

Análise de Risco: estado da arte da metodologia Hazop generalizada, aplicações e perspectivas na indústria de processos

Risk Analysis: A generalized Hazop methodology state-of-the-art, applications, and perspective in the process industry

RESUMO

Miguel Angel de la O Herrera^{1,II,*}

Aderval Severino Luna^I

Antonio Carlos Augusto da Costa^I

Elezer Monte Blanco Lemes^{II}

Introdução: O Estudo de Perigos e Operabilidade (Hazop) é considerado uma ferramenta para avaliação de riscos, na qual tecnologias complexas exigem novas estratégias para garantir a eficiência, a segurança e a qualidade dos produtos. **Objetivo:** Realizar uma revisão de publicações do Hazop, para estabelecer o estado da arte, os procedimentos e as suas perspectivas na indústria farmacêutica. **Método:** O procedimento Hazop e suas adequações para satisfazer as necessidades atuais foram estruturados. Posteriormente, aplicações e integração com outras ferramentas de risco e sistemas expertos foram analisadas para definir a abordagem atual e perspectivas futuras. **Resultados:** A revisão permitiu a compreensão de que modelos, simulações e *software* especializado oferecem suporte para avaliar riscos em processos complexos. Adicionalmente, a correta definição de causas e consequências depende do uso de sistemas expertos, cujas simulações adquirem experiência através da criação de bancos de dados, reduzindo a necessidade de conhecimento específico do processo, que é uma limitação da metodologia Hazop convencional. **Conclusões:** A revisão do estado da arte do Hazop destacou a importância de avaliar riscos dentro da indústria de processos. No entanto, novas tecnologias utilizadas para atender quesitos regulatórios de segurança e qualidade precisam da melhoria contínua da metodologia Hazop, reduzindo a dependência de especialista por meio do uso de sistemas especializados.

PALAVRAS-CHAVE: Hazop; Avaliação de Risco; Análise de Perigo do Processo; Desvio; Perigo

ABSTRACT

Introduction: The Hazard and Operability Study is considered a feasible tool to assess risks, where complex technologies, require new strategies to guarantee efficiency, safety, and quality of products. **Objective:** To perform a Hazop publications review, to establish the state of the art, current procedures and perspectives in the pharmaceutical industry. **Method:** Hazop methodology and improvements to satisfy actual needs were structured. Subsequently, its application and integration with other risk tools, and experts systems, were analyzed to define the current approach and future perspectives. **Results:** The review allowed the understanding where models, simulations and specialized software offered adequate support to assess risk in current complex processes. In addition, an efficient definition of causes and consequences depends of expert systems, where simulations acquire experience through the creation of databases, reducing the need of specific process knowledge, which is a typical limitation of the conventional Hazop methodology. **Conclusions:** A review of the Hazop state-of-the-art highlighted the importance to assess risks within the process industry. However, the use of new technologies designed to meet regulatory affairs to guarantee safety and quality principles would require the ongoing improvement of the Hazop methodology, restricting the dependence of specialists, and increasing the use of expert systems.

^I Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

^{II} Instituto de Tecnologia em Imunobiológicos (Bio-Manguinhos), Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), Rio de Janeiro, RJ, Brazil

* E-mail: miguel.angel@bio.fiocruz.br



INTRODUÇÃO

É bem conhecido o fato de que a indústria farmacêutica segue um dos mais altos padrões de regulação em nível nacional e internacional devido ao impacto que seus produtos têm sobre a saúde humana. Nesse caso, as regulações são usadas para garantir a prevenção, o diagnóstico, o tratamento ou a cura de uma doença. Portanto, os níveis de segurança e eficácia são cruciais para a obtenção dos melhores resultados possíveis dentro do esquema de tratamento apropriado¹. Assim, a indústria farmacêutica tem sido um ator importante na indústria tradicional, a fim de atender com sucesso às novas exigências, com um fator decisivo sendo a promoção de agências reguladoras para a adoção de novas tecnologias e metodologias de produção, análise e controle que visam reduzir o possível impacto negativo de um produto não-conforme na saúde do paciente ou usuário final. Considerando que a vigilância sanitária inclui a ciência e as atividades relacionadas à detecção, avaliação, compreensão e prevenção de eventos adversos ou qualquer outro problema relacionado a fármacos desde o processo produtivo até sua comercialização, ela permite a definição do perfil de segurança dos medicamentos comercializados. Desta forma, reações adversas, usos inadequados, falhas terapêuticas e complicações não detectadas durante a fase de pesquisa de drogas e processo de produção podem ser detectados. Existem várias metodologias com potencial para serem utilizadas a fim de garantir a qualidade dos produtos². Entretanto, em relação ao processo de produção, é necessário estabelecer uma ferramenta potencial que possa levar a uma análise de risco de processo viável. Na última década, a indústria de processo foi consideravelmente auxiliada pelo uso de tecnologia complexa, responsável pela transformação de matérias-primas em produtos. No entanto, é fato que a melhoria tecnológica está geralmente relacionada a falhas inesperadas, que não foram consideradas durante a avaliação de risco em processos anteriores ou semelhantes. Além disso, tais falhas poderiam ser ignoradas e subestimadas devido à falta de conhecimento ou pela aplicação incipiente de metodologias de análise de risco³. Assim, especialistas em gestão de risco concordam que, para evitar falhas nos processos de fabricação é preciso reduzir e eliminar (quando possível) os fatores que levam a falhas. Consequentemente, a identificação e a correção de falhas durante a concepção e o desenho de projetos tornaram-se uma missão para especialistas em risco⁴. Se definirmos perigos como resultado da interação inesperada de componentes ou métodos de operação em condições excepcionais, somente a integração do conhecimento dos especialistas envolvidos no projeto pode assegurar que sejam evitados eventos indesejados em novas instalações⁵. A implementação de medidas de controle também é uma estratégia comum usada para garantir que um processo funcionará como desejado, mesmo que a conjunção de circunstâncias possa levar a falhas⁶. Essa é a principal razão pela qual se está aplicando experiência profissional para analisar aspectos particulares de um projeto e avaliar falhas em estágios iniciais de projetos com maior frequência⁷. A promoção de ações eficazes de prevenção no projeto de instalações de processos industrial segue a aplicação e o monitoramento constante de regulações internacionais, em que os padrões internacionais e

locais e Boas Práticas de Engenharia (BPE) podem ser poderosos aliados. A estrutura dessas questões regulatórias é apoiada por conhecimento técnico e ampla experiência de profissionais profundamente envolvidos oriundos da indústria de processos⁸. No entanto, a aplicação de tais padrões não é uma tarefa fácil, porque somente engenheiros de processo e gerentes envolvidos diretamente no processo ou em instalações semelhantes podem entender o escopo e o fundamento de tais regulações e o impacto em seus processos quando aplicados⁹.

Portanto, é assim que os estudos de perigos e operabilidade (Hazop) fornecem ao grupo de especialistas um procedimento estruturado para desenvolver uma análise de risco sistemática e abrangente¹⁰. A metodologia Hazop pode ser definida como uma análise de processo estruturada e sistemática, que pode ser aplicada em estágios iniciais do projeto, como a concepção e etapas básicas, até as fases operacionais e pós-operacionais. Essa metodologia é amplamente utilizada na indústria de processos para identificar e avaliar falhas que podem levar a riscos potenciais para o pessoal e o equipamento envolvidos no processo, bem como a falhas que impedem uma operação eficiente ou são responsáveis por operações anormais.

Breve história do estudo de perigos e operabilidade

Um grupo de engenheiros da divisão de Química Orgânica Pesada da ICI estava encarregado de desenvolver uma versão preliminar da metodologia Hazop (HAZard and OPerability) em meados da década de 1960¹¹. No entanto, foi apenas em 1974 que o desastre de Flixborough, em North Lincolnshire, Inglaterra, causado por uma explosão em uma fábrica química perto da vila, em que 28 pessoas morreram e pelo menos 36 ficaram feridas, levou ao uso de técnicas de prevenção de risco¹². Na época, um curso de segurança oferecido pela Instituição de Engenheiros Químicos (IChemE) no Teesside Polytechnic (hoje Universidade de Teesside) incluiu o procedimento Hazop simples para guiar e possivelmente determinar as falhas que levaram ao incidente de Flixborough. Como resultado, a primeira publicação considerando o estudo de Hazop apareceu no mesmo ano¹³, e finalmente a Associação de Indústrias Químicas publicou um primeiro guia Hazop em 1977. Até então, o termo Hazop não era usado em publicações formais.

O principal defensor da metodologia Hazop foi Trevor Kletz¹⁴. Para realizar seu trabalho, Kletz aproveitou as anotações do curso IChemE (revisadas e atualizadas) e estruturou uma metodologia Hazop padrão, que foi usada até recentemente.

Assim, o conceito que afirma que a metodologia Hazop é uma técnica básica para identificar os riscos que podem ocorrer ao pessoal, ao equipamento, ao meio ambiente e/ou aos objetivos da organização começou a ganhar força¹⁵. Com isso, a formação técnica que caracterizou os estudos de perigos e operabilidade tornou-se uma parte esperada dos cursos de graduação em engenharia química em países como o Reino Unido e os Estados Unidos¹⁶. Ademais, embora esse método tenha sido



inicialmente desenvolvido para analisar sistemas de processos químicos, posteriormente ele se espalhou para praticamente qualquer área de conhecimento.

Aplicação da metodologia Hazop

Equipe Multidisciplinar

A execução de um estudo preciso do Hazop requer vários documentos técnicos e informações específicas do processo. Após a coleta de dados, uma equipe multidisciplinar tem a responsabilidade de analisar e projetar documentos de operação, como diagramas de tubulação e instrumentação (P&ID), diagramas de fluxo de processo (PFD), fluxogramas de materiais e manuais de operação (entre outros) descrevendo o sistema estudado¹⁷.

Dependendo do escopo e da profundidade da análise, uma equipe multidisciplinar básica de estudo Hazop deve considerar: a) um líder do estudo, responsável por definir a extensão da análise, a equipe de especialistas em Hazop e planejar e liderar as reuniões do Hazop; b) um gerente de projeto, responsável por elaborar um cronograma Hazop, agendar reuniões, analisar documentos e elaborar o relatório Hazop, acompanhar ações e monitorar as medidas de controle; c) um engenheiro de processos, especialista em processos responsável pelo processo em estudo; d) um engenheiro de instrumentos; e) um engenheiro de operações ou comissionamento. Portanto, a equipe multidisciplinar deve ter conhecimento específico do processo e ser capaz de identificar possíveis desvios. Esse grupo também deve ser capaz de definir as causas e

consequências de todos os desvios possíveis de uma operação normal que poderiam surgir em uma unidade da planta e propor ações com o objetivo de reduzir o impacto dos desvios¹⁸. Essa é a principal razão pela qual a equipe multidisciplinar deve ter amplo conhecimento de projeto, operação e manutenção na planta de processo¹⁹.

O procedimento Hazop

Após a análise dos dados técnicos, a equipe multidisciplinar deve estabelecer as “palavras-guia primárias”, mais conhecidas como parâmetros de processo. Além disso, a experiência de eventos passados em sistemas semelhantes é necessária para justificar a identificação de “palavras-guia secundárias” ou desvios e seus efeitos no sistema em estudo^{20,21}. Após a identificação dos riscos, gravidade e probabilidade de eventos, os índices permitem calcular o nível de risco de cada desvio. Um exemplo de matriz dos parâmetros de processo mais comuns e seus desvios é mostrado na Tabela 1.

Uma vez concluída a identificação de consequências ou riscos inaceitáveis, pode ser necessária uma lista de recomendações e ações para melhorar o processo ou evitar perigos²². O processo tradicional do estudo Hazop, considerando a relação entre a informação do processo e a identificação dos riscos, é mostrado na Figura 1²³. Autores acompanharam esse processo para apoiar a identificação de desvios em elementos críticos e estabelecer pontos prioritários para qualificação em uma instalação para produção de biomassa recombinante. A definição de pontos críticos para qualificação foi realizada em

Tabela 1. Exemplo de matriz de parâmetros e palavras-guia como os desvios mais comuns.

Parâmetro	Palavras-guia						
	Mais	Menos	Nenhum	Reversa	Parte de	Assim como	Outros que
Fluxo
Temperatura
Pressão
Nível de líquido
Volume
Mistura
Composição
Reação
pH

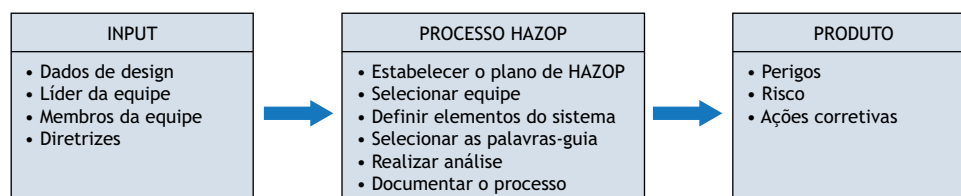


Figura 1. Procedimento de identificação de risco usando a metodologia Hazop.



resposta aos requisitos regulatórios criados pelas agências reguladoras brasileiras²⁴.

Como mencionado, a aplicação correta da metodologia Hazop requer uma equipe multidisciplinar dedicada e as reuniões de discussão geralmente são um processo demorado. De acordo com isso, um procedimento estruturado deve ser seguido para manter o foco e a objetividade ao longo do estudo. Ericson²³ recomendou um procedimento fácil de seguir para aplicar a metodologia Hazop:

- Definição do Sistema.** O primeiro passo é definir o escopo e os limites do sistema.
- Planejamento.** Estabelecer os objetivos da análise Hazop; estabelecer planilhas, cronograma etc. Dividir o sistema em unidades menores para análise. Devem ser definidos os itens a serem analisados.
- Ações da equipe multidisciplinar.** Identificar um líder de equipe e atribuir responsabilidades a todos os membros. Cada membro deve ser especialista em uma área técnica relacionada ao processo.
- Adquirir informações.** Todas as informações técnicas relacionadas ao processo ou unidade devem ser coletadas e usadas para a análise (P&ID, PFD, manuais, descrições técnicas etc.)
- Execução de Hazop.** Identificar os itens a serem avaliados, identificar parâmetros, definir uma palavra-guia (desvio), estabelecer causas, efeitos e recomendações.
- Responsabilidades.** Atribuir responsabilidade por implementar ações para reduzir os níveis de risco.
- Monitoramento.** Revisar as medidas propostas do Hazop para garantir que as ações sejam implementadas.
- Documento.** Fazer registros do processo Hazop a ser usado em análise posterior.

Finalmente, deve ser feito o relatório Hazop, incluindo cada um dos elementos da metodologia e descrevendo a análise realizada pela equipe multidisciplinar. Na Tabela 2, é mostrado o modelo-padrão do relatório Hazop.

MÉTODO

A metodologia Hazop na última década

Procedimento de busca e análise de publicações com enfoque na metodologia

O Science Direct é um importante banco de dados bibliográficos de conteúdo multidisciplinar do grupo Elsevier, fornecendo artigos de mais de 2.500 revistas científicas e artigos de mais de 11.000 livros. Em janeiro de 2010, foram contabilizados mais de 9,5 milhões de documentos de alta qualidade científica e, recentemente, foram estimados mais de 15 milhões de documentos, destacando temas como Ciências Físicas e Engenharia, Ciências da Vida, Ciências da Saúde, Ciências Sociais e Humanas, entre outros. A pesquisa de documentos é uma ferramenta muito poderosa e sofisticada, que permite recuperar uma grande quantidade de informações relevantes, dependendo dos termos usados na pesquisa. Com base no escopo e na multidisciplinaridade da plataforma, restringimos o material utilizado em nossa pesquisa considerando artigos exclusivos da Science Direct. Dessa forma, para realizar esse trabalho, primeiro definimos quais seriam as *palavras-chave* que usaríamos como entrada no mecanismo de pesquisa. O consenso do grupo concluiu que devemos usar, além da palavra principal (Hazop), palavras relacionadas diretamente a “Processos” “Novas Tendências”, “Aplicações”, “Procedimentos”, “Ciências da Saúde”, “Indústria Farmacêutica” e “Biotecnologia”. Por fim, o sistema Science Direct tem a capacidade de filtrar resultados considerando a relevância e a data de publicação. É importante ressaltar que foram considerados apenas artigos e publicações em que o principal tema de pesquisa é a metodologia Hazop. Como foi observado, várias publicações mencionaram essa ferramenta como uma das possíveis metodologias que poderiam ser utilizadas, sem aprofundar sua potencial aplicação ou aprimoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma retrospectiva Hazop

Desde que foi criada em meados da década de 1970, a metodologia Hazop tem sido amplamente utilizada na indústria de

Tabela 2. Layout do relatório Hazop para caracterização de risco.

Relatório n.											
Empresa			Processo			Equipamentos Relacionados			Data:		
Equipe multidisciplinar						Objetivo do Processo					
Nó n.											
ID	Parâmetro	Desvio	Causas	Controles	Efeitos	Gravidade	Frequência	Nível de risco	Ações	Responsável	
1											
2											
.											
.											
n											



processos como uma ferramenta confiável para avaliação de risco. É por isso que um grande número de artigos publicados descrevendo estudos de caso e referindo-se a esta metodologia foram publicados. Swann e Preston²⁵ descreveram a evolução histórica da metodologia Hazop. Em seu trabalho é apresentado o uso dessa metodologia desde o final da década de 1960 até 1995, sendo o primeiro trabalho a fazer este tipo de pesquisa. Entretanto, não foi o único trabalho que mencionou a evolução histórica das publicações referentes à metodologia Hazop. Como segundo exemplo, Marhavidas et al.²⁶ pesquisaram sobre análise de risco e metodologias de avaliação durante uma década, começando no início de 2000 até o fim de 2009. Finalmente, Dunjó et al. fizeram uma das pesquisas mais intensivas de publicações nas quais a metodologia Hazop foi aplicada na indústria de processos desde sua concepção (década de 1960) até o início de 2009.

Aplicações da metodologia Hazop na última década

No fim de 2016, foi concebida a ideia da realização de uma revisão de publicações da metodologia Hazop nos últimos dez anos, com o objetivo de estabelecer o que há de mais avançado e as perspectivas dentro da indústria de processos. Por esse motivo, o período considerado neste trabalho incluiu a década entre 2005 e 2015.

Como pode ser observado na Tabela 3, 55 artigos descrevendo a metodologia Hazop como ferramenta de avaliação de risco foram publicados nesse período. Embora o número de publicações tenha permanecido constante ao longo dos anos, o número de publicações aumentou substancialmente no ano de 2012. Uma possível explicação para esse aumento é o uso de ferramentas computacionais e o desenvolvimento de modelos de simulação realizados por especialistas em risco, visando simplificar sua aplicação e reduzir o tempo e os recursos para sua execução. Portanto, é possível notar que a maioria das publicações do Hazop se refere à modelagem e simulações que foram projetadas para facilitar o processo de implementação da metodologia por processamento de dados e tomada de decisões automatizada. Completando a retrospectiva da última década, na mesma Tabela são mostradas as áreas de conhecimento responsáveis por gerar mais artigos sobre o assunto. É possível notar que as áreas de engenharia química, informática, engenharia, energia e meio ambiente publicaram mais artigos sobre a metodologia Hazop do que as outras áreas tecnológicas²⁸. Isto não é surpreendente, uma vez que essa metodologia é comumente descrita como uma técnica usada para detectar situações inseguras em plantas industriais causadas por desvios em equipamentos e operações de processo anormais. Por fim, na mesma Tabela são apresentadas possíveis aplicações em áreas não relacionadas à engenharia, como

Tabela 3. Publicações de periódicos da metodologia Hazop como assunto de estudo de 2005 a 2015.

2005	Artigos	2011	Artigos
<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	4	<i>Education for Chemical Engineers</i>	1
2006		<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	2
<i>Computer Aided Chemical Engineering</i>	1	<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	1
<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	1	<i>Fuel Cells Bulletin</i>	1
2007		2012	
<i>Computer Aided Chemical Engineering</i>	1	<i>Computer Aided Chemical Engineering</i>	4
<i>Tsinghua Science & Technology</i>	1	<i>Procedia Engineering</i>	4
<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	1	<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	2
2008		<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	2
<i>Computer Aided Chemical Engineering</i>	2	<i>Computers & Chemical Engineering</i>	1
2009		<i>Reliability Engineering & System Safety</i>	1
<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	1	2013	
<i>Computer Aided Chemical Engineering</i>	1	<i>Computer Aided Chemical Engineering</i>	1
<i>Computers & Chemical Engineering</i>	1	<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	1
<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	1	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	1
<i>Systems Engineering - Theory & Practice</i>	1	<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	2
2010		<i>Fusion Engineering and Design</i>	1
<i>Computer Aided Chemical Engineering</i>	1	2014	
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	1	<i>Reliability Engineering & System Safety</i>	1
<i>Computers & Chemical Engineering</i>	1	<i>Journal of Natural Gas Science and Engineering</i>	1
<i>Annals of Nuclear Energy</i>	1	2015	
<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	1	<i>Procedia Earth and Planetary Science</i>	1
<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	1	<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	4
		<i>Engineering Applications of Artificial Intelligence</i>	1



negócios e educação, nas quais o uso da metodologia auxiliou na identificação de desvios, mensuração de impactos e ações de controle para reduzir os efeitos adversos dos eventos.

A aplicação da metodologia Hazop em processos industriais não mudou significativamente o seu procedimento ao longo dos anos, porque a maioria das aplicações da metodologia Hazop teve como objetivo avaliar riscos em sistemas críticos, ou quando foi necessário analisar sistemas que buscam uma melhoria contínua.

Como exemplo, Hashemi-Tilehnoee et al.²⁹ identificou desvios e propôs medidas para reduzir riscos em um resfriamento de reator seguindo o procedimento tradicional da metodologia. Em um caso semelhante, Jose et al.³⁰ aplicaram a metodologia e identificaram desvios e possíveis efeitos durante o desempenho da equipe operacional em um processo de usinagem de descarga elétrica. Somado a isso, a nova abordagem proposta, que é a integração da avaliação de riscos humanos e de equipamentos, possibilitou preservar a integridade de um sistema por meio da análise de risco. Johnson³¹ sugeriu em seu trabalho que a redução de risco poderia ser facilmente alcançada se os parâmetros de impacto e frequência fossem estabelecidos considerando a ordem particular de magnitude. Por meio de sua proposta, foram alcançadas uma melhor avaliação de riscos e sua redução para um nível aceitável de modo a atender aos requisitos regulatórios. Mohammadfam et al.³² apresentaram outro caso em que a aplicação do estudo de risco e operacionalidade em uma unidade de ácido graxo de uma empresa de petróleo permitiu avaliar os riscos à saúde e à segurança do meio ambiente. Como resultado de seu trabalho, os autores estabeleceram um procedimento rápido e eficiente para identificar desvios e promover a implementação de medidas de mitigação.

O uso da metodologia Hazop em estágios iniciais de projetos (conceitual e design básico preferencialmente) poderia trazer a oportunidade de evitar riscos e propor ações de resposta em casos em que apenas baixos níveis de risco podem ser aceitos ou quando os recursos econômicos são restritos. É o caso de Hu et al.³³ em que uma análise de sistemas com vários componentes foi usada para identificar riscos. Essa estratégia possibilitou concluir que falhas nos procedimentos de manutenção preventiva de elementos críticos em um sistema de múltiplos componentes foram facilmente detectadas, simplificando a promoção de medidas para reduzir os riscos nos equipamentos envolvidos. O controle de frequência de eventos é outra abordagem comum para avaliar riscos. Duisings et al.³⁴ realizaram uma análise de risco em obturadores de uma Hot Cell Facility para identificar os pontos fracos dos procedimentos de manutenção atuais. O grupo especialista também estabeleceu recomendações de projeto e operacionais para evitar riscos, reduzindo a possibilidade de ocorrência. Em uma análise Hazop dentro da infraestrutura de uma instalação de produção de petróleo, Pérez-Marín e Rodríguez-Toral³⁵ mostraram os critérios gerais de aceitação de riscos na indústria de petróleo e gás do México. Os autores também demonstraram que o comportamento de risco é geralmente classificado em níveis aceitáveis, aumentando, nesse caso, a confiabilidade do sistema. Eles também concluíram que a melhor maneira de estabelecer medidas de prevenção de riscos é analisando-as de acordo com uma

metodologia qualitativa. Silvainita et al.³⁶ também aplicaram a metodologia convencional Hazop como estratégia preliminar para investigar o risco baseado na tomada de decisão dos sistemas de ancoragem. Eles concluíram que, depois de avaliar os riscos, foi possível identificar riscos críticos e propor facilmente medidas para evitar desvios, a fim de garantir a segurança das estruturas flutuantes comumente usadas nas indústrias de petróleo e gás. A iniciativa de utilizar a metodologia Hazop em uma análise de falhas de um processo térmico de H₂ da unidade de produção de reator de membrana de sílica via reforma a vapor de metanol apresentada por Ghasemzadeh et al.³⁷ possibilitou a determinação de elementos críticos do processo. Essa análise também permitiu perceber a necessidade de instalar dispositivos de controle em pontos-chave do equipamento, visando aumentar a detecção de falhas. Kriaa et al.³⁸ utilizaram a metodologia como suporte para identificar desvios críticos relacionados à segurança do comportamento pretendido em sistemas de controle digital, mantendo a confidencialidade, a integridade, a disponibilidade e a autenticidade. Para Necci et al.³⁹ a aplicação de um estudo Hazop foi essencial para identificar o risco de eventos indesejáveis em instalações industriais próximas. Eles também foram capazes de promover ações para a eventualidade de tais eventos levarem a um efeito dominó que poderia ter influência negativa em mais de uma instalação de processo.

Considerando esse risco, especialistas concordam que o uso de mais de uma ferramenta de avaliação de risco pode levar a uma melhor identificação de riscos e, na maioria dos casos, as ferramentas de PHA são complementares. Além disso, é possível notar um número crescente de pesquisadores comparando a eficácia das metodologias. De acordo com o último fato, Rebelato et al.⁴⁰ desenvolveram um estudo comparativo da metodologia Hazop e a análise do modo de falha e dos efeitos (Failure Mode and Effects Analysis - FMEA). A comparação de ambas as metodologias ajudou a definir a ferramenta mais confiável em uma instalação de produção de bioetanol. A equipe também analisou os benefícios técnicos de ambas as metodologias, concluindo que a metodologia Hazop foi mais eficiente para detectar desvios técnicos do que o método FMEA.

Para a maioria dos especialistas, a metodologia Hazop é a ferramenta mais viável para identificar riscos em instalações químicas. Todavia, Baybutt⁴¹ realizou uma revisão da metodologia Hazop, estabelecendo as fraquezas desse método que geralmente os especialistas em risco ignoram. Entre as principais falhas, a dependência de conhecimento profundo e específico sobre o processo que é exigido pelo pessoal envolvido nos estudos de Hazop torna quase impossível a probabilidade de criar um grupo multidisciplinar para avaliar os riscos usando a metodologia Hazop em vários e diferentes processos. Kidam et al.⁴² também definiram as dificuldades para aplicar a metodologia em projetos durante a fase preliminar. Eles concluíram que, inicialmente, o principal obstáculo a ser superado é a falta de informações técnicas sobre o processo que é considerado a base para a realização dos estudos de Hazop.

Portanto, eles recomendaram a coleta de qualquer informação disponível sobre processos semelhantes, como documentos e



dados gravados, antes de aplicar uma metodologia Hazop. Eles também observam que a ausência de diagramas de fluxo de processo (que geralmente são gerados apenas nas fases de engenharia básica e de engenharia detalhada) é um impedimento para a aplicação dessa metodologia da maneira tradicional. O procedimento comum é baseado em descrições técnicas e recomendações devem ser implementadas antes de os componentes do projeto começarem a ser construídos.

Melhorando o procedimento da metodologia Hazop

A principal vantagem de usar a metodologia Hazop no estágio de desenho dos projetos é a oportunidade de aplicar medidas de redução de riscos sem gerar custos consideráveis para a empresa. Isso poderia ser alcançado propondo e implementando medidas para reduzir os impactos no sistema antes da fase de execução (construção), no entanto, a análise de risco também pode desempenhar um papel importante durante as etapas de comissionamento⁴³. A indústria de processos tem se concentrado ultimamente na tarefa de estabelecer critérios de seleção de parâmetros para garantir a definição útil dos nós do Hazop.

A estratégia de nós selecionados com base em sua funcionalidade é a nova abordagem que poderia atender a essa premissa.

Em estudos recentes, Rossing et al.⁴⁴ analisaram a funcionalidade dos principais elementos de uma Planta Piloto de Destilação de Recompressão de Vapor. A identificação dos nós foi realizada através da análise de diagramas de tubulação e instrumentos (P&ID) nos quais a equipe de especialistas definiu quatro principais nós funcionais. Em outra análise, Wu et al.⁴⁵ provaram que modelos de fluxo multinível (MFM) levam a uma rápida identificação de nós em uma planta de tratamento de resíduos líquidos. Segundo Mingda et al.⁴⁶, essa abordagem também foi confiável para analisar os componentes do sistema separadamente em um sistema de desidratação da estação de Oldfield United. Como resultado, foi fácil realizar um modelo de identificação de nós estruturado e preciso, facilitando o processo de análise de desvios.

A proposta de Boonthum et al.⁴⁷ estabelece um modelo estrutural usando uma matriz de balanços de massa e calor para definir a relação entre todas as variáveis de um sistema. A criação desse modelo simplificou a identificação de desvios existentes e a identificação de riscos potenciais que não foram considerados de antemão em análises de risco anteriores. Em sistemas altamente complexos, como os biorreatores usados na geração de biomassa para produzir insumos farmacêuticos, a identificação de nós pode ser desafiadora, devido ao alto número de componentes que a perfazem. Herrera et al.²⁴ aplicaram conceito de nós funcionais, em que foi usado um grupo de elementos de processo para realizar a mesma função final ou objetivo, como controle de pH, aquecimento, resfriamento etc., em uma linha de fermentação usada para a produção de biomassa recombinante. Esses elementos foram agrupados em um único nó e, posteriormente, analisados com o objetivo de reduzir o tempo necessário para a avaliação de riscos. O resultado desse processo leva à conclusão de que a maioria dos desvios identificados no sistema foram causados por fatores externos. Nessa instalação farmacêutica,

o fornecimento de serviços públicos e matérias-primas que não atendem aos parâmetros de operação necessários é a principal fonte de desvios. Pelo contrário, a alta automação do sistema permitiu a tomada de ações corretivas quase que imediatas caso os desvios aparecessem e até mesmo tomar ações para prevenir eventos quando um comportamento anormal dos parâmetros é detectado. No entanto, para Sauk et al.⁴⁸, a determinação da ordem ideal de identificação de nós pode ser uma tarefa difícil devido à falta de experiência ou quando uma sequência lógica de análise não é seguida. Em seu trabalho, eles usaram o comportamento do fluxo do processo da matriz para determinar a sequência de seleção e tratamento dos nós. Finalmente, eles concluem que um fluxo linear e contínuo ao longo do processo deve ser seguido; isso garantirá o gerenciamento de documentos e a compreensão do relacionamento entre os elementos críticos do sistema.

Integração entre Hazop e ferramentas de Análise de Perigos do Processo (Process Hazard Analysis - PHA)

A metodologia Hazop é essencialmente um método qualitativo, normalmente complementado por outras ferramentas de Análise de Perigos do Processo (PHA). A Avaliação Quantitativa de Riscos (Quantitative Risk Assessment - QRA) tem sido usada na indústria química para orientar a tomada de decisões para estabelecer arranjos e promover medidas de mitigação para tratar os riscos relacionados a processos químicos, transporte e armazenamento de substâncias perigosas⁴⁹.

Atualmente, um grande número de pesquisadores usa metodologias de gerenciamento de risco como suporte para aumentar a confiabilidade dos estudos de Hazop. Johnson³¹ provou os benefícios do uso de Estudos de Perigo e Operabilidade, Análise de Camada de Proteção (Layer of Protection Analysis - LOPA) e Nível de Integridade de Segurança (Safety Integrity Level - SIL). O principal objetivo dessa integração foi classificar os cenários de risco por meio da estimativa da ordem de grandeza do risco, facilitando a aplicação de medidas de redução. Liu et al.⁵⁰ também executaram um trabalho semelhante destacando a importância do uso de Hazop, SIL e LOPA para estabelecer limites de aceitação de risco para gerenciamento de extensão de vida em sistemas de plataformas de petróleo. No estudo liderado por Giardina e Morale⁵¹, a integração das metodologias FMECA e Hazop evitou a omissão de falhas em uma planta de regaseificação. O resultado foi alcançado através do estabelecimento de modos de falha e identificação de perigos através da análise de causas e efeitos de desvios nos parâmetros do processo, seguindo o procedimento normal de aplicação. Mohammadfam e Zarei⁵² estabeleceram o estudo de risco para uma planta de produção de hidrogênio usando uma combinação de Hazop e uma Análise Preliminar de Risco (Preliminary Risk Analysis - PRA) como métodos qualitativos.

Em seguida, utilizou-se uma ferramenta de Avaliação de Risco Quantitativa (Quantitative Risk Assessment - QRA) para quantificar o risco, aumentando assim a profundidade e cobertura da análise. É fato que a metodologia Hazop poderia ser complementada não apenas com os procedimentos convencionais



da PHA. Técnicas especializadas podem ser usadas em conjunto com os estudos de operabilidade para aumentar a robustez dos programas de segurança projetados para proteger pessoas, instalações e ambiente. É o caso das ferramentas de Engenharia de Segurança de Processos (Process Safety Engineering - PSE) e Engenharia de Proteção contra Incêndios (Fire Protection Engineering - FPE) propostas por Chen et al.⁵³. Ambas as técnicas foram usadas para aumentar o número de elementos a serem considerados durante a identificação de riscos para garantir a segurança e aproveitar os benefícios desses programas quando integrados às técnicas convencionais de avaliação de risco.

Novas tendências de aplicação de estudos Hazop usando modelagem, simulações e ferramentas assistidas por computador

Recentemente, uma nova estratégia tem sido usada nas indústrias de processo para implementar com sucesso a metodologia de análise Hazop, no entanto, é necessário cumprir as seguintes premissas.

1. Em primeiro lugar, a Instalação deve ser adequadamente projetada, em relação à experiência, ao conhecimento dos processos envolvidos e à aplicação dos padrões e códigos regulamentares.
2. Por outro lado, os materiais de construção devem ser adequados e a construção e montagem devem ser realizadas corretamente (instalações em operação).

No primeiro caso, novos processos são historicamente dependentes da experiência; esta questão tem sido considerada como a maior limitação da metodologia. Assim, esta é a razão pela qual os sistemas computacionais são atualmente amplamente utilizados, com o objetivo de evitar a dependência e a subjetividade da experiência por parte dos especialistas.

Por essa razão, uma abordagem recente da metodologia Hazop incluiu o uso de simulações computacionais mais conhecidas como sistemas especialistas. De acordo com Sharvia e Papadopoulos⁵⁴, a aplicação tradicional de Hazop se torna um desafio devido à maior complexidade dos sistemas modernos e ao potencial erro humano dos processos manuais. É por isso que o uso de sistemas computacionais fornece um suporte fiel para a tomada de decisões através do “*aprendizado*” de dados gerados a partir de simulações em estudos de caso.

Como mencionado por Chung et al.⁵⁵ a quantidade de dados gerados no estágio de engenharia e de operação de rotina dos projetos pode ser extensa, portanto, é obrigatório ter ferramentas automatizadas para analisar e processar com eficiência a grande quantidade de informações. Em resposta a essa demanda, os autores afirmam que o software HAZID é uma ferramenta viável que permite identificar os riscos através da análise qualitativa das unidades principais e/ou mais críticas representadas nos diagramas P&ID. Posteriormente, o software HAZID é capaz de correlacionar causas e consequências de possíveis falhas entre as unidades que compõem todo o sistema ou processo⁵⁶. A necessidade de desenvolver planos de contingência para responder a falhas em uma unidade de recuperação de enxofre foi

a motivação de Alaei et al.⁵⁷ para usar a metodologia Hazop. Para conseguir isso, eles usaram sistemas especialistas para facilitar o processo de análise e ajudar a determinar as medidas que podem ser tomadas pelo pessoal envolvido na operação para evitar incidentes e reduzir o impacto desses desvios. O desenvolvimento da simulação do sistema computacional aplicada aos estudos de Hazop tem estado presente nos últimos anos. Por exemplo, Švandová et al.⁵⁸ demonstrou que ferramentas inicialmente projetadas para o modelo e para simular reatores químicos permitiram estabelecer uma nova metodologia para identificar riscos ao integrar modelos e estudos de risco e operabilidade. O modelo de conversão da hidrólise do óxido de propileno em mono propilenoglicol permitiu concluir que a integração de simulações e ferramentas de avaliação de risco possibilitou uma rápida identificação de desvios e possíveis consequências. O modelo também levou ao estabelecimento de ações para reduzir o impacto e a frequência de eventos indesejáveis.

Desde o início dos anos 2000, software comercial para a execução do Hazop, como o software HAST, tem sido usado para gerenciamento de riscos em plantas de produção⁵⁹, incluindo vários softwares Hazop “*inteligentes*” desenvolvidos para auxiliar na análise Hazop, como o PHASUITE. Zhao et al.⁶⁰ realizaram uma análise em um processo farmacêutico usando este software inteligente como estudo de caso. Como resultado, esse software pode identificar situações perigosas que poderiam ser facilmente evitadas quando ações corretivas são aplicadas. Além disso, a integração da modelagem matemática no estudo Hazop pode levar à detecção de desvios aleatórios inesperados. No entanto, eles concluíram que em situações particulares poderia haver um excesso de informações, causando perda de objetividade e podendo ser responsável pela falta de conhecimento correspondente para promover medidas necessárias para enfrentar desvios indesejáveis. Eles também estabeleceram que muita informação poderia levar à promoção de soluções não viáveis, ou, pior ainda, propor muitas opções para reduzir os riscos, tornando o processo de eliminação de riscos uma tarefa difícil de realizar.

Eizenberg et al.⁶¹, em um trabalho semelhante, estabeleceram um modelo para realizar a análise Hazop em um reator semi-batelada no qual ocorre uma reação exotérmica. O modelo foi exportado para simuladores matemáticos conhecidos como o MATLAB, e condições anormais (previamente identificadas) foram usadas como dados em um procedimento Hazop. Labovský et al.⁶² usaram o mesmo conceito de modelagem para estabelecer um modelo matemático em um projeto de reator tubular para a produção de óxido de etileno. Eles também desenvolveram um algoritmo de computador chamado DYNHAZ para identificar perigos em sistemas de produção semelhantes. Em uma pesquisa adicional, Labovský et al.⁶³ aplicaram o mesmo algoritmo para executar uma análise de estado estacionário e uma análise detalhada de segurança para um processo relativamente complexo. Uma unidade de produção de éter metil-terciário-butílico (MTBE) foi escolhida como um estudo de caso para demonstrar essa metodologia, devido à complexidade e extensão da análise Hazop.

O desenvolvimento e o uso de software especializado projetado para simplificar a análise de risco em instalações complexas é



uma nova tendência que está sendo seguida por especialistas em riscos. Zhao et al.⁶⁴ projetaram um sistema especialista específico chamado Petrohazop, que pode ajudar a automatizar a análise Hazop “não-rotineira” devido à capacidade de aprendizado do software. Portanto, a análise Hazop pode ser continuamente melhorada através da experiência armazenada em bancos de dados. Como exemplo, Cui et al.⁶⁵ desenvolveram um software inteligente chamado HASILT, integrando as técnicas Hazop, LOPA, Especificação de Requisitos de Segurança (Safety Requirements Specification - SRS) e SIL. Neste caso, essa integração não só facilita a execução de estudos de avaliação de risco, como também a promoção de possíveis soluções baseadas na experiência adquirida em eventos semelhantes. Outra ferramenta comum para identificação de perigos é o ExpHazop⁶⁶. Esse sistema especialista foi projetado para identificar perigos e sugerir medidas de mitigação em instalações de processo. Esse software é bem conhecido por sua interface amigável, interface gráfica aprimorada, métodos para identificar nós de estudo, base de conhecimento dinâmica, algoritmo de propagação de falhas, geração de relatórios etc. Todas essas características tornam este sistema especializado uma das ferramentas de suporte mais utilizadas para a análise Hazop.

Em outro caso, Wang et al.⁶⁷ projetaram e testaram um programa de computador chamado HELPHAZOP em um sistema de processamento para hidrotreamento de resíduos. Esse software trabalha com bases de dados de incidentes, considerações, parâmetros de risco etc., e serve como guia para reduzir erros humanos originados pela falta de experiência sobre o processo. A criação de bancos de dados a partir de parâmetros de processos e procedimentos de tratamento tornou-se comum na indústria de processos. Os bancos de dados são armazenados em sistemas de computadores e disponibilizados para orientar a resolução de situações anormais. Isso foi mostrado no trabalho de Wang et al.⁶⁸, em uma planta que produz etileno glicol.

Uma nova abordagem estruturada para a modelagem e simulação Hazop é a teoria do gráfico direcionado assinado (Signed Directed Graph - SDG). Esta teoria fornece algoritmos e métodos que podem ser aplicados diretamente ao processo químico^{69,70}. A análise de SDG pode validar modelos e é uma base para o desenvolvimento de ambiente de simulação de software para tornar possível a automação de atividades de validação^{71,72,73}.

Tentando encontrar todos os possíveis caminhos lógicos no modelo SDG, Lü e Wang⁷⁴ usaram gráficos direcionados assinados (SDG). Os modelos SDG integrados às metodologias Hazop possibilitaram determinar desvios e consequências de forma mais acertada que o Hazop convencional, economizando tempo, recursos humanos e despesas. Wang et al.⁷⁵ também utilizaram a SDG e provaram sua eficácia para identificar os erros operacionais mais prováveis que podem causar desvios variáveis do processo em uma planta de cloreto de polivinila (PVC). Kwamura et al.⁷⁶ propuseram um sistema inteligente de suporte Hazop que integra um Diagrama de Fluxo Dinâmico (DFD). Depois de executar uma simulação, as informações resultantes podem ser usadas em conjunto com software especializado para identificar riscos em tempo real durante a operação. O modelo também pode propor soluções

viáveis para evitar danos à infraestrutura, procedimentos e todo o pessoal envolvido no processo.

Segundo Adhitya et al.⁷⁷, Simulações Dinâmicas previamente definidas por Haug⁷⁸ foram usadas para identificar desvios em diferentes parâmetros da cadeia de suprimentos. Simulações Dinâmicas também foram aplicadas para identificar possíveis causas, consequências, salvaguardas e ações de mitigação usando uma estrutura sistemática para o gerenciamento de riscos. A análise simultânea de riscos em sistemas com vários nós com diferentes modos de falha pode ser uma tarefa demorada se não houver modelos para simplificar esse processo. Hu et al.⁷⁹ estabeleceram o fato de que é possível resolver problemas práticos relacionados à segurança na indústria. Tais problemas incluíram uma perda significativa de informações e a dificuldade de tomada de decisão do sistema de segurança durante a tradicional análise Hazop de auxílio computacional pela teoria da fusão de informações fuzzy⁸⁰. No entanto, percebeu-se que o modelo resultante devia ser modificado praticamente em cada fase do ciclo de vida do sistema. Esse processo resultou em mais tempo e recursos para realizar estudos toda vez que era necessário aplicar ajustes. Como mencionado acima, a metodologia Hazop analisa diagramas de P&ID para definir desvios no projeto de plantas com a única intenção de detectar falhas em um sistema antes que ele seja construído. Cui et al.⁸¹ desenvolveram software especializado para análise Hazop e também propõem a integração com o software SMART Plant para auxiliar na solução de problemas durante o projeto de uma planta, bem como reduzir o esforço e o tempo necessários para essa análise. É um fato que o uso de simuladores de computador não só diminuirá a implementação da metodologia Hazop, como também poderá ser uma ferramenta valiosa para a rápida tomada de decisões. Jeerawongsuntorn et al.⁸² propuseram a implementação de uma análise automática de Hazop integrada a uma interface homem-máquina (IHM). O objetivo dessa análise foi monitorar um sistema de produção de biodiesel e reduzir o tempo de resposta para implementar ações para reduzir a frequência e o impacto dos riscos. Concluiu-se que situações indesejáveis podem levar a uma completa falta de efetividade da análise, conforme afirmado por Wang e Gao⁸³. No entanto, eles propõem com sucesso um novo método de construção de banco de dados baseado na análise Hazop, que poderia orientar o operador a agir rapidamente diante de desvios e a evitar danos potenciais dentro do sistema.

Redes Bayesianas (Bayesian Networks - BN), também conhecidas como redes de crenças (ou redes Bayes, abreviadamente), pertencem à família de modelos gráficos probabilísticos (Graphical Models - GM). Essas estruturas gráficas são usadas para representar o conhecimento sobre um domínio variável. Em particular, cada nó no gráfico representa uma variável aleatória, enquanto as arestas entre os nós representam dependências probabilísticas entre as variáveis aleatórias correspondentes⁸⁴. Estas dependências condicionais no gráfico são frequentemente estimadas usando métodos estatísticos e computacionais conhecidos. Assim, as BN combinam o princípio



da teoria dos grafos, teoria da probabilidade, ciência da computação e estatística⁸⁵.

Os riscos operacionais incluem uma variedade de tipos de falhas, cuja quantificação não é fácil, porque a falta de dados é uma característica fundamental⁸⁶. Criar bancos de dados de riscos é um requisito essencial na avaliação de riscos do processo. Esses bancos de dados consistem em procedimentos funcionais detalhados e características do equipamento. No entanto, em casos específicos, devido à baixa disponibilidade, será necessário acessar fontes de informações externas de dados de validação ou desvio. Infelizmente, a opinião de especialistas e definições subjetivas de probabilidade são comumente a única fonte dessas informações. No entanto, uma abordagem Bayesiana consegue processar e validar tais informações, devido à sua capacidade de analisar dados acumulados e, conseqüentemente, melhorar sua qualidade⁸⁷. Assim, as Redes Bayesianas estão sendo usadas como método para calcular probabilidades de eventos⁸⁸ e como ferramenta para tomada de decisão em sistemas especialistas durante a implementação da metodologia Hazop.

A BN também orienta a tomada de decisões em situações em que é necessário avaliar ganhos e custos versus riscos⁸⁹. Hu et al.⁹⁰ apresentaram um modelo que utiliza a integração da metodologia Hazop e uma rede Bayesiana dinâmica. Esse modelo foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar na quantificação do nível de desvio através da análise de relacionamento entre parâmetros em processos complexos.

Limitações de sistemas especialistas para suportar estudos Hazop

Embora os sistemas especialistas ofereçam o suporte necessário para facilitar o processo de aplicação da metodologia Hazop, essas ferramentas apresentam algumas limitações que devem ser consideradas durante o seu uso para contestar os resultados^{91,92}.

Senso comum: Um Sistema Especialista carece de senso comum, o que é essencial para especificar com base no conhecimento todas as condições e circunstâncias do contexto e do ambiente. Para a metodologia Hazop, mesmo a decisão mais simples baseada no senso comum não é considerada pelo sistema, uma vez que a interpretação dos dados adquiridos ao longo do tempo cria bancos de dados sem a aplicação de critérios para casos específicos.

Língua natural: Assim como um ser humano usa uma linguagem para manter a comunicação com outro indivíduo, um sistema especialista (Expert System) usa uma linguagem de programação, o que impede a possibilidade de conversas informais. Assim, os usuários acabam se conformando com a linguagem do sistema, o que leva a limitações para declarar ideias, causas, conseqüências e expressões particulares.

Provisão para aprendizagem: A capacidade de uma pessoa aprender com os erros é relativamente alta e rápida. Projetar um sistema especialista que ofereça essas condições é muito complexo.

Capacidade de priorizar: Para os especialistas humanos, não é muito difícil diferenciar os tópicos relevantes dos irrelevantes,

o que para um Sistema Especialista não é tão trivial e requer bancos de dados de eventos complexos e geralmente exige atualizações da programação para alcançar o objetivo.

Aptidão sensorial: Um sistema especialista, ao contrário de um ser humano, não é capaz de perceber nenhum dos cinco sentidos, o que limita sua capacidade de percepção.

No entanto, a cada dia, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas e, em um futuro próximo, espera-se que uma tomada de decisão seja viável para sistemas especialistas.

Uma perspectiva da metodologia Hazop

Como visto acima, o uso de modelos e simulações será a base para a identificação de riscos e fornecerá um guia para a tomada de decisões no gerenciamento de riscos. No entanto, embora seja bem conhecido que os sistemas computacionais darão apoio a especialistas em risco e talvez reduzam a necessidade de uma equipe multidisciplinar extensa a longo prazo, quais são os usos futuros e potenciais imediatos da metodologia Hazop?

É fato que a metodologia de risco e operacionalidade continuará a ser empregada na indústria de processo por um longo tempo. Ela facilita a análise de sistemas nos estágios iniciais do projeto, analisando desvios no comportamento anormal do sistema, ao processar matérias-primas em produtos. Essa é a razão pela qual se tornará mais comum ver novas áreas potenciais de aplicação dessa metodologia, como informática, negócios, educação médica e processos que podem incluir parâmetros de processo.

As possíveis áreas de aplicação devem considerar que os desvios também poderiam ser responsáveis por afetar não apenas os dispositivos mecânicos, mas também os sistemas de computação, as questões regulatórias ou mesmo os elementos envolvidos direta ou indiretamente nesse processo, como o ambiente e a infraestrutura crítica⁹³. Entretanto, como visto neste trabalho, a rápida evolução tecnológica da infraestrutura industrial pode tornar obsoleta a metodologia convencional Hazop. A aplicação de procedimentos Hazop pode não ser viável quando o aumento de alguns componentes e a complexidade de possíveis desvios exigem o esforço adicional dos responsáveis pela avaliação de risco. Sem mencionar o alto custo dos recursos e o tempo necessário para realizar uma análise de risco para identificar e aplicar medições de controle. Portanto, agora é comum ver que essa metodologia Hazop está sendo adaptada e é adequada para atender às necessidades de novos processos. Assim, os especialistas em gerenciamento de risco concordam que a automação dos procedimentos de aplicação do Hazop será em um futuro próximo a única abordagem prática para lidar com análises altamente complexas, se adotadas.

Aplicações na indústria farmacêutica

A capacidade e a complexidade das próximas instalações industriais devem ser critérios fundamentais quando as ferramentas de avaliação de risco forem usadas. A avaliação de risco industrial usando a metodologia Hazop requer uma compreensão completa da função dos componentes e sua relação com todo



o sistema. Atualmente, a infraestrutura industrial em diversos setores precisa ser atualizada, visando atender a requisitos de qualidade. Como caso especial, é possível notar que a indústria farmacêutica e biofarmacêutica evoluiu de forma notável nos últimos anos. Ambas as indústrias são responsáveis pela produção de suprimentos de saúde. Em alguns casos o produto final pode ser o mesmo; no entanto, a diferença tecnológica é a plataforma de produção.

A indústria farmacêutica convencional geralmente usa síntese química para gerar produtos de saúde, exigindo matérias-primas caras para realizar processos. Enquanto isso, a geração de produtos biotecnológicos (como o próprio nome sugere) requer plataformas biológicas como bactérias, células de mamíferos ou insetos e, mais recentemente, o uso de plantas para produzir proteínas terapêuticas, vacinas bacterianas e virais etc. No entanto, a plataforma biológica requer instalações tecnológicas aprimoradas e equipamentos caros, como biorreatores, quando se trabalha com organismos geneticamente modificados (OGM).

Como consequência das regulações atuais, como as da FDA^{94,2}, os equipamentos necessários devem atender a especificações elevadas e a procedimentos operacionais complexos. Nesse ponto, a metodologia Hazop fornece o suporte de avaliação de risco necessário. Assim, os sistemas biotecnológicos responsáveis pelas operações de transformação de materiais em produtos são constituídos por alguns componentes que podem ser considerados como nós de Hazop. Na Figura 2, é mostrado um exemplo de identificação de nó em um tanque de aço inoxidável usado para diluição de cultura bacteriana.

Nesse caso, a identificação do nó parece ser um procedimento fácil de seguir, no entanto, a Figura 3 ilustra a complexidade de um biorreator para bactérias usado no processo. Nesse caso, a identificação do nó poderia representar um desafio para a equipe multidisciplinar, pois cada linha que representa serviços, soluções, meios de comunicação, exaustão de gás, etc. deve ser considerada como um nó. Deve-se considerar também que a falta de um único elemento requerido para o processo, ou um desvio da função dos consentimentos, terá impactos negativos sobre o produto ou sobre o próprio sistema.

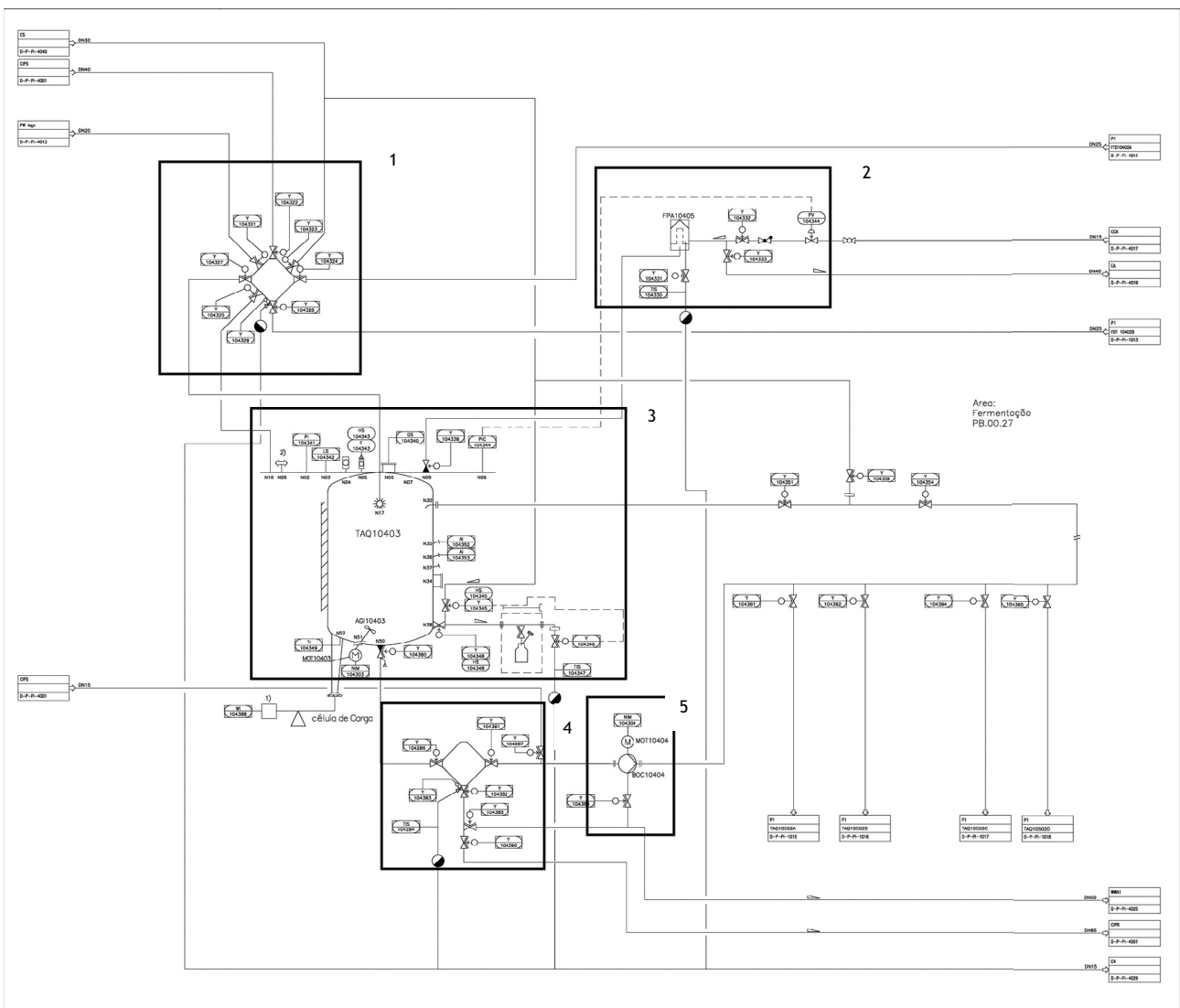


Figura 2. Identificação de nó em tanque de diluição de cultura bacteriana. M+W, 2014.

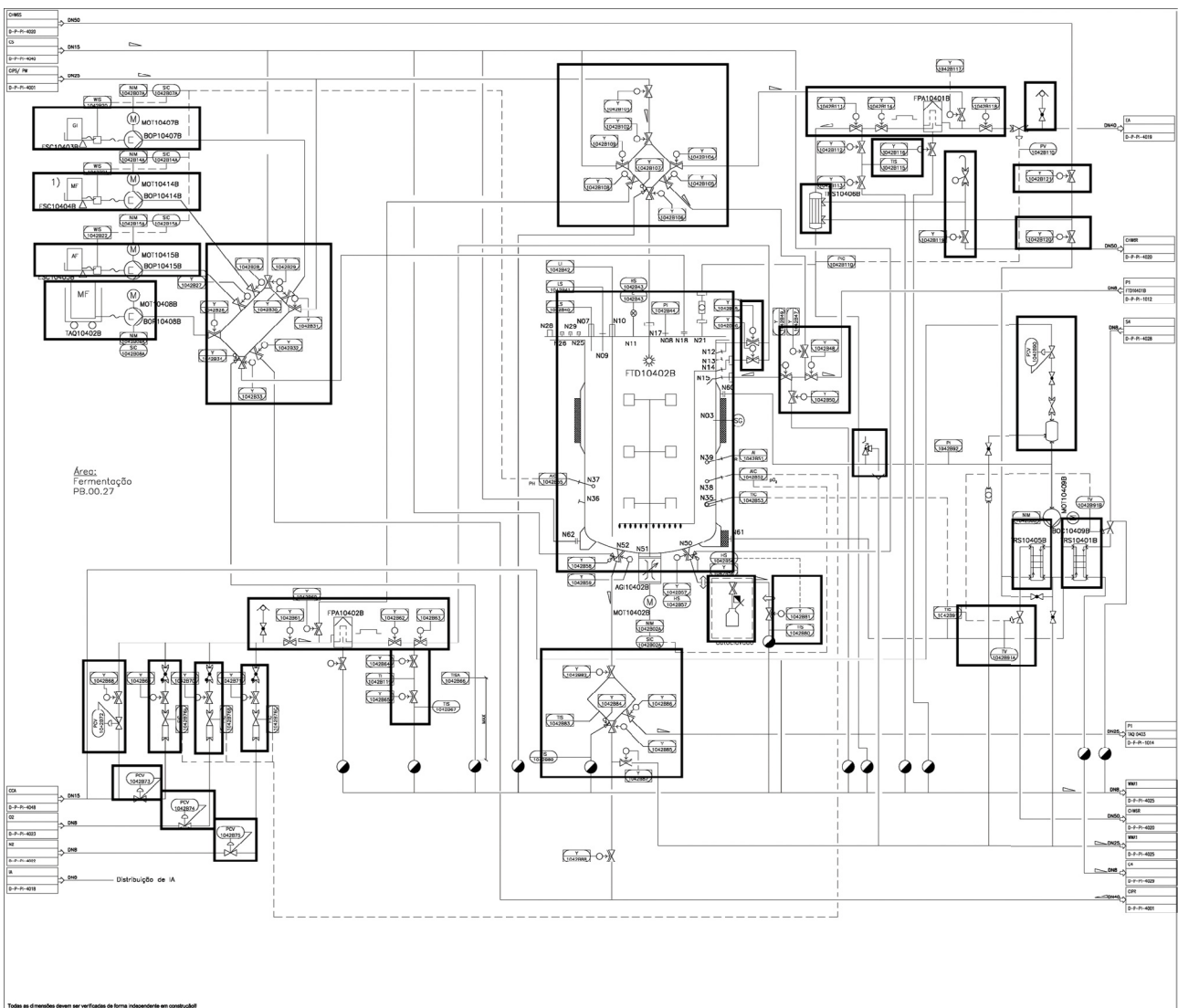


Figura 3. Identificação de nós em sistemas complexos de biorreatores. GE, 2015.

Assim, a nova abordagem para seleção de nós através da funcionalidade pode ser a resposta para reduzir o número de componentes considerados como nós, por grupos de componentes com a mesma função dentro do processo. Essa estratégia simplificará o procedimento de identificação, processamento e tratamento de desvios, permitindo uma análise simultânea de diversas variáveis ao mesmo tempo, como demonstrado por O Herrera et al.²⁴

Além disso, a experiência do grupo multidisciplinar necessária na análise de risco que usa essa metodologia pode ser reduzida se uma ferramenta de software especializada que permita a aquisição de informações e gere bancos de dados puder ser usada como base para a tomada de decisões.

CONCLUSÕES

a. A metodologia Hazop é uma das ferramentas mais usadas pelos especialistas em gerenciamento de risco. Como foi visto neste

documento, ela continuará a ser empregada na indústria de processo por um longo tempo. No entanto, para enfrentar novos desafios dentro da indústria de processo atual, a metodologia deve ser melhorada visando atender sua implementação em instalações de alta complexidade. Atualizações da metodologia permitirão sua rápida adaptação a requisitos de processo atuais ou futuros, como foi visto em publicações recentes.

b. Esta revisão possibilitou perceber que a maioria dos autores consultados considera a metodologia Hazop uma ferramenta confiável para identificar desvios nos parâmetros do processo. Além disso, sua abordagem estruturada traz o suporte necessário para facilitar a determinação de causas e efeitos usando como base o conhecimento de uma equipe multidisciplinar ou bancos de dados de sistemas especialistas. No entanto, em todos os casos, profissionais especialistas continuarão a ser necessários devido às limitações dos próprios sistemas especialistas (explicado acima).



- c. Os estudos Hazop são projetados para promover medidas para eliminar riscos e propor controles para reduzir o impacto dos riscos quando estes não puderem ser evitados. Contudo, a maioria dos autores mencionados neste artigo converge com base na premissa de que a identificação e caracterização de desvios usando os bancos de dados da metodologia Hazop não são a única fonte de informações e requerem experiência ampla e profunda dos envolvidos na avaliação de risco.
- d. Os processos atuais estão sendo construídos usando a tecnologia mais recente, tornando os sistemas mais complexos do que eram no passado. Essa é a principal razão pela qual

a aplicação convencional da metodologia Hazop não pode atender aos requisitos da avaliação de risco de processos subsequentes. No entanto, a nova tendência que vem sendo seguida por especialistas em Hazop é o projeto e a aplicação de estudos inteligentes de Hazop. A criação de modelos, simulações e o uso de software especializado simplificarão o procedimento para lidar com desvios, tornando os estudos de perigos e operabilidade uma ferramenta rápida e de baixo custo para avaliação de risco. Embora os sistemas não sejam infalíveis, espera-se que, num futuro próximo, a necessidade de experiência humana para apoiar sistemas especialistas se torne cada vez menor ou mesmo desnecessária.

REFERÊNCIAS

1. Choi BC. The past, present, and future of public health surveillance. *Scientifica (Cairo)*. 2012;2012:875253. <https://doi.org/10.6064/2012/875253>
2. ICH. Harmonised Tripartite Guideline Quality Risk Management - Q9, Current Step 4, version 9, November 2005.
3. Fischi J, Nichiani R. Complexity based risk evaluation in engineered systems. *Procedia Comput Sci*. 2015;44:31-41. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.044>
4. Cheng M, Lu Y. Developing a risk assessment method for complex pipe jacking construction projects. *Autom Construct*. 2015;58:48-59. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.011>
5. Berg PH. Risk management: procedures, methods and experiences. *Risk Manage*. 2010;1(17):79-95.
6. Yang X, Haugen S. Classification of risk to support decision-making in hazardous processes. *Saf Sci*. 2015;80:115-26. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.011>
7. Crawley F, Tyler B. HAZOP: Guide to best practice: Guidelines to best practice for the process and chemical industries. 3rd ed. Waltham: Elsevier Science; 2015.
8. Díaz López FJ, Montalvo C. A comprehensive review of the evolving and cumulative nature of eco-innovation in the chemical industry. *J Clean Prod*. 2015;102:30-43. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.007>
9. Burgess JA. Design assurance-a tool for excellence. *Eng Manage Int*. 1998;5(1):25-30. [https://doi.org/10.1016/0167-5419\(88\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0167-5419(88)90023-3)
10. Nolan DP. Application of HAZOP, PHA, and What-if reviews. safety and security review for the process industries. 2nd ed. New York: William Andrew; 2008.
11. McKay G. Process safety management and risk hazard analysis: HAZOP study analysis course. department of chemical and biomolecular engineering. Hong Kong: University of Science and Technology; 2011.
12. Heino P. Fluid property reasoning in knowledge-based hazard identification [Thesis]. Espoo: Technical Research Centre of Finland; 1999.
13. Lawley HG. Operability studies and hazard analysis. *Chem Eng Prog*. 1974;70(4):45-56.
14. Kletz TA. What went wrong? Case histories of process plant disasters and how they could have been avoided. 5th ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann/ICHEME; 1983. Chapter 18, Reverse flow, other unforeseen deviations, and hazop; p. 297-311.
15. Ayyup BM, Beach JE, Sarkani S, Asskaf IA. Risk analysis and management for a marine system. *Nav Eng J*. 2002;114(2):181-206. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2002.tb00130.x>
16. Ziauddin A, Mandal P, Kumar KD, Karthikeyan M. HAZOP for propylene recovery plant at HOC ambalamugal. *Int J OHSFE-Allied Sci*. 2014;1(1):9-13.
17. Kletz TA. ICI's contribution to process safety. Rugby: ICHEME; 2009. (Symposium series, Vol. 155).
18. Hoepffner L. Analysis of the HAZOP study and comparison with similar safety analysis systems. *Gas Sep Purif*. 1989;3(3):148-51. [https://doi.org/10.1016/0950-4214\(89\)80027-1](https://doi.org/10.1016/0950-4214(89)80027-1)
19. Khan FI, Abbasi SA. OptHAZOP: an effective and optimum approach for HAZOP study. *J Loss Prevent Proc*. 1997;10(3):191-204. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(97\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(97)00002-8)
20. Poulouse SM, Madhu G. Hazop study for process plants: a generalized approach. *Int J Emerg Technol Adv Eng*. 2012;2(7):293.
21. Kidam K, Hurme M. Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents. *Process Saf Environ*. 2013;91(1-2):61-78. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.02.001>
22. Dunjón J, Fthenakis VM, Darbra RM, Vélchez JA, Arnaldos J. Conducting HAZOPs in continuous chemical processes: Part I. Criteria, tools, and guidelines for selecting nodes. *Process Saf Environ*. 2011;89(4):214-23. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.03.001>
23. Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2015.
24. O Herrera MA, Luna AS, Costa ACA, Blanco Lemes EM. A structural approach to the HAZOP and Hazard and operability technique in the biopharmaceutical industry. *J Loss Prevent Proc*. 2015;35:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.03.002>



25. Swann CD, Preston ML. Twenty-five years of HAZOPs. *Loss Preven Proc.* 1995;8(6):349-53. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0950-4230(95)00041-0)
26. Marhavidas PK, Koulouriotis D, Gemeni V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: on a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Loss Preven Proc.* 2011;24(5):477-523. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>
27. Dunj3 J, Fthenakis V, Vilchez JA, Arnaldos J. Hazard and operability (HAZOP) analysis: a literature review. *J Hazard Mater.* 2010;173(1-3):19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.076>
28. ScienceDirect. Search for Hazop. (n.d.) [access 2015 Sep 20]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/search?q=HAZOP&authors=&pub=&volume=&issue=&page=&origin=home&zone=qSearch>
29. Hashemi-Tilehnoee M, Pazirandeh A, Tashakor S. HAZOP-study on heavy water research reactor primary cooling system. *Ann Nucl Energy.* 2010;37(3):428-33. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.12.006>
30. Jose M, Sivapirakasam SP, Surianarayanan M. Analysis of aerosol emission and hazard evaluation of electrical discharge machining (EDM) process. *Ind Health.* 2010;48(4):478-86. <https://doi.org/10.2486/inhealth.MS1127>
31. Johnson RW. Beyond-compliance uses of HAZOP/LOPA studies. *J Loss Prevent Proc.* 2010;23(6):727-33. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.05.009>
32. Mohammadfam I, Sajedi A, Mahmoudi S, Mohammadfam F. Application of hazard and operability study (HAZOP) in evaluation of health, safety and environmental (HSE) hazards. *Int J Occup Hyg.* 2012;4(2):69-72.
33. Hu J, Zhan L, Liang W. Opportunistic predictive maintenance for complex multi-component systems based on DBN-HAZOP model. *Process Saf Environ.* 2012;90(5):376-88. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.06.004>
34. Duisings LP, Van Til S, Magielsen AJ, Ronden DM, Elzendoorn BS, Heemskerk CJ. Applying HAZOP analysis in assessing remote handling compatibility of ITER port plugs. *Fusion Eng Des.* 2013;88(9-10):2688-93. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.12.002>
35. P3rez-Mar3n M, Rodr3guez-Toral MA. HAZOP: local approach in the Mexican oil & gas industry. *J Loss Prevent Proc.* 2013;26(5):936-40. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.008>
36. Silvanita, Khamidi MF, Rochani I, Chamelia DM. Hazard and operability analysis (HAZOP) of mobile mooring system. *Procedia Earth Planet Sci.* 2010;14:208-12. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.103>
37. Ghasemzadeh K, Morrone P, Lulianelli A, Liguori S, Babaluo AA, Basile A. H2 production in silica membrane reactor via methanol steam reforming: modeling and HAZOP analysis. *Int J Hydrogen Energy.* 2013;38(25):10315-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.06.008>
38. Kriaa S, Pietre-Cabacedes L, Bouissou M, Halgand Y. A survey of approaches combining safety and security for industrial control systems. *Reliab Eng Syst Saf.* 2015;139:156-78. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.02.008>
39. Necci A, Cozzani V, Spadoni G, Khan F. Assessment of a domino effect: state of the art and research needs. *Reliab Eng Syst Saf.* 2015;143:3-18. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.05.017>
40. Rebelato MG, Madaleno LL, Ferrari GB, Marize A. Comparative study between Hazop and fmea methods applied to the production of bioethanol. *Rev Gest Ind.* 2015;11(1):1-23.
41. Baybutt P. A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) study. *J Loss Prevent Proc.* 2015;33:52-8. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.010>
42. Kidam K, Sahak HA, Hassim MH, Hashim H, Hurme M. Method for identifying errors in chemical process development and design base on accidents knowledge. *Process Saf Environ.* 2015;94:49-60. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.004>
43. Cagno E, Caron F, Mancini M. Risk analysis in plant commissioning: the Multilevel Hazop. *Reliab Eng Syst Saf.* 2002;77(3):309-23. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00064-9)
44. Rossing NL, Lind M, Jensen N, J3rgensen SB. A goal-based methodology for HAZOP analysis. *Int J Nuc Saf Simul.* 2010;1(2):134-42.
45. Wu J, Zhang J, Liang W, Hu J. A novel failure mode analysis model for gathering system based on multilevel flow modeling and HAZOP. *Process Saf Environ.* 2013;91(1-2):54-60. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.02.002>
46. Mingda W, Guoming C, Jianmin F, Weijun L. Safety analysis approach of MFM-HAZOP and its application in the dehydration system of oilfield united station. *Procedia Eng.* 2012;43:437-42. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.075>
47. Boonthum N, Mulalee U, Srinophakun T. A systematic formulation for HAZOP analysis based on the structural model. *Reliab Eng Syst Saf.* 2014;121:152-63. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.08.008>
48. Sauk R, Markowski AS, Moskal F. Application of the graph theory and matrix calculus for optimal HAZOP nodes order determination. *J Loss Prevent Proc.* 2015;35:377-86. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.007>
49. Milazzo MF, Aven T. An extended risk assessment approach for chemical plants applied to a study related to pipe ruptures. *Reliab Eng Syst Saf.* 2012;99:183-92. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.12.001>
50. Liu H, Shi X, Chen X, Liu Y. Management of life extension for topsides process system of offshore platforms in Chinese Bohai Bay. *J Loss Prevent Proc.* 2015;35:357-65. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.12.002>
51. Giardina M, Morale M. Safety study of an LNG regasification plant using an FMECA and HAZOP integrated methodology. *J Loss Prevent Proc.* 2015;35:35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.03.013>



52. Mohammadfam I, Zarei E. Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas release: A comprehensive risk analysis framework. *Int J Hydrogen Energy*. 2015;40(39):13653-63. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.117>
53. Chen H, Pittman WC, Hatanaka LC, Harding BZ, Boussouf A, Moore DA et al. Integration of process safety engineering and fire protection engineering for better safety performance. *J Loss Prevent Proc*. 2015;37:74-81. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.013>
54. Sharvia S, Papadopoulos Y. Integrating model checking with HiP-HOPS in model-based safety analysis. *Reliab Eng Syst Saf*. 2015;135:64-80. <https://doi.org/10.1016/j.res.2014.10.025>
55. Chung PW, Brugha J, McDonald J, Madden J. Process plant safety information repository and support for safety applications. *J Loss Prevent Proc*. 2012;25(5):788-96. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.04.004>
56. Palmer C, Chung PW. An automated system for batch hazard and operability studies. *Reliab Eng Syst Saf*. 2009;94(6):1095-106. <https://doi.org/10.1016/j.res.2009.01.001>
57. Alaei R, Mansoori SA, Moghaddam AH, Mansoori SM, Mansoori N. Safety assessment approach of hazard and operability (HAZOP) for sulfur recovery unit Claus reaction furnace package; blower; heat exchanger equipment in South Pars gas processing plant. *J Nat Gas Sci Eng*. 2014;20:271-84. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.07.007>
58. Švandová Z, Jelemenský L, Markoš J, Molnár A. Steady states analysis and dynamic simulation as a complement in the Hazop study of chemical reactors. *Process Saf Environ*. 2015;83(5):463-71. <https://doi.org/10.1205/psep.04262>
59. Cocchiara M, Bartolozzi V, Picciotto A, Galluzzo M. Integration of interlock system analysis with automated HAZOP analysis. *Reliab Eng Syst Saf*. 2001;74(1):99-105. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00074-6)
60. Zhao C, Bhushan M, Venkatasubramanian V. Phasuite: an automated HAZOP analysis tool for chemical processes part II: implementation and case study. *Process Saf Environ*. 2005;83(6):533-48. <https://doi.org/10.1205/psep.04056>
61. Eizenberg S, Shacham M, Brauner N. Combining HAZOP with dynamic simulation: applications for safety education. *J Loss Prevent Proc*. 2006;19(6):754-61. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2006.07.002>
62. Labovský J, Laššák P, Markoš J, Jelemenský L. Design, optimization, and safety analysis of a heterogeneous tubular reactor by using the HAZOP methodology. *Computer-Aided Chem Eng*. 2007;24:1241-6. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(07\)80231-8](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(07)80231-8)
63. Labovský J, Švandová S, Markoš J, Jelemenský L. Model-based HAZOP study of a real MTBE plant. *J Loss Prevent Proc*. 2007;20(3):230-7. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.03.015>
64. Zhao J, Cui L, Zhao L, Qiu T, Chen B. Learning HAZOP expert system by case-based reasoning and ontology. *Comput Chem Eng*. 2009;33(1):371-8. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.10.006>
65. Cui L, Shu Y, Wang Z, Zhao J, Qiu T, Sun W et al. HASILT: an intelligent software platform for HAZOP, LOPA, SRS and SIL verification. *Reliab Eng Syst Saf*. 2012;108:56-64. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.06.014>
66. Rahman S, Khan F, Veitch B, Amyotte P. ExpHAZOP: knowledge-based expert system to conduct automated HAZOP analysis. *J Loss Prevent Proc*. 2009;22(4):373-80. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.01.008>
67. Wang F, Gao J, Wang H. A new intelligent assistant system for HAZOP analysis of complex process plant. *J Loss Prevent Proc*. 2012;25(3):636-42. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.02.001>
68. Wang F, Zhao Y, Yang O, Cai J, Deng M. Process safety data management program based on HAZOP analysis and its application to an ethylene oxide/ethylene glycol plant. *J Loss Prevent Proc*. 2013;26(6):1399-406. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.08.020>
69. Iri M, Aoki K, O'shima E, Matsuyama H. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process. *Comput Chem Eng*. 1979;3(1-4):489-493. [doi:https://doi.org/10.1016/0098-1354\(79\)80079-4](https://doi.org/10.1016/0098-1354(79)80079-4)
70. Yang F, Shah SL, Xiao D. Signed directed graph based modeling and its validation from process knowledge and process data. *Int J Appl Math Comp*. 2012;22(1):41-53.
71. Maurya MR, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes: 1. Algorithms and analysis. *Ind Eng Chem Res*. 2003;42(20):4789-810. <https://doi.org/10.1021/ie020644a>
72. Maurya MR, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes: 2. Control loops and flowsheet analysis. *Ind Eng Chem Res*. 2003;42(20):4811-27. <https://doi.org/10.1021/ie0206453>
73. Maurya MR, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. Application of signed digraphs-based analysis for fault diagnosis of chemical process flowsheets. *Eng Appl Artif Intell*. 2004;17(5):501-18. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.03.007>
74. Lü N, Wang X. SDG-based HAZOP and fault diagnosis analysis to the inversion of synthetic ammonia. *Tsinghua Sci Technol*. 2007;12(1):30-7. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(07\)70005-6](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(07)70005-6)
75. Wang H, Chen B, He X, Tong Q, Zhao J. SDG-based HAZOP analysis of operating mistakes for PVC process. *Process Saf Environ*. 2009;87(1):40-6. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2008.06.004>
76. Kwamura K, Naka Y, Fuchino T, Aoyama A, Takagi N. Hazop support system and its use for operation. *Computer-Aided Chem Eng*. 2008;25:1003-8. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(08\)80173-3](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(08)80173-3)
77. Adhitya A, Srinivasan R, Karimi IA. Supply chain risk management through HAZOP and dynamic simulation. *Computer-Aided Chem Eng*. 2008;25:37-42. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(08\)80011-9](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(08)80011-9)
78. Haug EJ. Basic Methods. *Computer-aided kinematics and dynamics of mechanical systems*. Massachusetts: Allyn and Bacon; 1989. Vol. 1.



79. Hu JQ, Zhang LB, Liang W, Wang ZH. Quantitative HAZOP analysis for gas turbine compressor based on fuzzy information fusion. *Syst Eng Theory Pract.* 2009;29(8):153-9. [https://doi.org/10.1016/S1874-8651\(10\)60065-8](https://doi.org/10.1016/S1874-8651(10)60065-8)
80. Intan R. Rarity-based similarity relations in a generalized fuzzy information system. In: *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2004 Dec 1-3, Singapore.*
81. Cui L, Zhao J, Zhang R. The integration of HAZOP expert system and piping and instrumentation diagrams. *Process Saf Environ.* 2010;88(5):327-34. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.04.002>
82. Jeerawongsuntorn C, Sainyamsatit N, Srinophakun T. Integration of safety instrumented system with automated HAZOP analysis: an application for continuous biodiesel production. *J Loss Prevent Proc.* 2011;24(4):412-9. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.02.005>
83. Wang F, Gao J. A novel knowledge database construction method for operation guidance expert system based on HAZOP analysis and accident analysis. *J Loss Prevent Proc.* 2012;25(6):905-15. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.05.001>
84. Bhandari J, Abbassi R, Garaniya V, Khan F. Risk analysis of deepwater drilling operations using Bayesian network. *J Loss Prevent Proc.* 2015;38:11-23. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.08.004>
85. Ben-Gal I. *Encyclopedia of statistics in quality and reliability.* Oxford: John Wiley & Sons; 2007.
86. Weber P, Medina-Oliva G, Simon C, Lung B. Overview of Bayesian networks applications for dependability, risk analysis, and maintenance areas. *Eng Appl Artif Intell.* 2012;25(4):671-82. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.06.002>
87. Weber P, Jouffe L. Complex system reliability modeling with Dynamic Object-Oriented Bayesian Networks (DOOBN). *Reliab Eng Syst Saf.* 2006;91(2):149-62. <https://doi.org/10.1016/j.res.2005.03.006>
88. Lin Y, Chen M, Zhou D. Online probabilistic operational safety assessment of multi-mode engineering systems using Bayesian methods. *Reliab Eng Syst Saf.* 2013;119:150-7. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.05.018>
89. Pasman H, Rogers W. Bayesian networks make LOPA more effective, QRA more transparent and flexible, and thus safety more definable! *J Loss Prevent Proc.* 2013;26(3):434-42. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.07.016>
90. Hu J, Zhang L, Cai Z, Wang Y. An intelligent fault diagnosis system for process plant using a functional HAZOP and DBN integrated methodology. *Eng Appl Artif Intell.* 2015;45:119-35. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.06.010>
91. Partridge D. The scope and limitations of first generation expert systems. *Future Gener Comput Syst.* 1987;3(1):1-10. [https://doi.org/10.1016/0167-739X\(87\)90038-0](https://doi.org/10.1016/0167-739X(87)90038-0)
92. Cowan R. Expert systems: aspects of and limitations to the codifiability of knowledge. *Res Policy.* 2001;30(9):1355-72. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00156-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00156-1)
93. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliab Eng Syst Saf.* 2016;152:137-50. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.02.009>
94. Woodcock J, Griffin J, Behrman R, Cherney B, Crescenzi T, Fraser B et al. The FDA's assessment of follow-on protein products: a historical perspective. *Nat Rev Drug Discov.* 2007;6(6):437-42. <https://doi.org/10.1038/nrd2307>

Agradecimentos

A. S. Luna agradece o apoio da UERJ (Programa Prociência), Faperj e CNPq.

M. A. de la O. H. agradece o apoio do Instituto de Tecnologia de Imunobiológicos (Biomanguinhos) e a contribuição dos coautores para tornar este trabalho possível.

Conflito de Interesse

Os autores informam não haver qualquer potencial conflito de interesse com pares e instituições, políticos ou financeiros deste estudo.



Esta publicação está sob a licença Creative Commons Atribuição 3.0 não Adaptada.

Para ver uma cópia desta licença, visite http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.pt_BR.