OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE RESPOSTA NO GERENCIAMENTO DE RISCO MULTIDIMENSIONAL: APLICAÇÃO NUMÉRICA EM UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE METANOL

Pablo Ramom Matias Andrade
Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste – CAA. Caruaru, PE – Brasil.
andrade.prm@gmail.com

Thalles Vitelli Garcez
Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste – CAA. Caruaru, PE – Brasil.
tvgarcez@gmail.com

RESUMO

Os processos da indústria química são complexos e de alto risco, expondo tanto as empresas como a sociedade a diversos tipos de riscos, que podem impactar múltiplas dimensões de consequências. Uma maneira de prevenir e/ou mitigar esses riscos é através da implementação de práticas de gerenciamento de risco eficientes. Nesse tipo de gerenciamento, um dos grandes desafios enfrentados pelos gestores é o de encontrar um conjunto de ações que pode reduzir e/ou mitigar os riscos críticos, dado que os recursos organizacionais disponíveis são limitados e escassos. Neste sentido, este artigo tem como objetivo propor um modelo de apoio à decisão para otimizar os planos de respostas ao risco multidimensional na indústria química. Através de uma aplicação numérica em uma planta hipotética de produção de metanol, o modelo proposto foi testado. Os resultados obtidos comprovaram a aplicabilidade do modelo na otimização de planos de resposta considerando as prioridades de risco estabelecidas pelo decisor.

PALAVRAS CHAVE. Gerenciamento de Risco, Plano de resposta, Risco Multidimensional, Otimização, MAUT.
Tópicos. ADM – Apoio à Decisão Multicritério

ABSTRACT

The chemical industry processes are complex and high risk, exposing both companies and society to various types of risks, which can impact multiple dimensions of consequences. One way to prevent and / or mitigate these risks is through the implementation of effective risk management practices. In this type of management, one of the major challenges faced by managers is to find a set of actions that can reduce and / or mitigate critical risks, since the available organizational resources are limited and scarce. In this sense, this article aims to propose a decision support model to optimize multidimensional risk response plans in the chemical industry. Through a numerical application in a hypothetical methanol production plant, the proposed model was tested. The results obtained proved the applicability of the model in the optimization of response plans considering the risk priorities established by the decision maker.

KEYWORDS. Risk Management, Risk Treatment, Multidimensional Risk, Optimization, MAUT.
Paper topics. ADM - Multicriteria Decision Support.

https://proceedings.science/p/85317?lang=pt-br

1. Introdução

A indústria química é um dos setores mais diversificados, que cobrem mais de 7 mil produtos comerciais, envolvendo produtos químicos básicos e seus produtos intermediários, petroquímicos, fertilizantes, etc. [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.

Desta maneira, Lee et al. [2016] afirmam que os acidentes na indústria química 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. Portanto, para se ter um gerenciamento de risco mais abrangente e eficiente, a visão de risco multidimensional é requerida [de Almeida et al. 2015].

Dentro dessa perspectiva, uma maneira de prevenir e/ou mitigar esses impactos humanos, financeiros, ambientais, operacionais e outros 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/externos que mitigam, evitam ou transferem riscos.

Dentre as etapas do processo de gerenciamento de risco, o tratamento de risco é considerado uma fase principal e merece um estudo detalhado [Raz e Ben-David 2001]. 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].

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 esse desafio, métodos analíticos confiáveis podem ajudar os tomadores de decisão a planejar ações de resposta ao risco que otimizam os recursos.

Porém, dentro do contexto de indústria química, a maioria dos estudos relacionados ao plano de resposta nesses processos não tratam os riscos em múltiplas dimensões de consequência. Além disso, os métodos analíticos propostos na literatura não tratam as preferências dos tomadores de decisão, sendo um fator limitante para essas abordagens.

Neste sentido, este artigo propõe um modelo de otimização de planos de resposta ao risco multidimensional posto à 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.). Além disso, o modelo proposto incorpora as preferências do tomador de decisão através da teoria da utilidade multiatributo. 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.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Processos de tratamento de risco na indústria química

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]. Segundo a OHSAS 18001 [2007], as medidas de controle giram em torno de: eliminação, que modifica o projeto para eliminar o perigo; redução ou substituição, que substitui um material perigoso por um menos perigoso ou redução da energia do sistema (ex.: diminua a tensão elétrica, a amperagem, a pressão, a temperatura, etc.); equipamentos de proteção coletiva (EPC), tais como, a instalação de sistemas de ventilação, proteção na máquina, bloqueios, redutores de ruído, etc.

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].

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. 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].

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, essas decisões de seleção 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.

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. A principal problemática 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 método utilizado para encontrar a solução emprega um modelo de otimização lexicográfica, onde resolve uma série de problemas de programação linear inteira que correspondem aos diferentes níveis de prioridade.

Georgiadou et al. [2010] apresentam um modelo de otimização de respostas ao risco em situações de emergência em torno de plantas químicas que processam substancias 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.

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 genético (GA) e algoritmo *greedy* SFS foram usados como uma ferramenta para escolher ações de resposta e alocar reservas orçamentárias.

Em estudo mais recente, 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.

É importante notar que os estudos citados acima e a maioria dos modelos de otimização de resposta ao risco analisam os riscos sob a ótima 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 aos 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.

3. Modelo proposto

O modelo proposto neste artigo é uma extensão do modelo de avaliação multidimensional de risco proposto por Brito e de Almeida [2009]. Numa visão ampla de gerenciamento de risco, especificamente, o modelo proposto de Brito e de Almeida [2009] contempla desde a etapa de identificação até de avaliação de risco, conforme mostrado pela Figura 1.

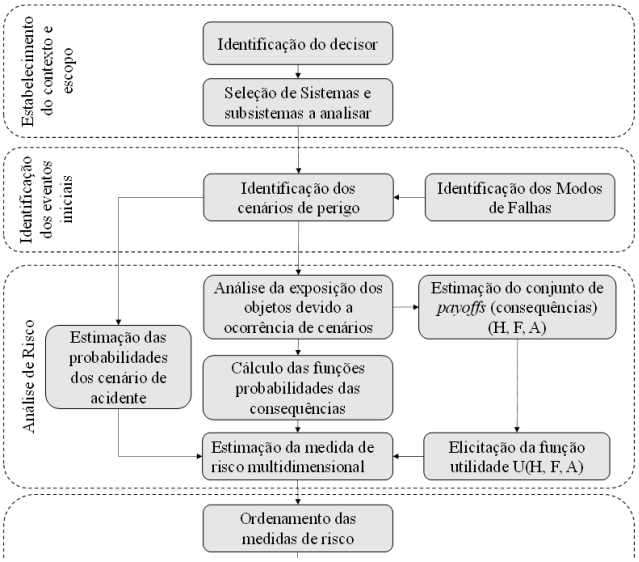


Figura 1. Modelo de avaliação de risco multidimensional proposto por Brito & de Almeida [2009]

Complementarmente, este artigo propõe uma extensão que relacionada a etapa de tratamento de risco, na qual trata de um modelo de otimização para a seleção das ações de resposta, conforme apresentado na Figura 2.

O primeiro passo é caracterizado pelo desenvolvimento do framework do modelo de decisão para avaliação e ordenamento dos riscos multidimensionais, apoiado pela teoria da utilidade multiatributo (MAUT). Nesta etapa tem-se como resultado uma hierarquia dos diversos riscos multidimensionais analisados $\left(r(s^x)\right)$, com seus respectivos níveis de prioridade x estabelecido pelo ranking decrescente de risco.

O segundo passo está dividido em três etapas, conforme mostrada na Figura 1, 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. 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 $\left(\pi_s(\theta_{jk})\right)$ 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).

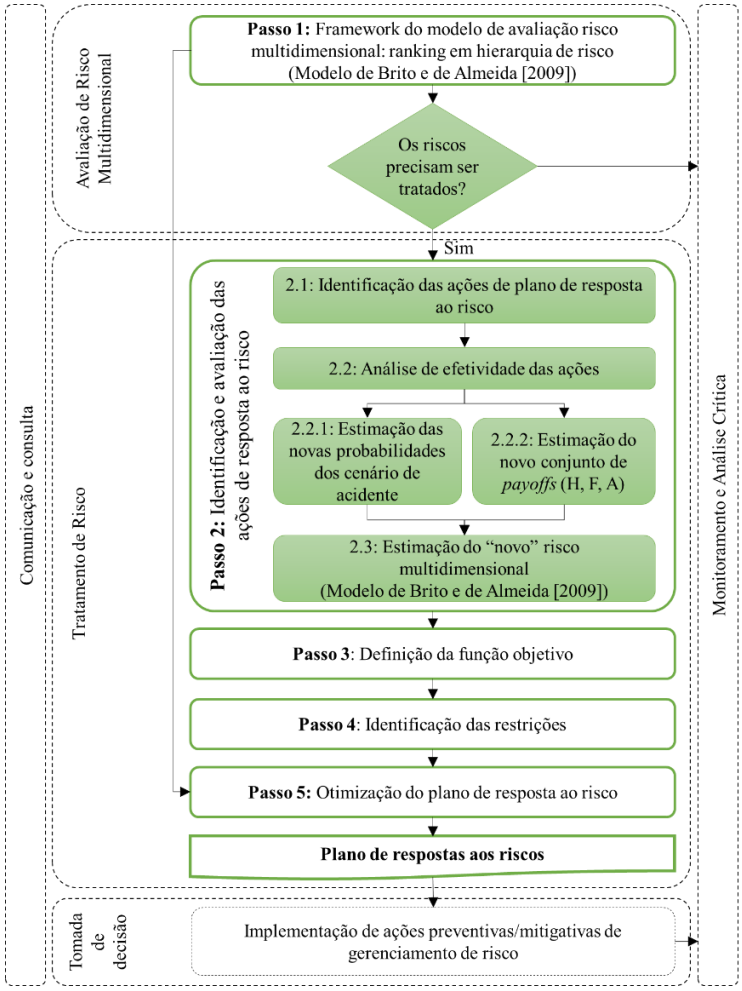


Figura 2 - Estrutura do modelo de decisão para o planejamento de resposta ao risco

Esse recálculo trará uma nova medida de risco multidimensional $r(s_a)$ e que servirá de *input* para o passo seguinte.

O passo três é composto pela definição da função objetivo. O objetivo principal do modelo é selecionar um conjunto de ações de prevenção e mitigação de risco que minimizem 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 $\left(r(s^x)\right)$. Esse objetivo deve ser traduzido em uma função objetivo, conforme Equação 1.

$$min\ z = \sum_x y_a^x \Delta R^x = \sum_x y_a^x \left(r(s_a^x) - r(s^x)\right) \quad (1)$$

onde y_s^x refere-se a variável de decisão binária (correspondendo a 1 se ação a for selecionada e a 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.

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 (Eq. 2).

É importante destacar que 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 et al. 2017]. Desta forma, o quarto passo sugere a construção de restrições para problema. A principais restrições que envolvam problemas relacionados a seleção de respostas ao risco são o orçamento limitado (Eq. 2.2) e a restrição de tempo de execução de ações (Eq. 2.3). Além disso, as ações de resposta do modelo proposto são mutuamente exclusivas, ou seja, não serão escolhidas duas ou mais ações para um mesmo risco (Eq. 2.4).

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 $(x+1)$, conforme Eq. 2.1; portanto, tem-se o modelo de otimização (Eq. 2).

$$min\ z = \sum_{x} y_a^x \Delta R^x = \sum_{x} y_a^x \left(r(s_a^x) - r(s^x)\right) \tag{2}$$

sujeito a

$$\sum_{x} y_a^x \Delta R^x = z^{x*}, para\ x = 1, \dots, x-1 \tag{2.1}$$

$$\sum_{a}\sum_{x} C_a^x\ y_a^x \leq O \tag{2.2}$$

$$\sum_{a}\sum_{x} t_a^x\ y_a^x \leq T \tag{2.3}$$

$$\sum_{a} y_a^x \leq 1 \tag{2.4}$$

$$y_a \in (0,1) \tag{2.5}$$

4. Aplicação Numérica

Realizar-se-á uma aplicação numérica com o propósito de ilustrar o modelo de otimização do planejamento de resposta ao risco, proposto neste trabalho. Para visualizar a aplicação numérica será realizado um estudo hipotético numa planta de produção de metanol. A planta hipotética está localizada próximo a quatro indústrias, duas comunidades e uma área de preservação ambiental, conforme ilustrado na Figura 3.

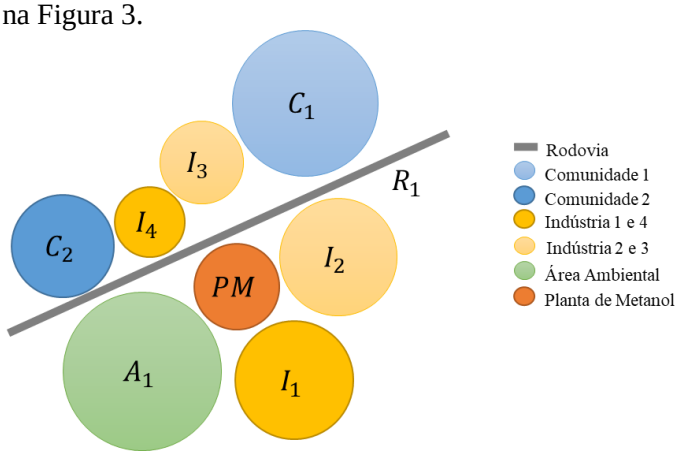


Figura 3 - Localização da planta de produção de metanol hipotética

4.1 Framework do modelo de avaliação de risco multidimensional

O primeiro passo da aplicação consiste em calcular e ordenar os riscos baseados no modelo de avaliação de risco multidimensional definido por Brito & de Almeida [2009]. 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, foi adotado apenas 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 artigo, apenas irá contemplar as subáreas que apresentam líquidos inflamáveis no seu processo. As subáreas são: Área de Estacionamento de Carretas (Aestac); Recebimento e Estocagem de Etanol (EstocEtan); Alimentação de Etanol (AlEtan); Separação Etanol (SepEtan); Produção de Metanol (ProdMetan); Estocagem de Metanol (EstocMetan); Recirculação de Etanol (RecircEtan); Reator de Metanol (ReatMetan).

A terceira etapa do modelo de análise de risco multidimensional é a identificação dos cenários de perigo. Uma técnica útil para determinar esses possíveis cenários é a Análise de Árvore de Eventos (ETA). Para exemplificação da aplicação numérica, na Tabela 1, serão considerados os modos de falhas, que podem causar grandes vazamentos de líquidos inflamáveis, assim como valores das probabilidades associadas a cada cenário definido por este trabalho, baseado no estudo 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. A estimação dos raios foi realizada com a ajuda do software ALOHA (versão 5.4.7), conforme a Tabela 2.

Tabela 1 – Estimação das probabilidades dos cenários de acidentes

Subárea	Modos 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

Tabela 2 – 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

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. 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]. Conforme a densidade demográfica da planta e a zona de perigo, a quantidade de pessoas máximas atingidas é limitada superiormente pela subárea Estocagem de Etanol, com uma quantidade de 6110 pessoas atingidas, devido a proximidade a comunidade circunvizinha.

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 maior de alcance para isso. 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.

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 restruturação de mão de obra, equipamentos e matéria prima) derivado dos modos de falha decorrentes de um acidente com vazamento de líquidos inflamáveis. Nesse sentido, através do raio das zonas de perigos, considerando o gasto de $1 por metro quadrado, e um fator de perda ρ, obtém-se a Tabela 3 os valores dos prejuízos financeiros máximos para cada subárea, sendo esse fator de perda ρ está associado com os esforços de restruturação dos danos causados pelos cenários de acidentes *k*.

Tabela 3 – 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

Como é suposta 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 intracritério. Desta maneira, o comportamento do decisor é feito através do procedimento de loterias, conforme descrito em Alencar & de Almeida [2010].

A elicitação das constantes de escala $k_{c_h}, k_{c_a}, k_{c_f}$ foi feito utilizando as matrizes de consequências e o método de elicitação baseado na comparação de loterias proposto por Keeney & Raiffa [1976]. Os valores das constantes de escala consideradas foram $K_{c_h} = 0{,}275$, $K_{c_a} = 0{,}115$ e $K_{c_f} = 0{,}61$.

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 definidos pela ferramenta de Análise Preliminar de Perigo (APP). Nesse sentido, as suposições seguem a seguinte legenda representada na Tabela 4.

As funções de utilidade multiatributo são combinadas com as funções de consequências e com a distribuição de probabilidade dos cenários acidentais. Assim, uma medida de risco multidimensional é estimada, sob a perspectiva da teoria da decisão e teoria da utilidade, conforme Equação 3.

https://proceedings.science/p/85317?lang=pt-br

Tabela 4 – 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

$$r(s) = \sum_i \left(\sum_j \sum_k \left(\pi_s(\theta_{jk}) \left(- \int_c u(c_i) P\left(c_i \middle| \theta_{jk}, s\right) dc \right) \right) \right) + (-1)\pi_s(\theta_N) \quad (3)$$

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.

Os valores dos riscos resultantes são mostrados na Tabela 5, sendo os valores de risco próximo a "-1", indicam uma maior contribuição do cenário de normalidade, uma vez que a ocorrência de eventos em industrias de metanol são raros de acontecer.

Tabela 5 – 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.

4.2 Identificação das ações de resposta

Uma vez 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 especificas 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.

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 6.

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 algumas efetividades das ações para cada cenário de perigo *k*. A efetividade de ações preventivas e mitigativas são 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. Como um exemplo, pode-se citar a barricada do espaço afetado com areia, que pode reduzir em 60% as consequências ambientais, e 0% na redução na probabilidade de ocorrência de determinado modo de falha. Detalhes dos valores de efetividade podem ser encontrados em Andrade e Garcez [2018].

Tabela 6 – 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

4.2 Processo de Otimização

O objetivo é prevenir e mitigar a exposição ao risco, e para isso, a função objetivo, representada pela Equação 1, é usada como a função para a qual a minimização é procurada. Supôs que, neste exemplo, o orçamento esteja limitado em $Orçamento = \$50.000{,}00$, e o tempo máximo estimado, em dias, seja de $T = 60h$, para implementação do plano de resposta ao risco.

Utilizando o método de algoritmo evolutivo, e seguindo o passo a passo da abordagem lexográfica, o resultado encontrado está descrito na Tabela 7, tendo o risco de forma decrescente.

Tabela 7 – Conjunto de ações ótimas para cada subárea na planta de produção de metanol

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

5. Discussões e Conclusão

Apesar dos eventos envolvendo a produção de metanol serem raros, as suas consequências podem ser catastróficas, 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.

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 8.

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 próximos planejamentos de seus recursos.

Tabela 8 – 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%

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 de otimização decidiu pela 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. Então, 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.

Foi realizado também uma 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 paramentos que se achava de grande impacto para o modelo, que neste caso eram o orçamento e o tempo de execução máxima das ações. 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 da Teoria da Utilidade e do apoio a decisão multicritério, na busca da definição o risco multidimensional, procurando avaliar os riscos de maneira mais consistente as incertezas associadas; e propondo, através disso, escolhas de ações de resposta ao risco eficazes e eficientes na visão de múltiplas consequências, minimizando os riscos finais.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Referências

ABNT ISO-31000. [2009] *NBR ISO 31000, Gestão de Riscos - Princípios e diretrizes*, Rio de Janeiro.

Alencar, M. H., de Almeida, A., de Almeida-Filho, A., Garcez, T. V., Almeida Filho, A. T. de, Almeida, A. T., and Alencar, M. H. [2009] "Multicriteria risk analysis application in a distribution gas pipeline system in Sergipe," *Reliability, Risk, and Safety*, Taylor & Francis Group, ed., *CHAP*, CRC Press, Prague, pp. 1043–1947.

Alencar, M. H., and de Almeida, A. T. [2010] "Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model," *International Journal of Hydrogen Energy*, *JOUR*, Elsevier Ltd, Vol. 35, No.8, pp. 3610–3619.

de Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida-Filho, A. T., and Garcez, T. V. [2015] *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*, International Series in Operations Research & Management Science, Springer International Publishing, Cham.

Andrade, P. R. M., and Garcez, T. V. [2018] "Otimização de planos de resposta ao risco multidimensional:

aplicação numérica em uma planta de produção de metanol.," (Dissertação de mestrado) Universidade Federal de Pernambuco.
Aven, T. [2008] *Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities*, *BOOK*, John Wiley & Sons.
Bhawana, P., and Fulekar, M. H. [2011] "Review Paper Environmental Management- strategies for chemical disaster," *Research Journal of Chemical Sciences*, Vol. 1, No.1, pp. 111–117.
Brito, A. J., and de Almeida, A. T. [2009] "Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94, No.2, pp. 187–198.
Di Domenico, J., Vaz, C. A., and de Souza, M. B. [2014] "Quantitative risk assessment integrated with process simulator for a new technology of methanol production plant using recycled CO2," *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier B.V., Vol. 274, pp. 164–172.
Dunn, C. J., Thompson, M. P., and Calkin, D. E. [2017] "A framework for developing safe and effective large-fire response in a new fire management paradigm," *Forest Ecology and Management*, Elsevier, Vol. 404, No.August, pp. 184–196.
Fang, C., Marle, F., Xie, M., and Zio, E. [2013] "An integrated framework for risk response planning under resource constraints in large engineering projects," *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 60, No.3, pp. 627–639.
Georgiadou, P. S., Papazoglou, I. A., Kiranoudis, C. T., and Markatos, N. C. [2010] "Multi-objective evolutionary emergency response optimization for major accidents.," *Journal of hazardous materials*, Elsevier B.V., Vol. 178, No.1–3, pp. 792–803.
Ghadge, A., Dani, S., Chester, M., and Kalawsky, R. [2013] "A systems approach for modelling supply chain risks.," *Supply Chain Management*, Vol. 18, No.5, pp. 523–538.
Glickman, T. S. [2008] "Program portfolio selection for reducing prioritized security risks," *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, No.1, pp. 268–276.
Health and Safety Executive. [2015] *The Control of Major Accident Hazards Regulations 2015*, pp. 1–132.
ISO-31000. [2009] *ABNT NBR ISO 31000, Gestão de riscos - Princípios e diretrizes*.
Keeney, R. L., and Raiffa, H. [1976] *Decision with Multiples Objectives Preferences and value trade-offs*, John Wiley & Sons.
Khan, F., Hashemi, S. J., Paltrinieri, N., Amyotte, P., Cozzani, V., and Reniers, G. [2016] "Dynamic risk management: a contemporary approach to process safety management," *Current Opinion in Chemical Engineering*, Elsevier Ltd, Vol. 14, pp. 9–17.
Lee, K., Kwon, H., Cho, S., Kim, J., and Moon, I. [2016] "Improvements of safety management system in Korean chemical industry after a large chemical accident," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 42, pp. 6–13.
OHSAS - Occupation Health and Safety Administration Standard 18001. [2007] *Sistemas de gestão da saúde e segurança ocupacional*, pp. 1–35.
Raz, T., and Ben-David, I. [2001] "An integrated approach for risk response development in project planning," *Journal of Operational Reseach Society*, Vol. 52, No.1, pp. 14–25.
Sato, Y. [2012] "Optimal budget planning for investment in safety measures of a chemical company," *International Journal of Production Economics*, Elsevier, Vol. 140, No.2, pp. 579–585.
Stedile, M. [2014] "Gerenciamento de risco para indústria química de médio porte," *Revista Oswaldo Cruz*, p. 14.
Toppila, A., and Salo, A. [2017] "Selection of risk reduction portfolios under interval-valued probabilities," *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier, Vol. 163, pp. 69–78.
Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., and Amyotte, P. [2015] "Risk-based optimal safety measure allocation for dust explosions," *Safety Science*, Elsevier Ltd, Vol. 74, pp. 79–92.