wind: 7 miles/hour from SW at 10 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 7 tenths
Air Temperature: 24° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
BLEVE of flammable liquid in vertical cylindrical tank
Tank Diameter: 0.92 meters Tank Length: 12 meters
Tank Volume: 8000 liters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: 24° F
Chemical Mass in Tank: 7.15 tons Tank is 100% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 108 meters Burn Duration: 8 seconds

THREAT ZONE:
Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 201 meters --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 287 meters --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 369 meters --- (3 kW/(sq m))

Fonte: O Autor (2018)

Figura 22 – Tela do ALOHA para cálculo da zona de risco crítico da subárea Reator de Metanol



Fonte: O Autor (2018)

APÊNDICE B – DADOS DA APLICAÇÃO

Este apêndice é composto das tabelas com os dados demográficos e matrizes de consequência e função consequência de cada subárea da planta de produção de metanol utilizados na estimação do risco multidimensional.

Tabela 21 – Densidade demográfica dos arredores da planta de produção de metanol

Local	Nº Médio de Pessoas	m²	Nº Médio de Pessoas/m²
I1	500	21551,8304	0,023199886
I2	275	21124,069	0,013018325
I3	80	10751,31546	0,00744095
I4	150	7542,963961	0,019886082
C1	5000	30171,85585	0,16571735
C2	3000	10751,31546	0,279035622
A1	10	28952,9179	0,000345388
PM	150	11309,73355	0,013262912
R1	30	600m	0,05

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 22 – Matriz de consequência humana

Subárea	IncêndPoça	BLEVE	FlashFire	Vazamento
Aestac	57	1920	27	25
EstocEtan	189	6110	202	86
AlEtan	14	105	7	6
SepEtan	33	420	18	6
ProdMetan	24	280	16	16
EstocMetan	159	5259	188	118
RecircEtan	29	350	21	13
ReatMetan	13	118	7	9

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 23 – Matriz de consequência ambiental

Subárea	IncêndPoça	BLEVE	FlashFire	Vazamento
Aestac	0	0	0	254,4690049
EstocEtan	0	0	0	615,7521601
AlEtan	0	0	0	201,0619298
SepEtan	0	0	0	113,0973355
ProdMetan	0	0	0	1017,87602
EstocMetan	0	0	0	1256,637061
RecircEtan	0	0	0	615,7521601
ReatMetan	0	0	0	452,3893421

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 24 – Matriz de consequência financeira

Subárea	IncêndPoça	BLEVE	FlashFire	Vazamento
ρ	1,5	1,5	1,2	1
Aestac	R\$ 2.078,16	R\$ 2.328.905,05	R\$ 376,99	R\$ 254,47
EstocEtan	R\$ 4.528,61	R\$ 4.712.388,98	R\$ 4.105,43	R\$ 615,75
AlEtan	R\$ 1.701,17	R\$ 101.830,01	R\$ 376,99	R\$ 201,06
SepEtan	R\$ 4.528,61	R\$ 742.714,91	R\$ 1.089,50	R\$ 113,10
ProdMetan	R\$ 3.435,33	R\$ 482.548,63	R\$ 1.221,45	R\$ 1.017,88
EstocMetan	R\$ 3.435,33	R\$ 3.757.889,88	R\$ 3.860,39	R\$ 1.256,64
RecircEtan	R\$ 4.528,61	R\$ 641.643,60	R\$ 1.824,64	R\$ 615,75
ReatMetan	R\$ 1.526,81	R\$ 126.744,41	R\$ 376,99	R\$ 452,39

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 25 – Função Consequência Humana

Subárea	IncêndPoça	BLEVE	FlashFire	Vazamento
Aestac	0,75	0,25	0,25	0,75
EstocEtan	1,00	1,00	1,00	0,50
AlEtan	1,00	1,00	1,00	0,50
SepEtan	1,00	1,00	1,00	0,50
ProdMetan	1,00	1,00	1,00	0,75
EstocMetan	1,00	1,00	1,00	0,75
RecircEtan	1,00	1,00	1,00	0,50
ReatMetan	1,00	1,00	1,00	0,50

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 26 – Função Consequência Ambiental

Subárea	IncêndPoça	BLEVE	FlashFire	Vazamento
Aestac	0,25	0,25	0,25	0,25
EstocEtan	0,25	0,25	0,25	0,50
AlEtan	0,25	0,25	0,25	0,50
SepEtan	0,25	0,25	0,25	0,50
ProdMetan	0,25	0,25	0,25	0,50
EstocMetan	0,25	0,25	0,25	0,50
RecircEtan	0,25	0,25	0,25	0,50
ReatMetan	0,25	0,25	0,25	0,50

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 27 – Função Consequência Financeira

Subárea	IncêndPoça	BLEVE	FlashFire	Vazamento
Aestac	0,25	0,25	0,25	0,25
EstocEtan	0,75	0,75	0,75	0,25
AlEtan	0,75	0,75	0,75	0,25
SepEtan	0,75	0,75	0,75	0,25
ProdMetan	0,75	0,75	0,75	0,25
EstocMetan	0,75	0,75	0,75	0,25
RecircEtan	0,75	0,75	0,75	0,25
ReatMetan	0,75	0,75	0,75	0,25

Fonte: O Autor (2018)

APÊNDICE C – DADOS DE EFETIVIDADE DAS AÇÕES

Este apêndice é composto das tabelas com os dados referentes as efetividades de cada ação a em cada parâmetro modificado, para estimação dos novos riscos multidimensionais.

Tabela 28 – Reduções no parâmetro de probabilidade de ocorrência ($\pi_s(\theta_{jk})$)

Ações	Incêndio em Poça	BLEVE	Flash Fire	Vazamento
1	-63%	0%	0%	-13%
2	-30%	0%	-92%	-11%
3	-94%	-28%	0%	0%
4	0%	0%	0%	-95%
5	-35%	-32%	0%	0%
6	-57%	0%	0%	-63%
7	-26%	-80%	-77%	-68%
8	-61%	-41%	-85%	-12%
9	-2%	-90%	-95%	0%
10	-30%	0%	0%	0%
11	-66%	0%	-45%	0%
12	-41%	-23%	-85%	-24%
13	-83%	-37%	-26%	-70%
14	-40%	0%	-65%	0%
15	-25%	0%	0%	0%
16	0%	-87%	0%	-12%
17	0%	-45%	-78%	0%
18	-41%	-69%	0%	0%
19	0%	0%	-89%	0%
20	0%	0%	0%	-82%
21	0%	0%	-38%	-82%
22	0%	-49%	0%	-82%
23	0%	0%	0%	-82%
24	0%	0%	0%	-82%

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 29 – Reduções no parâmetro do payoff humano (c_h)

Ações	Incêndio em Poça	BLEVE	Flash Fire	Vazamento
1	-31%	0%	-97%	0%
2	0%	-95%	0%	0%
3	0%	0%	-37%	0%
4	0%	0%	0%	0%
5	-43%	0%	-60%	0%
6	-44%	-29%	0%	0%
7	-83%	-55%	-98%	0%
8	-37%	-47%	-99%	-60%
9	-68%	0%	-99%	-38%

10	-11%	-15%	-56%	-62%
11	-39%	0%	-3%	-77%
12	-93%	-40%	-56%	-42%
13	0%	-100%	-41%	0%
14	-74%	-62%	-49%	0%
15	0%	0%	-87%	-45%
16	-22%	-87%	-77%	0%
17	-42%	-56%	0%	0%
18	0%	0%	-91%	-31%
19	-84%	-24%	-58%	0%
20	0%	-12%	0%	0%
21	-19%	-59%	-35%	-33%
22	0%	-21%	0%	-57%
23	0%	0%	-53%	0%
24	0%	0%	-46%	0%

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 30 – Reduções no parâmetro do payoff ambiental (c_a)

Ações	Incêndio em Poça	BLEVE	Flash Fire	Vazamento
1	-89%	0%	0%	-40%
2	-24%	0%	-29%	0%
3	-76%	-98%	-14%	0%
4	-22%	-77%	0%	0%
5	0%	-3%	0%	0%
6	0%	-52%	-88%	0%
7	0%	0%	0%	-21%
8	-14%	0%	0%	0%
9	0%	0%	-89%	-64%
10	-58%	-1%	0%	0%
11	0%	-39%	0%	-47%
12	-32%	0%	0%	-36%
13	0%	-5%	-39%	0%
14	-87%	-56%	0%	0%
15	0%	-74%	-97%	0%
16	0%	-98%	-43%	0%
17	0%	-66%	-59%	0%
18	-58%	-97%	-19%	-66%
19	-76%	-9%	-29%	0%
20	0%	-28%	-73%	-91%
21	0%	0%	0%	0%
22	0%	0%	0%	0%
23	0%	0%	0%	0%
24	0%	0%	-23%	-18%

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 31 – Reduções no parâmetro do payoff financeiro (c_f)

Ações	Incêndio em Poça	BLEVE	Flash Fire	Vazamento
1	0%	-97%	0%	-23%
2	-26%	-91%	-83%	0%
3	-15%	0%	-15%	0%
4	-78%	-20%	0%	-99%
5	-5%	0%	-18%	0%
6	0%	-10%	0%	0%
7	0%	0%	0%	0%
8	-61%	0%	0%	-40%
9	-91%	-39%	0%	0%
10	0%	-25%	-70%	0%
11	-47%	-49%	0%	-43%
12	-100%	-56%	-44%	-16%
13	0%	-54%	-70%	-89%
14	-97%	-100%	0%	-32%
15	0%	-12%	-53%	-49%
16	-20%	0%	-93%	0%
17	0%	-21%	-64%	0%
18	0%	0%	-74%	-4%
19	0%	0%	0%	-5%
20	0%	0%	0%	-49%
21	-72%	-11%	0%	0%
22	0%	0%	0%	-68%
23	0%	0%	0%	0%
24	-67%	-49%	-98%	0%

Fonte: O Autor (2018)