

Artigo

A Avaliação Quantitativa de Risco como Ferramenta para Determinação dos Riscos de Processos Industriais

Mendes-Silva, G. P.;* Dib-Neto; I. K. G.; Fontoura; G. A. T.; Rodrigues; F. A.

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (4), 1056-1073. Data de publicação na Web: 10 de julho de 2018

<http://rvq.sbq.org.br>

Quantitative Risk Assessment as a Tool for Determining the Risks of Industrial Processes

Abstract: Accidents in the chemical industry significantly affected the public perception on safety, boosting the development of Chemical Process Safety as a key area in manufacturing processes. Using risk analysis methodologies it is possible to identify the hazards of an industrial facility. The release of toxic materials, fires and explosions are the most common types of accidents that can potentially cause life losses, environmental damage and loss of property. Thus, Quantitative Risk Assessment (QRA) is a valuable tool for risk estimation during the usage, handling, transportation and storage of hazardous substances. In addition with consequence modelling, QRA helps estimating, from the release source, the effects of toxic product releases, fires and explosions, and their consequences for people and the environment. This paper aims to present the Quantitative Risk Assessment as a tool to determine the risks of processes on the industry.

Keywords: Process safety; quantitative risk assessment; consequence analysis; vapour cloud dispersion; fires; explosions.

Resumo

Os acidentes da indústria química tiveram um impacto significativo na percepção do público sobre a segurança, impulsionando o desenvolvimento da Segurança de Processos Químicos como área fundamental nos processos de manufatura. Através da utilização de metodologias de análise de risco é possível identificar os perigos de uma instalação industrial. A liberação de materiais tóxicos, os incêndios e as explosões são os tipos de acidente mais comuns com potencial para causar perdas de vidas, danos ao meio ambiente e perdas de propriedade. Desta forma, a Avaliação Quantitativa de Risco (do inglês, *Quantitative Risk Assessment* ou QRA) apresenta-se como ferramenta valiosa para determinar o risco de uso, manuseio, transporte e armazenamento de substâncias perigosas. Juntamente com a modelagem de consequências, a QRA permite estimar, a partir do ponto de liberação, os efeitos de acidentes de liberação de produtos tóxicos, incêndios e explosões e suas consequências para as pessoas e para o meio ambiente. Este artigo tem como objetivo apresentar a Avaliação Quantitativa de Riscos como uma ferramenta para determinar os riscos dos processos na indústria.

Palavras-chave: Segurança de processos; avaliação quantitativa de risco; análise de consequências; dispersão de nuvem de vapor; incêndios; explosões.

* Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Química, Campus Viçosa, CEP 36570-900, Viçosa-MG, Brasil.

✉ gus.peron@hotmail.com

DOI: [10.21577/1984-6835.20180074](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180074)

A Avaliação Quantitativa de Risco como Ferramenta para Determinação dos Riscos de Processos Industriais

Gustavo P. Mendes-Silva,^a Issa Khalil G. Dib Neto,^b Geraldo André T. Fontoura,^c Fábio de A. Rodrigues^a

^a Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Química, Campus Viçosa, CEP 36570-900, Viçosa-MG, Brasil.

^b Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Campus Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia-MG, Brasil.

^c Universidade Federal Fluminense, Instituto de Química, Departamento de Química Analítica, Campus do Valonguinho, CEP 24020-150, Niterói-RJ, Brasil.

* gus.peron@hotmail.com

Recebido em 5 de abril de 2018. Aceito para publicação em 28 de junho de 2018

- 1. Introdução**
- 2. Avaliação Quantitativa de Risco**
 - 2.1.** Descrição do sistema
 - 2.2.** Identificação dos cenários de risco
 - 2.3.** Estimativa dos efeitos
 - 2.4.** Análise de vulnerabilidade
- 3. Eventos Indesejáveis Avaliados na QRA**
 - 3.1.** Dispersão de produtos e materiais tóxicos
 - 3.2.** Incêndios
 - 3.3.** Explosões
- 4. O Futuro da QRA**
- 5. Considerações Finais**

1. Introdução

Com o surgimento da indústria a partir da Revolução Industrial, os avanços em segurança não foram capazes de acompanhar os avanços tecnológicos. Apenas onze anos após a invenção da primeira caldeira, o

primeiro acidente fatal ocorreu, em 1815, em uma ferrovia inglesa. No ano seguinte, o primeiro acidente de barco a vapor matou 14 pessoas nos Estados Unidos. Estes somados a acidentes subsequentes resultaram em 2.500 mortes antes de 1850.¹

Nos anos 1950 e 1960, o processamento químico tornou-se cada vez mais sofisticado,

com estoques maiores de produtos químicos corrosivos, tóxicos e inflamáveis, temperaturas mais altas e pressões mais elevadas.² À medida que a tecnologia dos processos químicos foi se tornando mais complexa, houve a necessidade de uma compreensão mais detalhada da segurança envolvendo os processos industriais.³

No início da década de 1960, começou-se a observar uma grande mudança nas indústrias química, petroquímica e de óleo e gás. As quantidades de produtos produzidos nas fábricas aumentavam consideravelmente, fazendo com que condições operacionais, tais como temperatura e pressão, se tornassem cada vez mais severas, além de aumentar a quantidade de materiais perigosos armazenados. Porém, um dos problemas de se trabalhar em condições extremas é que o processo se aproxima cada vez mais dos limites operacionais seguros. Por conta disso, em meados da década de 1960, diversos sistemas foram elaborados para garantir a integridade dos processos de fabricação.⁴

Entretanto, até o início da década de 1970, a questão da segurança na indústria química era tratada unicamente no âmbito das empresas, sem maiores interferências externas do governo ou do público. Nos projetos industriais e de equipamentos em geral, o enfoque de segurança era essencialmente baseado nos fatores de segurança embutidos nas normas e códigos de projeto. Na indústria, havia uma ênfase exagerada na produção em comparação às prioridades dadas aos aspectos de saúde e segurança. A questão ambiental sequer era colocada na agenda das discussões de investimentos da indústria.⁴

As falhas em compreender essas questões tiveram severas consequências. Alguns casos históricos da indústria química, como os acidentes de Flixborough⁵, Pasadena⁶, Bhopal⁷ e Seveso³, mostram como as catástrofes foram importantes para nos ensinar a enxergar a segurança como algo essencial para os processos químicos. Todos esses acidentes tiveram um impacto significativo na percepção do público, acrescentando uma nova ênfase e novos padrões na prática de

segurança, impulsionando o desenvolvimento da Segurança de Processos Químicos como área fundamental nos processos de manufatura.

A segurança de processos é um sistema de gerenciamento a ser implementado nas empresas de modo a prevenir grandes incidentes envolvendo materiais perigosos, principalmente aqueles relacionados à liberação não desejada de materiais tóxicos ou energia, incêndios e explosões.⁸

Por muitas vezes, a segurança de processos é subestimada, visto que, se comparados com os acidentes de segurança ocupacional, os incidentes de segurança de processos ocorrem com uma frequência muito menor, apesar do seu potencial para resultar em múltiplas fatalidades, grandes perdas econômicas e de propriedade, além de consideráveis danos ambientais.⁹ Por exemplo, das ocorrências de morte registradas na indústria no ano de 2015, nos Estados Unidos, 1816 delas (cerca de 41%) foram decorrentes de acidentes no transporte. Os demais óbitos se dividem entre quedas e tropeços (17%), contato com objetos e equipamentos (16%), violência e homicídio (14%), enquanto a exposição a substâncias perigosas e os incêndios e explosões contribuem com apenas 9% e 3% deste número, respectivamente.¹⁰

Apesar da baixa incidência de óbitos relacionados à exposição a substâncias perigosas e incêndios e explosões – responsáveis por apenas 12% dos registros –, os números ressaltam a importância da análise de risco deste tipo de evento. Além dos óbitos, também deve se considerar a potencial perda de material e capital, os possíveis impactos ambientais, o prejuízo para a imagem da empresa e a possível interrupção dos negócios decorrentes destes eventos.

Existem várias formas de se classificar os riscos encontrados na indústria moderna. Na indústria química, os riscos mais comuns são aqueles decorrentes das atividades rotineiras da operação, como atividades de manutenção, trabalho em altura, trabalho a quente e trabalho em espaço confinado.

Todavia, os acidentes catastróficos ou com impactos de grande escala estão geralmente relacionados a algum tipo de perda de contenção dos produtos manuseados na produção, seja por vazamento ou ruptura de equipamentos e tubulações ou por explosões confinadas (pressurização, reações descontroladas, etc.) que, em última instância, acabam por causar liberações súbitas de produtos perigosos ou de grande quantidade de energia armazenada no processo.¹¹

As metodologias mais utilizadas para análise dos riscos da indústria são o estudo de risco e operabilidade (HAZOP) e o método *What-If* ou a abordagem *What-If/Checklist*.¹² Apesar de amplamente aceitas e adotadas como ferramentas de identificação e gerenciamento de riscos, estas metodologias fornecem apenas uma visão qualitativa dos riscos.

Por conseguinte, este artigo tem como objetivo apresentar a Avaliação Quantitativa de Riscos como uma ferramenta para determinar os riscos dos processos na indústria, pois se trata de uma análise que revela dados decisivos acerca dos projetos ou das atividades de processamento das indústrias químicas.

2. Avaliação Quantitativa de Risco

Uma das formas de identificação dos perigos de uma instalação industrial é por meio da utilização de metodologias de análise de risco. Essas metodologias tentam compreender o que pode dar errado durante a operação de um processo, o quão graves podem ser as consequências e com qual frequência podem ocorrer.^{13, 14} Essas avaliações são feitas para estimar os riscos para pessoas, para o público e para o negócio, para garantir que estes riscos sejam suficientemente pequenos, que estejam

dentro da zona de risco tolerável pela empresa ou pelos requisitos legais locais e para auxiliar na definição da priorização de investimentos.^{14, 15}

A ocorrência de vazamentos de produtos químicos representa uma grave ameaça à segurança dos moradores ao redor das plantas industriais, à qualidade do ar e à segurança no trabalho.¹⁶ Em países em desenvolvimento, onde as densidades populacionais são muito altas e as áreas industriais são cercadas por densos aglomerados de bairros, há ainda a grande probabilidade de efeitos dominó, onde o acidente em uma indústria pode causar outro acidente em uma indústria vizinha que, por sua vez, pode desencadear outro acidente e assim por diante.^{17, 18}

As legislações internacionais mais recentes destinadas a controlar os riscos tecnológicos dos processos industriais incorporaram o critério de dose na definição de áreas de vulnerabilidade. Isso implica saber a concentração e o tempo a que uma pessoa está exposta durante a emergência.¹⁷ Essas informações são valiosas para se determinar planos de emergência mais eficazes para cada cenário de risco.

A Avaliação Quantitativa de Risco (do inglês, *Quantitative Risk Assessment* ou QRA) é uma ferramenta valiosa para determinar o risco de uso, manuseio, transporte e armazenamento de substâncias perigosas.¹⁹⁻²¹ Sua utilização iniciou-se na indústria nuclear, eletrônica e aeroespacial, antes de começar a ser utilizada na indústria química.^{14, 17} As QRA são usadas para demonstrar o risco causado pela atividade e fornecer às autoridades competentes informações relevantes para propiciar decisões sobre a aceitabilidade dos riscos referentes às atividades do estabelecimento ou da rota de transporte.^{21, 22}

A realização de um estudo de Análise Quantitativa de Risco consiste em quatro passos distintos^{15, 23}, conforme apresentado na Figura 1.

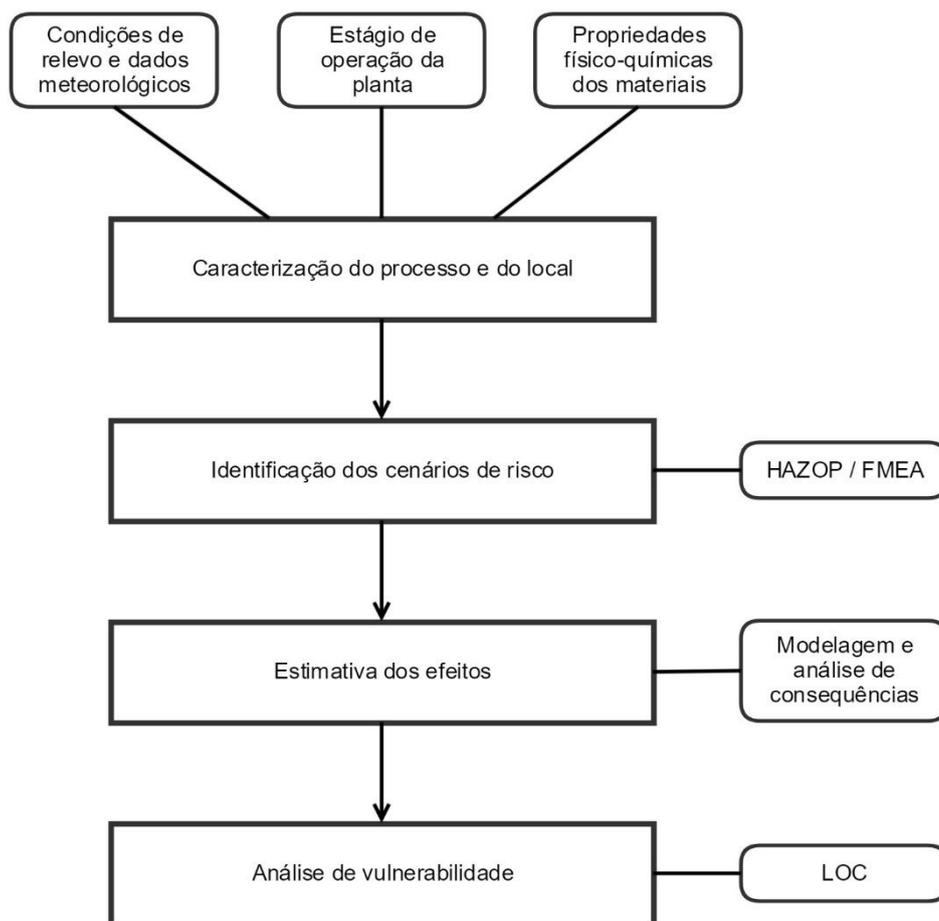


Figura 1. Etapas para a realização de uma QRA^{15,17}

2.1. Descrição do sistema

O primeiro passo para iniciar uma QRA é determinar qual será o sistema-alvo do estudo e, com isso, obter todas as informações relevantes para a análise. Estas informações compreendem os diagramas de fluxo do processo (PFD), os diagramas de tubulação e instrumentação (P&ID), as plantas baixas, os procedimentos operacionais e de documentação, balanços de massa, as narrativas de automação, informações sobre a tecnologia e a química do processo¹⁴ e as propriedades físico-químicas¹⁵ dos materiais estudados.

Além dos dados do processo analisado, também é importante obter dados sobre a localidade onde o estudo irá ocorrer. Dados geográficos, como altitude, latitude,

longitude, e climáticos, como umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade média do vento e direção predominante, estabilidade atmosférica, etc.¹⁵ são necessários para as etapas posteriores de determinação das consequências e análise de vulnerabilidade.

2.2. Identificação dos cenários de risco

Os incidentes de maior preocupação na indústria são normalmente associados com a liberação não planejada de materiais que possuem propriedades perigosas, tais como toxicidade ou energia (pressão e temperatura).^{21,22} A identificação destes cenários normalmente é feita através da utilização de metodologias qualitativas de análise de perigos do processo (PHA), tais

como estudos de HAZOP, análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA), análise do tipo "What-If" e análises de *Checklist*.^{14,15,17,23,24}

Após a identificação dos cenários, é necessário estabelecer uma frequência na qual é possível que este cenário ocorra. As frequências podem ser atribuídas com base na experiência da operação do processo ou com base nas frequências referência estabelecidas pelo CCPS²⁵ no livro *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis*.

Sempre são escolhidos os piores cenários possíveis para avaliação durante o QRA. Apesar de ocorrerem com uma frequência relativamente baixa, são eles que fornecem a dimensão das piores consequências possíveis.²² Após a identificação de todos os cenários passíveis de liberação não planejada de materiais perigosos ou energia, é definido o escopo da análise quantitativa de riscos.²⁴

2.3. Estimativa dos efeitos

A partir dos cenários de risco e da utilização de diversas equações de vulnerabilidade e modelos matemáticos, é possível realizar o estudo de análise de consequências. Esta é uma etapa muito importante do processo de QRA, que permite determinar quantitativamente as consequências potenciais de cada cenário de risco para as pessoas, para o meio ambiente e para os equipamentos da planta.^{14,15,17,20,22,24} Para projetistas, fabricantes de equipamentos industriais, operadores e autoridades responsáveis, é essencial ter modelos disponíveis para avaliar os efeitos físicos das liberações acidentais de materiais perigosos.²⁶

A duração de uma liberação é determinada de acordo com as condições da instalação e com o tipo de evento que irá causar a perda de contenção. Pode ser uma liberação instantânea ou pode durar horas, se nenhuma ação imediata for tomada para evitar a sua progressão. Para os cálculos de QRA, porém, são considerados apenas os efeitos causados

pela quantidade de substância decorrente de liberações instantâneas ou liberações com duração máxima de 60 minutos.²⁰

2.4. Análise de vulnerabilidade

Durante a avaliação dos potenciais impactos às pessoas, é necessário levar em consideração dois tipos de risco: o risco individual, que é o impacto máximo possível de ser causado a uma única pessoa dentro da zona de risco, independentemente do número total de pessoas que podem ser afetadas; e o risco societal, que leva em consideração o impacto cumulativo capaz de ser causado a um grupo de pessoas presentes na zona de risco.²²

Para determinação dos efeitos na população ao redor da fábrica, é preciso levar em consideração a densidade populacional das zonas residenciais, considerando zonas de recreação, prédios comerciais e prédios de serviço público, como escolas e hospitais. É importante considerar que a densidade irá variar ao longo do dia, visto que as pessoas deixam suas casas para ir ao trabalho ou para a escola durante o dia, enquanto é esperado que permaneçam em suas casas durante o período noturno. Considera-se que 70% da população está presente em zonas residenciais durante o dia e 100% dela está presente durante a noite.^{20,22}

Para determinação dos efeitos sobre as pessoas nas zonas industriais, por outro lado, espera-se que a maior parte das pessoas esteja presente durante o dia, em horário comercial. Isso implica que, durante o dia, 100% da população está presente, enquanto apenas 20% é esperada durante o período noturno. Para zonas industriais que funcionam apenas em período comercial, não é esperada presença de pessoas durante o período noturno.^{20,22}

Cabe ressaltar que, de forma conservativa, a área vulnerável corresponde a toda área passível de ser atingida. Em caso da ocorrência do cenário acidental, a área

predominantemente atingida será influenciada pela condição climática e geográfica local no instante da liberação, tal como interferências do relevo, grandes edificações, direção e velocidade do vento,²⁷ sendo, portanto, uma fração da área vulnerável.

3. Eventos Indesejáveis Avaliados na QRA

Os tipos de acidente com potencial para causar perdas de vidas, danos ao meio ambiente e perdas de propriedade mais comuns são a liberação de materiais tóxicos, os incêndios e as explosões (Figura 2).²⁸ As particularidades de cada um destes acidentes e as abordagens para determinação de suas consequências são discutidas nas próximas sessões.

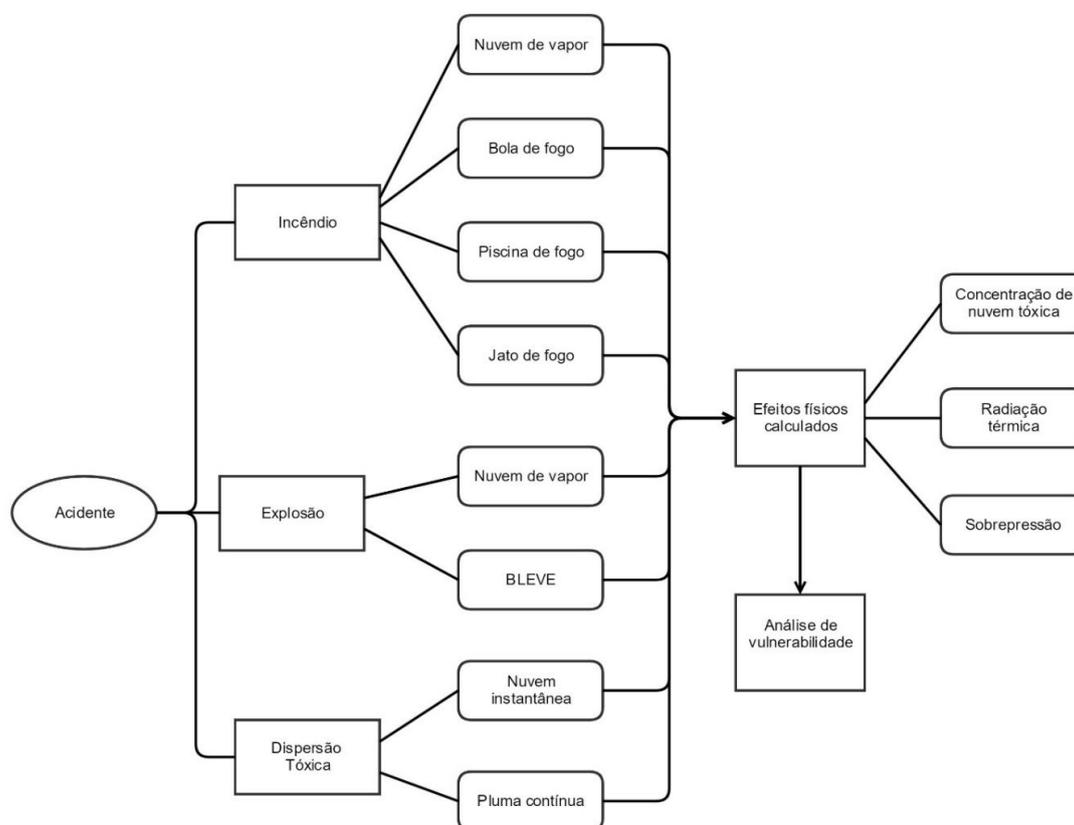


Figura 2. Eventos indesejáveis avaliados nas QRA^{14,21}

3.1. Dispersão de produtos e materiais tóxicos

A maioria dos acidentes mais perigosos começa com a liberação não desejada de materiais tóxicos ou inflamáveis de sua contenção primária. As liberações podem ser gasosas, líquidas, ou mesmo uma liberação em duas fases a partir de um gás liquefeito. Essas liberações podem acontecer por

tubulações de alívio e transbordo, por valhas deixadas abertas, ou por furos em tubulações e conexões de processo.²¹

Todos os cenários de liberação que serão utilizados na modelagem são obtidos a partir das avaliações qualitativas de risco do processo ou a partir de incidentes ocorridos na planta. Para determinarmos o melhor modelo de dispersão, é importante entendermos como a densidade, o estado

físico e as propriedades termodinâmicas do material, o modo de liberação, o tamanho do furo e a duração da liberação irão influenciar na sua dispersão no ambiente.^{17,21,29}

Um dos fatores mais importantes a se considerar é a densidade do gás. Ele pode se comportar como gás neutro, quando possui uma densidade próxima à densidade do ar, como um gás denso, quando possui uma densidade maior do que a do ar, ou como gás leve, quando possui uma densidade menor do que a do ar.^{19,21} O risco de uma liberação de gases pesados é maior se comparado com a liberação de gases leves, pois os primeiros tendem a demorar mais para se dispersar na atmosfera. Experimentos mostram que um gás pesado só terá comportamento similar ao de gases neutros após cerca de 10 metros do ponto de liberação, para pequenas liberações de material, podendo chegar até 1000 metros para grandes vazamentos.²⁹

Além das características do processo e da liberação, as condições meteorológicas do local também irão influenciar a dispersão da nuvem de vapor. Os dados meteorológicos referentes à estabilidade atmosférica podem ser expressos em termos de Comprimento de Monin-Obukhov³⁰ ou em termos de Classes de Estabilidade de Pasquill.³¹ A velocidade do vento, a temperatura, a pressão e a umidade irão variar conforme a altitude do local analisado.

Existem diversos modelos de transporte e dispersão de gases disponíveis. Os mais comumente usados são: o modelo de dispersão Gaussiana, usado para gases neutros; o modelo de dispersão de gás pesado, utilizado para gases mais densos do que o ar; modelo lagrangiano de dispersão de partículas; modelo de *puff*; modelo de *vent* e a fluidodinâmica computacional.³² O Modelo Unificado de Dispersão, desenvolvido pela empresa DNV GL,³³ pode ser utilizado para qualquer tipo de gás, considerando as diversas forças que atuam na dispersão da nuvem e as diferentes fases que podem ser observadas durante esta etapa.

Uma vez realizados os cálculos de dispersão, deve-se definir quais concentrações são consideradas perigosas. Para os cenários de liberação não esperada de produtos químicos, deve-se considerar valores de exposição a curto prazo nas situações de emergência ao invés dos valores de exposição ocupacional.⁴

Para valores de exposição a curto prazo podemos utilizar diretrizes de exposição pública elaboradas por órgãos governamentais. As diretrizes de exposição pública destinam-se a prever como os membros do público em geral seriam afetados, ou seja, a gravidade do perigo, se estiverem expostos a um produto químico perigoso específico em uma situação de resposta de emergência.³⁴

Para se fazer a modelagem de uma liberação de produto químico tóxico, pode-se utilizar qualquer uma das diretrizes disponíveis como Níveis Tóxicos de Preocupação (do inglês, *Levels of Concern* ou LOC). Os LOC e outras informações de cenário são utilizados para gerar uma estimativa de zona de ameaça onde zonas vermelhas, laranja e amarelas indicam áreas em que as concentrações de químicos referente a cada LOC foram excedidas em algum ponto após a liberação ter começado.³⁴ Os LOC padrão mais utilizados para fins de determinação de consequências são:

a) **AEGL – Acute Exposure Guideline Levels (Níveis de orientação de exposição aguda):** os AEGLs estimam as concentrações em que a maioria das pessoas - incluindo indivíduos sensíveis, como pessoas idosas, doentes ou muito jovens - começará a ter efeitos para a saúde se estiverem expostos a um produto químico perigoso por um período específico (duração). Para uma determinada duração da exposição, um produto químico pode ter até três valores de AEGL, cada um dos quais corresponde a um nível específico de efeitos sobre a saúde.³⁵ As três camadas AEGL são definidas da seguinte forma:

i. O AEGL-3 é a concentração no ar de uma substância acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, possa ter um risco de vida, graves efeitos à saúde ou morte.³⁵

ii. O AEGL-2 é a concentração no ar de uma substância acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos susceptíveis, possa ter efeitos adversos irreversíveis ou outros efeitos adversos graves e duradouros para a saúde ou tenha a habilidade de escapar do local de risco prejudicada.³⁵

iii. O AEGL-1 é a concentração no ar de uma substância acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, possa sofrer desconforto notável, irritação ou certos efeitos não-sensíveis assintomáticos. No entanto os efeitos não são incapacitantes e são transitórios e reversíveis após o término da exposição.³⁵

b) **ERPG – Emergency Response Planning Guidelines (Diretrizes de planejamento de resposta de emergência):** os ERPGs estimam as concentrações em que a maioria das pessoas começará a sentir efeitos para a saúde se estiverem expostos a um produto químico perigoso no ar por 1 hora. Os membros sensíveis do público - como pessoas idosas, doentes ou muito jovens - não são contemplados por essas diretrizes e podem sofrer efeitos adversos em concentrações abaixo dos valores do ERPG. Um produto químico pode ter até três valores de ERPG, cada um correspondente a um nível específico de efeitos sobre a saúde.³⁶ Os três níveis ERPG são definidos da seguinte forma:

i. O ERPG-3 é a concentração máxima no ar abaixo da qual quase todos os indivíduos podem estar expostos por até 1 hora sem experimentar ou desenvolver graves efeitos para a saúde ou que coloquem a vida em risco.³⁶

ii. O ERPG-2 é a concentração máxima no ar abaixo da qual quase todos os indivíduos podem estar expostos por até 1 hora sem experimentar ou desenvolver efeitos ou sintomas irreversíveis ou outros efeitos graves

para a saúde que possam prejudicar a habilidade de um indivíduo em tomar medidas protetoras.³⁶

iii. O ERPG-1 é a concentração máxima no ar abaixo da qual quase todos os indivíduos podem ser expostos por até 1 hora sem experimentar mais do que efeitos secundários leves, transitórios ou sem perceber um odor desprezível claramente definido.³⁶

c) **IDLH – Immediately Dangerous to Life or Health (Imediatamente perigoso para vida ou saúde):** o limite de IDLH representa a concentração de um produto químico no ar ao qual trabalhadores adultos saudáveis poderiam estar expostos sem sofrer efeitos permanentes ou prejudiciais para a saúde. Embora, na maioria dos casos, a saída de um determinado local de trabalho possa ocorrer em muito menos de 30 minutos, como margem de segurança, os valores IDLH foram baseados nos efeitos que podem ocorrer como consequência de uma exposição com duração de 30 minutos.³⁷

A probabilidade de exposição de um ou mais indivíduos aos gases liberados depende de alguns fatores, tais como a chance de esta pessoa estar fora de qualquer edifício ou construção ou a probabilidade de que ela escape de qualquer edificação antes de se expor a quantidades perigosas da substância.³⁸ A utilização destas diretrizes de exposição pública pode resultar em inconsistências, pois os diferentes métodos se baseiam em conceitos diferentes. Deve-se verificar qual método se adequa melhor ao cenário em estudo e deve prevalecer o bom senso.

Outros riscos, além daqueles relacionados com a concentração do produto, podem ocorrer em decorrência da liberação. Os mais comuns são: diminuição da concentração de oxigênio disponível, causando potencial para asfixia; exceder o limite inferior de inflamabilidade, criando uma atmosfera potencialmente explosiva; limitações de visibilidade devido à nuvem de poluente; e transporte de material perigoso por dutos de ventilação.³⁹

3.2. Incêndios

Os incêndios são reações químicas rápidas que ocorrem entre materiais combustíveis e um material oxidante – normalmente o oxigênio do ar atmosférico –, na presença de uma fonte de ignição – normalmente o calor.⁴⁰⁻⁴² Apesar do material combustível poder estar nas fases sólida, líquida ou gasosa, a combustão sempre acontecerá na fase gasosa.^{4,41} A reação de combustão produz fumaça, gases e calor. Dois incêndios diferentes nunca produzirão estes produtos nas mesmas quantidades. Dessa forma, é possível identificar as propriedades de um incêndio a partir dos produtos formados.⁴⁰

Quando o combustível e o material oxidante entram em contato, eles precisam ser ativados para iniciar a reação de combustão.⁴⁰ As fontes de ignição fornecem a energia necessária para iniciar a reação em cadeia, que irá ocorrer até que todo material

combustível ou agente oxidante tenham sido consumidos.^{41,42} Outros elementos podem afetar a ocorrência de incêndios, como catalisadores, inibidores ou contaminantes.⁴⁰

Nos processos industriais, por muitas vezes não é possível impedir a utilização de materiais combustíveis e inflamáveis. Garantir que estes materiais não entrem em contato com o oxigênio do ar demanda de um sistema complexo ou caro demais para ser viabilizado. Sendo assim, o controle das fontes de ignição é um dos elementos mais importantes na prevenção de incêndios e explosões. Isso pode ser feito através da classificação elétrica de áreas, controle de eletricidade estática, procedimentos de trabalho a quente ou restrição de acesso de pessoas a áreas onde há riscos de inflamabilidade.⁴³ Outras fontes de ignição podem estar presentes e podem necessitar de controles mais específicos. As fontes de ignição mais comuns são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Fontes de ignição típicas para princípios de incêndio⁴

Fonte de Ignição	Ocorrência típica
Equipamentos elétricos	23%
Gases aquecidos	18%
Superfícies quentes	15%
Atrito	10%
Faíscas mecânicas	10%
Chamas abertas	7%
Reações químicas	5%
Trabalho a quente	4%
Incêndio criminoso	3%
Descargas eletroestáticas	1%
Descargas atmosféricas	1%
Outras fontes de ignição	3%

Existem diversos sistemas para classificações são normalmente classificam dos incêndios. Estas governamentais e existem para facilitar a

determinação de agentes de combate a incêndio em estabelecimentos comerciais.^{42,44} A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as classificações utilizadas na Europa (BS

EN2)⁴⁵ e nos Estados Unidos (NFPA 10).⁴⁶ No Brasil, uma classificação baseada na classificação norte-americana é utilizada.

Tabela 2. Classificação dos incêndios⁴²⁻⁴⁴

Classificação	BS EN2 ⁴⁵	NFPA 10 ⁴⁶
Classe A	Incêndios envolvendo materiais sólidos, normalmente de origem orgânica, caracterizados pela formação de cinzas e brasas.	Incêndios envolvendo combustíveis sólidos (ex. madeiras, papel, tecido, borracha, etc.), caracterizados pelas cinzas e brasas que deixam como resíduos.
Classe B	Incêndios envolvendo líquidos inflamáveis e combustíveis ou sólidos liquefeitos.	Incêndios envolvendo líquidos inflamáveis, graxas e gases combustíveis, caracterizados por não deixar resíduos.
Classe C	Incêndios envolvendo gases inflamáveis.	Incêndios envolvendo materiais e equipamentos energizados.
Classe D	Incêndios envolvendo metais combustíveis	Incêndios envolvendo metais combustíveis (ex. magnésio, selênio, antimônio, lítio, potássio, alumínio fragmentado, zinco, titânio, sódio e zircônio).

Além da classificação dos incêndios em classes, outra classificação importante é o tipo de incêndio que irá se formar em cada cenário. Os quatro tipos mais comuns são os incêndios de poça, jato de fogo, incêndio de nuvem de vapor, bola de fogo e fogo instantâneo.^{42,47} Cada tipo de incêndio tem duração e impacto diferente dos demais. Faz-se necessário, então, entender qual efeito ocorre para determinação de suas consequências, que podem ser decorrentes do contato direto com a chama ou devido à exposição à radiação térmica.⁴⁷ O calor dos incêndios pode causar queimaduras, se em contato com pessoas, ou danos a equipamentos e estruturas. Os limites de radiação térmica e seus efeitos são apresentados na Tabela 3.

Compreender como os incêndios se formam é essencial para saber como

combate-lo. Para incêndios originados por vazamentos, uma solução é o combate através da interrupção do suprimento de combustível ao incêndio. Uma outra abordagem é a utilização de água para retirada do calor que sustenta a reação em cadeia de combustão.⁴² Alguns gases inertes, como o dióxido de carbono, podem ser utilizados para reduzir a concentração de oxigênio disponível para combustão. Uma última abordagem é a utilização de espuma como barreira física para a liberação dos vapores que alimentam a combustão.^{42,44}

Alguns eventos de incêndio podem resultar em explosões ou de explosões. Normalmente os incêndios associados a explosões são do tipo incêndio de nuvem de vapor.⁴²

Tabela 3. Efeitos dos incêndios de acordo com os níveis de radiação térmica^{14,21,42}

Radiação térmica (kW/m ²)	Efeitos
1,6	Não irá causar desconfortos após exposições prolongadas.
4,0	Dores após 20 segundos de exposição, sem chances de fatalidade.
9,5	Dores após 8 segundos de exposição; queimaduras de segundo grau (bolhas na pele) após 20 segundos de exposição.
12,5	Ignição de madeira em presença de chama piloto, fusão de tubulações plásticas.
25	Ignição espontânea de madeira em exposição prolongada.
37,5	Danos a equipamentos.

3.3. Explosões

Enquanto os incêndios liberam energia lentamente após o início da combustão, as explosões são caracterizadas por liberar energia muito rapidamente, causando uma onda de pressão, projeção de materiais e onda acústica, além da onda de radiação térmica.^{4,14}

Quando uma explosão ocorre, a energia armazenada no interior do equipamento é liberada. Se a explosão é física, essa pressão é relacionada à pressão interna do equipamento no momento da explosão.¹⁴ Em uma explosão química, a energia liberada é uma função da natureza e do estado dos reagentes e dos produtos que participam da reação.⁴² A combustão rápida característica da explosão faz com que parte da energia química seja convertida em energia mecânica, propiciando a expansão dos produtos da reação. Essa energia mecânica é propagada na forma de ondas de pressão.⁴⁸

Os danos de uma explosão dependerão se ela foi originada de uma deflagração ou de uma detonação. Na deflagração, a mistura inflamável queima de forma lenta, fazendo com que a reação se propague a uma velocidade menor do que a velocidade do som, causando uma onda de pressão baixa. Em uma detonação, a reação é propagada por uma forte onda de pressão, fazendo com que

ela seja propagada a uma velocidade similar ou superior à velocidade do som.^{4,21,42,48}

Os tipos mais comuns de explosão nos processos industriais são as explosões de nuvem de vapor e o BLEVE (do inglês, *Boiling liquid expanding vapour explosion* ou explosão do vapor de expansão de um líquido sob pressão) quando há presença de produtos inflamáveis, e as explosões físicas, quando há apenas pressurização excessiva de equipamentos.⁴⁸

A explosão de nuvem de vapor ocorre após a liberação de material inflamável no ar e sua posterior ignição.²¹ Caso a ignição da nuvem ocorra em uma área aberta, o mais provável é que ocorra um incêndio de nuvem de vapor ou um fogo instantâneo. Para que a explosão ocorra, é necessário que pelo menos parte da nuvem de vapor esteja confinada.^{21,48} Este efeito tende a possuir um grande risco pois a nuvem de vapor inflamável pode se afastar consideravelmente da sua fonte de liberação antes de entrar em ignição, tornando difícil prever seus impactos.⁴²

O BLEVE é um fenômeno complexo que ocorre normalmente em unidades de armazenamento de gases liquefeitos. Este efeito ocorre quando há a vaporização violenta do produto liquefeito de forma explosiva, de modo a causar a ruptura do seu tanque de armazenamento, que se encontra a uma temperatura significativamente maior do

que o ponto de ebulição do gás a uma pressão atmosférica.^{21,48,49} Dentre as causas identificadas para o BLEVE, as principais são as tensões causadas por temperatura, a fadiga do material, corrosão, construção inadequada do recipiente, tensões causadas por pressão e redução da força do material devido às altas temperaturas na parede do recipiente, normalmente associada ao fogo externo.⁵⁰

As explosões físicas ocorrem quando há a ruptura de vasos e equipamentos pressurizados.⁴² Quando ocorre o rompimento do equipamento, a expansão instantânea de seu conteúdo faz com que ocorra a liberação de uma onda de pressão, que se propaga a partir do ponto de origem da explosão.⁴⁸ Quanto maior a pressão no interior do equipamento antes da explosão, maior será a onda de pressão liberada.⁴² Essa ruptura normalmente é decorrente da falha de reguladores de pressão e de equipamentos de alívio de pressão, da redução da espessura

da parede do equipamento ou da redução da estanqueidade do equipamento devido às condições do processo.¹⁴

Um incidente que resulta em uma explosão apresenta uma das maiores consequências que pode ocorrer nos processos industriais. Seus efeitos para pessoas e para o meio ambiente podem ocorrer de três diferentes formas: através da onda de pressão decorrente da explosão, através da radiação da bola de fogo, quando o produto envolvido no evento é inflamável, ou através dos pedaços de materiais e fragmentos que são projetados.⁴⁹

A Tabela 4 apresenta as consequências decorrentes da onda de pressão. As consequências da radiação térmica foram apresentadas na Tabela 3. Os efeitos decorrentes da projeção de estilhaços são complexos para prever, dependem das características do material e da presença de pessoas no local durante a explosão.

Tabela 4. Efeitos da onda de pressão para pessoas e estruturas^{42,51}

Sobrepressão	Efeito em estruturas	Efeitos no corpo humano
1 psi	Quebra de vidraças	Danos leves causados por fragmentos
2 psi	Danos moderados a residências (janelas, portas e telhados)	Danos sérios causados por fragmentos
3 psi	Colapso de estruturas residenciais	Ruptura de tímpano em cerca de 1% dos indivíduos
5 psi	Danos estruturais sérios a prédios comerciais e de processo	1% de possibilidade de fatalidade por hemorragia pulmonar
10 psi	Colapso de edificações comerciais e de processo e de suportes de tubulações	Danos aos tecidos do pulmão
15 psi	Estruturas de concreto são severamente danificadas	Ruptura de tímpano em cerca de 99% dos indivíduos
20 psi	Estruturas de concreto são severamente danificadas, com risco de demolição	99% de possibilidade de fatalidade por hemorragia pulmonar
55 psi	Demolição e colapso generalizado de estruturas	Fatalidades se aproximam de 100%

O comportamento das explosões depende de vários fatores, como as propriedades físico-químicas do material explosivo, a natureza das fontes de ignição, a taxa de liberação de material combustível e a quantidade de energia liberada. Por ser um efeito complexo, seu comportamento é ainda mais difícil de caracterizar.⁴ Entretanto, as mesmas medidas de controle de materiais combustíveis e fontes de ignição aplicáveis para incêndios também se aplicam para as explosões. Medidas de combate ao fogo podem não ser efetivas. Podem ser necessárias medidas adicionais como proteção física e enclausuramento de equipamentos com risco de explosão para diminuir o impacto de ondas de pressão e projeção de estilhaços.⁵²

Quando explosões ocorrem, normalmente causam maior perda de vida humana do que os incêndios. Mesmo assim, seu potencial de risco ainda é menor do que o apresentado pelos eventos que resultam em liberação de materiais tóxicos.⁴²

4. O Futuro da QRA

Apesar das limitações existentes na metodologia de QRA e dos resultados nem sempre representarem uma descrição exata da realidade, essa ainda é uma das ferramentas mais precisas disponível para avaliação dos riscos e consequências de processos complexos. Nos próximos anos, serão necessárias ferramentas de simulação mais precisas, capazes de incluir conceitos mais rigorosos de risco, fatores humanos e suas influências, efeitos dominó e outros cenários de risco mais complexos. A integração das ferramentas de QRA com a simulação de processos pode auxiliar na determinação dos riscos de novos processos e projetos, além de prever cenários de risco em processos existentes.⁵³ Apesar dos avanços tecnológicos na área, um nível satisfatório na identificação e prevenção dos riscos está longe de ser alcançado.

A indústria química ainda está aprendendo

a integrar seus conhecimentos com ferramentas de confiabilidade e análise de riscos, criando um banco de dados que irá auxiliar no projeto, construção e operação de processos a curto e longo prazo. Uma maior integração da indústria com a academia é necessária para que seja possível aplicar todo o conhecimento científico desenvolvido para os problemas reais das operações industriais. A propósito, a educação contínua do pessoal técnico e gerencial sobre os riscos existentes e ferramentas de análise e controle é uma forma de garantir o uso apropriado das ferramentas existentes.¹⁴

Ainda há muito a ser desenvolvido e aprimorado no campo da Segurança de Processos e análise de risco, como evidencia a ocorrência contínua de acidentes na indústria. Contudo, procede-se dizer que o número de acidentes teria sido muito maior sem o desenvolvimento da Engenharia de Segurança de Processos. A aplicação de técnicas de análise quantitativa e risco contribuiu para a redução nas fatalidades e lesões aos trabalhadores e ao público nos últimos 30 anos permitindo que as medidas de segurança sejam mais eficientes e assertivas.

5. Considerações Finais

O risco é definido como uma medida da perda econômica, dano humano ou dano ambiental; tanto da probabilidade de incidente, quanto da magnitude da perda ou lesão. Assim sendo, é importante conhecer quais são os possíveis impactos que um acidente pode causar para poder implementar as medidas necessárias.

A avaliação quantitativa dos riscos e a modelagem de consequências permitem estimar os efeitos de acidentes de dispersão de produtos tóxicos, incêndios e explosões, a partir do ponto de liberação, bem como seus efeitos sobre as pessoas e o meio ambiente. De posse desses dados, é possível determinar corretamente as zonas de risco e desenvolver planos de resposta à emergência adequados

para cada uma delas.

Apesar disso, a estimativa de risco não é o resultado mais importante de uma QRA. Esta é uma ferramenta para examinar os elementos de risco. Há uma infinidade de maneiras de reduzir os riscos, todavia os especialistas devem ser capazes de determinar quais medidas são mais efetivas. Utilizando esta ferramenta, poderão desenvolver medidas para redução dos riscos da operação da forma mais econômica possível.

A qualidade dos resultados dos estudos de QRA é limitada por diversos fatores, como a listagem incorreta dos possíveis cenários de risco, a indisponibilidade de informação necessária, as premissas adotadas para definição da frequência de ocorrência ou severidade de um evento, limitação de recursos pessoais e financeiros, e habilidades insuficientes da equipe condutora da análise.

Continuamente haverá uma demanda por mais informações e a QRA é uma fonte óbvia de subsídios informativos. Aliás, o estado da arte da QRA pode ser questionado como não desenvolvido o bastante para fornecer dados suficientemente úteis e precisos. No entanto, é provável que futuramente a incerteza das estimativas de QRA seja reduzida, pois os modelos devem se tornar mais fidedignos. Além disso, à medida que as pessoas envolvidas se familiarizarem com os pontos fortes e fracos da ferramenta, provavelmente serão capazes de usá-la com maior habilidade.

Glossário Técnico

CCPS – Center for Chemical and Process Safety (Centro para Segurança de Processos Químicos): O CCPS é uma organização corporativa sem fins lucrativos fundada em 1985 pelo Instituto Americano de Engenheiros Químicos. Ele reúne fabricantes, agências governamentais, consultores, acadêmicos e seguradoras para liderar o processo de melhoria contínua dos conhecimentos sobre a

segurança dos processos químicos e industriais.¹³

PHA – Process Hazard Analysis (Avaliação de Perigos do Processo): Abordagem de avaliação organizada e metódica com os objetivos de alcançar um consenso multidisciplinar sobre os riscos de um processo e seus controles, documentar os resultados da avaliação para uso futuro na gestão de mudanças, auxiliar no treinamento do pessoal de operação e manutenção e desenvolver os cenários que serão incluídos no planejamento de emergência.¹³ As metodologias de PHA mais utilizadas são o estudo de risco e operabilidade (HAZOP) e o método *What-If* ou a abordagem *What-If/Checklist*.¹²

Método *What-If*: A análise de *What-If* é uma abordagem de *brainstorming* em que um grupo de pessoas familiarizadas com o processo fazem perguntas sobre possíveis desvios ou falhas que podem ocorrer. Essas questões podem ser enquadradas como “E se?”, como em “E se a bomba falhar?”.⁴

Método *What-If/Checklist*: O método *What-If/Checklist* é um híbrido do método *What-If* e do método *Checklist*. Ele combina a característica sistemática do método *Checklist* com o recurso de *brainstorming* do método *What-If* para melhorar a qualidade da análise de risco. O método *What-If/Checklist* capitaliza os pontos fortes e compensa os defeitos de cada abordagem.⁴

HAZOP – Hazard and Operability Study (Estudo de Perigos e Operabilidade): Um HAZOP é um exame crítico formal e sistemático do processo e dos parâmetros de engenharia para instalações novas ou existentes para avaliar o potencial de mau funcionamento de equipamentos individuais e os consequentes efeitos sobre a instalação como um todo. Seu sucesso reside na força dessa metodologia ao seguir os Diagramas de Fluxo de Processo (PFD) de um sistema e os Diagramas de Tubulação e Instrumentação (P&ID), quebrando o processo em seções gerenciáveis com limites definidos chamados nós, garantindo assim a análise de cada peça de equipamento em um processo.⁴

FMEA – Failure Mode and Effects Analysis (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos):

Uma FMEA avalia as maneiras em que o equipamento falha e a resposta do sistema à falha. O foco da FMEA é em falhas de equipamento único e falhas no sistema.⁴

PFD – Process Flow Diagram (Diagrama de Fluxo do Processo): O PFD contém a maior parte dos dados de engenharia química necessários para o projeto de um processo químico, como os principais equipamentos, os fluxos de processo, os sistemas de utilidades e os principais sistemas de controle de processos.⁵⁴

P&ID – Piping & Instrumentation Diagram (Diagramas de Tubulação e Instrumentação):

O P&ID fornece as informações necessárias aos engenheiros para iniciar o planejamento da construção da planta. O P&ID inclui todos os aspectos mecânicos e de automação da planta, com exceção dos valores das correntes de processo, os caminhos de tubulação e o posicionamento dos equipamentos na planta baixa.⁵⁴

Referências Bibliográficas

¹ Moseman, J. Process Safety: A Wicked Problem? *Process Safety Progress* **2016**, *36*, 14. [CrossRef]

² Sanders, R. E.; *Chemical Process Safety: Learning from Case Histories*. 3a. ed. Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 0-7506-7749-X.

³ Crow, D. A.; Louvar, J. L.; *Segurança de Processos Químicos: Fundamentos e Aplicações*. 3a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

⁴ Lees, F. P.; *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. 2a. ed. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, v. 1, 1996.

⁵ Marsh & McLennan. The 100 Largest Losses 1974-2013. *Loss Prevention*, n. 23, p. 1-42, February 2014. [Link]

⁶ Lees, F. P.; *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. 2a. ed. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, v. 3, 1996.

⁷ CCPS. Bhopal: The Worst Industrial Disaster in History. *Process Safety Beacon*, Dezembro 2014. [Link]

⁸ CCPS. *The Business Case for Process Safety*. American Institute of Chemical Engineers. New York, p. 16. 2006. [Link]

⁹ CCPS. What is "Process Safety"? *Process Safety Beacon*, Julho 2008. [Link]

¹⁰ Bureau of labor statistics. *2015 Census of Fatal Occupational Injuries*. United States Department of Labor. Washington. 2016. [Link]

¹¹ Mataqi, I. Y.; Adivi, B. S. S.; *Process Safety vs. Personal Safety: Can't We Get Along with One?* Las Vegas: American Society of Safety Engineers, 2013. [Link]

¹² Baybutt, P. On the Ability of Process Hazard Analysis to Identify Accidents. *Process Safety Progress* **2003**, *22*, 191. [CrossRef]

¹³ CCPS. *Diretrizes para Segurança de Processos Baseada em Risco*. 1a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

¹⁴ CCPS. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. 2a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 2000.

¹⁵ Sellami, I.; Nait-Said, R.; Izarra, C.; Chetehouna, K.; Zidani, F. Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II: Case study in an Algerian gas industry. *Process Safety and Environmental Protection* **2018**, *116*, 771. [CrossRef]

¹⁶ Kukkonen, J.; Nikmo, J.; Riikonen, K. An improved version of the consequence analysis model for chemical. *Atmospheric Environment* **2017**, *150*, 198. [CrossRef]

¹⁷ Khan, F. I.; Abbasi, S. A. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **1998**, 261. [CrossRef]

¹⁸ Baesi, S.; Abdolhamidzadeh, B.; Hassan, C. R. C.; Hamid, M. D.; Reniers, G. Application of a multi-plant QRA: A case study investigating the risk impact of the construction of a new plant on an existing chemical plant's risk levels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **2013**, *26*, 895. [CrossRef]

¹⁹ Carrari, C. L.; Aparicio, L. V.; Bandoni, J. A.; Tonelli, S. M. Utilización de Modelos de

- Dispersión Atmosféricas para la Estimación de Dosis de Exposición. *Mecánica Computacional*, Bariloche, v. XXIII, p. 1743-1759, Novembro 2004. [Link]
- ²⁰ Uijt de Haag, P. A. M.; Ale, B. J. M. Guidelines for quantitative risk assessment. Em: *Series on Dangerous Substances (Purple Book)*. Amsterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, v. 3, 2005. p. 234.
- ²¹ CCPS. *Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases*. 1a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 1999.
- ²² CCPS. *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*. 1a. ed. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 2009.
- ²³ Papazoglou, I. A.; Nivolianitou, Z.; Aneziris, O.; Christou, M. Probabilistic safety analysis in chemical installations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **1992**, *5*, 181. [CrossRef]
- ²⁴ Sciver, G. R. V. Quantitative risk analysis in the chemical process industry. *Reliability Engineering & System Safety* **1990**, *29*, 55. [CrossRef]
- ²⁵ CCPS; *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis*. 1a. ed. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 2014.
- ²⁶ Van Den Bosch, C. J. H.; Weterings, R. A. P. M.; Methods for the Calculation of Physical Effects due to releases of hazardous materials (Liquids and Gases). Em: *Series on Dangerous Substances (Yellow Book)*. 3a. ed. Amsterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2005. p. 127.
- ²⁷ Dharmavaram, S.; Hanna, S. R.; Hansen, O. R. Consequence analysis – Using a CFD model for industrial sites. *Process Safety Progress* **2005**, *24*, 316. [CrossRef]
- ²⁸ Loy, Y. Y.; Rangaiah, G. P.; Lakshminarayanan, S. Surrogate Modelling for Enhancing Consequence Analysis based on Computational Fluid Dynamics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **2017**, *48*, 173. [CrossRef]
- ²⁹ CCPS; *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models*. 2a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 1996.
- ³⁰ Obukhov, A. M. Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. *Boundary-Layer Meteorology* **1971**, *2*, 7. [CrossRef]
- ³¹ Pasquill, F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *Meteorology Magazine* **1961**, *90*, 33.
- ³² Hanna, S. R.; Britter, R. E.; *Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial and Urban Sites*. 1a. ed. Nova York: Center for Chemical and Process Safety, 2002.
- ³³ Cook, J.; Woodward, J. L. A new unified model for jet, dense, passive and buoyant dispersion including droplet evaporation and pool modelling. *International Conference and Exhibition on Safety, Health and Loss Prevention in the Oil, Chemical and Process Industries*, Singapore, February 15-19, 1993. [Link]
- ³⁴ NOAA. Public Exposure Guidelines. Disponível em: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/public-exposure-guidelines.html>>. Acesso em: 18 Setembro 2017.
- ³⁵ NOAA. Acute Exposure Guideline Levels. Disponível em: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/acute-exposure-guideline-levels-aegls.html>>. Acesso em: 18 Setembro 2017.
- ³⁶ NOAA. Emergency Response Planning Guidelines. Disponível em: <https://response.restoration.noaa.gov/erpgs>>. Acesso em: 18 Setembro 2017.
- ³⁷ NOAA. Immediately Dangerous to Life and Health Limits. Disponível em: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/immediately-dangerous-life-health-limits-idlhs.html>>. Acesso em: 18 Setembro 2017.
- ³⁸ Mohan, M.; Gurjar, B. R. Sensitivity Analysis of Probits with respect to Quantitative Risk Assessment of Airborne Toxic Chemicals using IITD-QRA Model. *International Journal of Environment and Waste Management* **2010**, *6*, 345. [CrossRef]

- ³⁹ CCPS.; *Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases*. 1a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 1995.
- ⁴⁰ Pienta, G. *Fire Protection Systems*. 3a. ed. Rosemont: American Society of Plumbing Engineers, 2016.
- ⁴¹ CIBSE. *CIBSE Guide E - Fire Safety Engineering*. 3a. ed. London: Chartered Institution of Building Services Engineers, 2010.
- ⁴² LEES, F. P. *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. 2a. ed. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, v. 2, 1996.
- ⁴³ CCPS. *Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities*. 1a. ed. Nova York: American Institute of Chemical Engineers, 2003.
- ⁴⁴ Todd, C. S. *Comprehensive Guide to Fire Safety*. 1a. ed. London: BSI Standards Ltd., 2008.
- ⁴⁵ BSI. *BS EN2: Classification of fires*. London: British Standards Institution, 1992.
- ⁴⁶ NFPA. *NFPA 10: Standard for Portable Fire Extinguishers*. Quincy: National Fire Protection Association, 2018.
- ⁴⁷ CCPS. *Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases*. 2a. ed. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- ⁴⁸ CCPS. *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards*. 2a. ed. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 2010.
- ⁴⁹ Sellami, I.; NAIT-Said, R.; Izarra, C.; Chetehouna, K.; Zidani, F. Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part I: Model description and validation. *Process Safety and Environmental Protection* **2018**, *116*, 736. [CrossRef]
- ⁵⁰ Birk, A. M., Davison, C., Cunningham, M. Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **2007**, *20*, 194. [CrossRef]
- ⁵¹ Glasstone, S.; Dolan, P. J.; *The effects of nuclear weapons*. 3a ed. U.S. Washington: Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, 1977.
- ⁵² Eckhoff, R. K.; *Explosion Hazards in the Process Industries*. 1a. ed. Houston: Gulf Publishing Company, 2005.
- ⁵³ Pasman, H.; Reniers, G. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **2014**, *28*, 2. [CrossRef]
- ⁵⁴ Turton, R.; Bailie, R. C.; Whiting, W. B.; Shaeiwitz, J. A. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 3a. ed. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall PTR, 1998.