

MODELAGEM E SIMULAÇÃO NO SUPORTE DA ETAPA DE IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS

Júlia Pinto Athanázio de Azevedo, José Carlos Costa da Silva Pinto e Maurício Bezerra de Souza Jr.

Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

O grande sucesso dos métodos tradicionais de identificação qualitativa de perigos pode ser atribuído ao fato de serem simples, sistemáticos e flexíveis. No entanto, essas metodologias apresentam limitações relacionadas à subjetividade, dependência do nível de experiência do time e alto consumo de tempo dos membros envolvidos. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma maneira sistemática de utilizar simulações computacionais para identificação de perigos, a fim de enfrentar desvantagens relacionadas aos métodos tradicionais. O presente trabalho propõe uma metodologia baseada na associação dos principais pontos de trabalhos anteriores, com novas contribuições no que tange a preparação das simulações computacionais e a caracterização do conjunto mínimo de variáveis de processo que possibilitam uma interpretação adequada dos resultados gerados. Para ilustrar o procedimento proposto, o processo LIPP-SHAC de polimerização de propeno foi utilizado como estudo de caso. Como resultado, uma análise de perigos baseada em modelagem e simulação computacional foram comparadas com um estudo HAZOP tradicional independente, a fim de destacar as principais diferenças e vantagens de cada método. Por fim, são propostas recomendações para o uso de modelagem e simulação computacional para identificação de perigos, com o objetivo de incentivar o uso dessas ferramentas em análises de risco.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as causas relacionadas a acidentes industriais estão mais relacionadas a questões envolvendo redução de custos e à pressão sobre a tomada de decisão - presente em todos os níveis hierárquicos - e não mais tanto à falta de conhecimento, como era comum na década de 60. Neste contexto, o desenvolvimento de ferramentas de avaliação de riscos de processo que permitem a redução de custo e tempo associados, é crucial para permitir uma tomada de decisão eficiente e, assim, evitar acidentes e perdas [1].

Dentro da avaliação de riscos e da tomada de decisão baseada em riscos, a etapa de identificação de perigos é fundamental, pois é o ponto de partida de análises adicionais que envolvem um sistema robusto de gerenciamento de segurança de processos. Quando cenários perigosos são negligenciados ou subestimados, uma falsa percepção de segurança pode ser criada. Por outro lado, a superestimação de riscos pode resultar no mau uso e desperdício de recursos.

Com base nisso, o principal objetivo do presente trabalho é estudar como a engenharia química e as tecnologias computacionais podem ser combinadas para aprimorar os procedimentos de identificação de perigos. Em particular, o uso de ferramentas de modelagem e simulação computacional para identificação de perigos é investigado, a fim de entender os principais desafios, vantagens e limitações de sua aplicação.

2. DESCRIÇÃO

2.1 MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PERIGO

Muito esforço já foi feito para automatizar a análise de perigos. Entre os métodos analisados, o “Procedimento de Mau Funcionamento” [2] propôs o uso de simulações computacionais de maneira sistemática para identificação de perigos. Embora a metodologia proposta forneça desvios das variáveis de processo frente a falhas, o procedimento é fundamentalmente diferente da abordagem usual do HAZOP como pode ser comparado na **Fig. 1**.

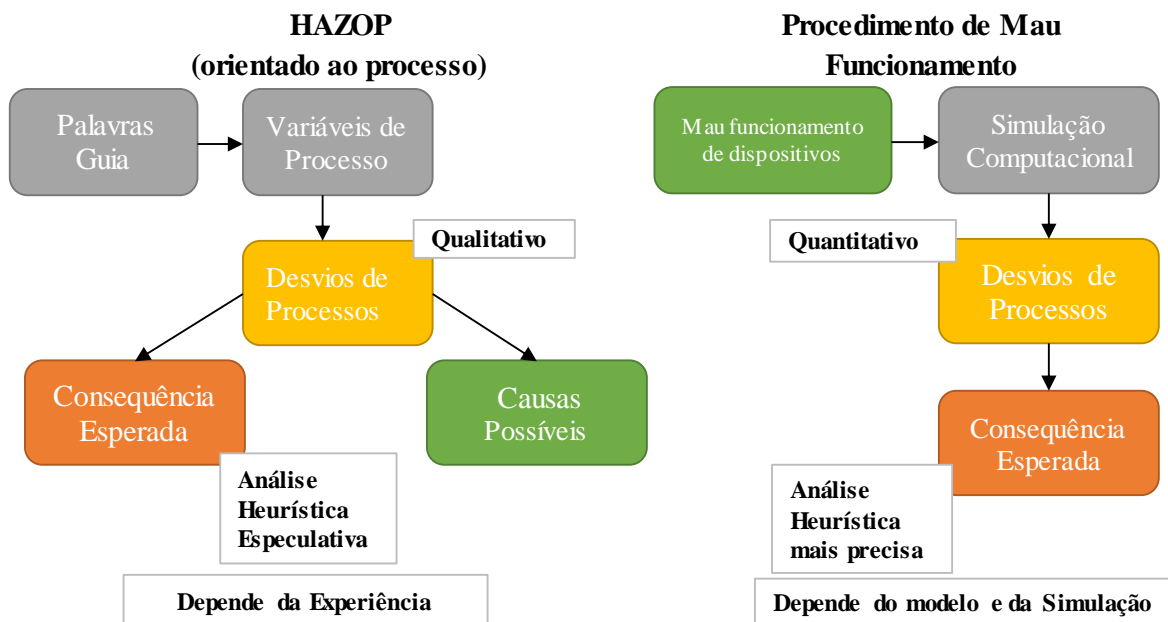


Fig. 1 - Características dos procedimentos do HAZOP e do dispositivo com mau funcionamento

É importante enfatizar que o HAZOP (procedimento orientado ao processo) é bem conhecido por sua maneira sistemática e disciplinada de identificar desvios de processo, porém ao aplicar um procedimento orientado aos dispositivos de processo - como o “Procedimento de Mau Funcionamento” [2] - é necessário buscar uma maneira ordenada de cobrir todas as falhas em dispositivos, ou pelo menos as principais. Portanto, uma abordagem sistemática baseada na metodologia FMEA foi proposta com o objetivo de listar as possíveis falhas.

Nesse cenário, deve-se destacar que o modelo de processo deve ser capaz de capturar comportamentos indesejados (como reações descontroladas, reações secundárias a contaminantes, combustão, entre outros) e a dinâmica de todas as variáveis relevantes do processo, o que nem sempre é possível, especialmente nos primeiros estágios de projeto de processos e/ou em fluxogramas de processos complexos.

2.2 ESTUDO DE CASO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O estudo de caso é baseado no processo de Polimerização Líquida de Polipropileno com Catalisador de Atividade Super Alta, LIPP-SHAC. Consiste em um processo de polimerização em massa (o meio de suspensão é o monômero) em um único reator trifásico agitado, para produzir pó de PP suspenso em propileno líquido [3-5], conforme **Fig. 2**.

O modelo usado para realizar simulações é baseado no trabalho de (DUTRA et al., [3], MATTOS NETO e PINTO [4], PRATA et al. [5] e SILVA [6]) com algumas modificações. O modelo matemático resultante consiste em 23 equações diferenciais com mais de 40 parâmetros e mais de 40 equações constitucionais as quais foram implementadas no software MATLAB.

Ao simular o modelo em uma ampla gama de condições de operação, a validade dos parâmetros do modelo numéricos e a convergência podem ser comprometidos. Portanto, é crucial que os resultados do modelo sejam verificados em relação à consistência.

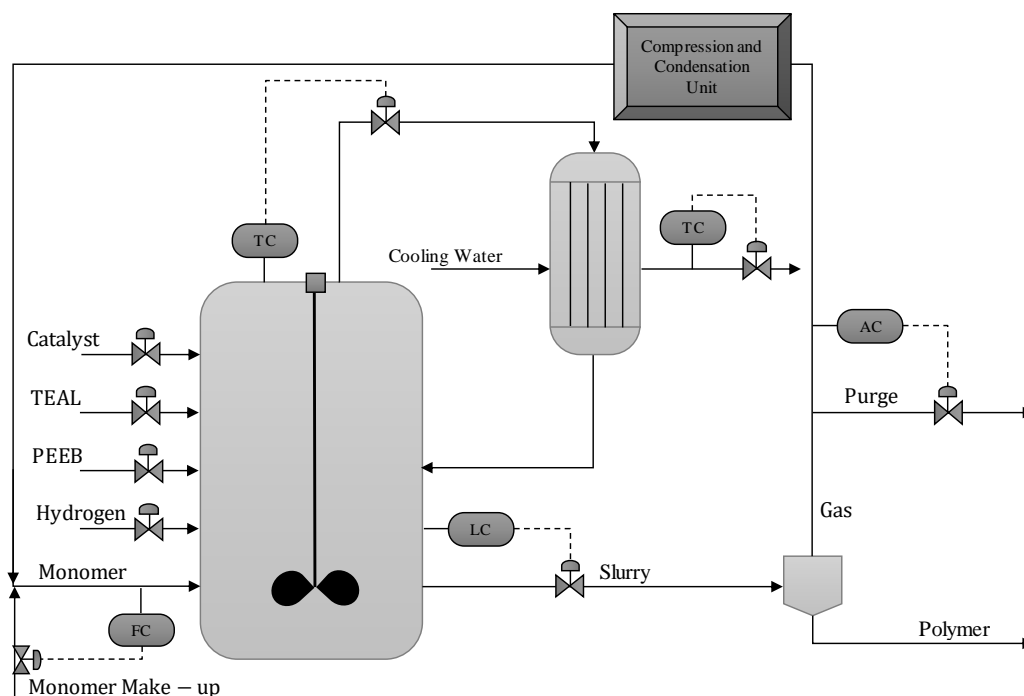


Fig. 2 - Fluxograma do processo

3. RESULTADOS

Conforme proposto na seção 2.1, todas as correntes de entrada e saída do processo, fronteiras e interfaces dos equipamentos foram qualificadas como potenciais fontes de falha. No total, foram identificados 13 pontos no processo suscetíveis a falhas resultando em um total de 37 modos de falha diferentes para os quais foram realizadas diferentes simulações dinâmicas computacionais.

Para ilustrar os resultados obtidos, resultados parciais da simulação de falha relacionada à corrente de monômero no trocador de calor são apresentados abaixo. Para nenhum/menor fluxo de monômero para o trocador de calor, causado pelos modos de falha (i) válvula inadvertidamente fechada, (ii) falha de controle (iii) obstrução de tubulação; uma única simulação computacional foi realizada (simulação S-1).

Quatro valores reduzidos do valor normal de vazão foram aplicados à corrente de entrada de monômero para o trocador de calor, a fim de simular o cenário S-1, como mostrado na **Fig. 3**. Em uma primeira análise, pode-se esperar que a interrupção do fluxo de monômero para o condensador possa levar a uma reação de “runaway”, com efeitos de segurança relevantes na temperatura e pressão excedendo as máximas permitidas para os equipamentos. No entanto, os diferentes modelos forneceram resultados comparáveis: o rápido aumento de temperatura e pressão, que leva a operação à região termodinâmica crítica. Embora a energia removida através da condensação seja crucial para o controle de temperatura do reator, o termo de energia relacionado às correntes de entrada e saída do reator (adição de monômero fresco e remoção da lama quente) também é muito importante para o controle de temperatura. Além disso, próximo ao ponto crítico, o calor específico de líquido e vapor saturados aumentam significativamente, levando a uma resistência ao aumento de temperatura nessa região. Esses dois efeitos levam a resultados de simulação semelhantes, independentemente do modelo computacional usado para executar a análise numérica.

Portanto, embora a perda do controle de temperatura através do condensador possa aumentar significativamente a temperatura e a pressão do reator, isso não constitui diretamente um problema de segurança, pois as variáveis analisadas não excedem as condições máximas permitidas do equipamento. No entanto, a partir de uma análise crítica das informações obtidas pela simulação, é possível enxergar que a

condição crítica pode levar ao colapso da suspensão e representar um perigo significativo à operação do sistema, como danos aos componentes mecânicos do reator e até mesmo perda de contenção primária.

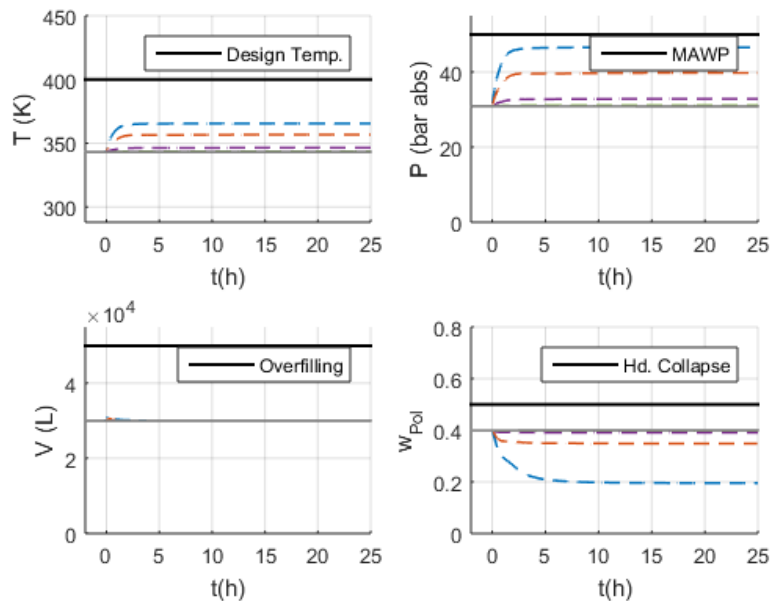


Fig. 3 – Comportamento das variáveis críticas para o cenário S-1 com o modelo 3

Fluxo mássico de monômero para o condensador: (---) Sem fluxo; (---) 50% fluxo nominal; (---) 90% fluxo nominal; (---) 99% fluxo nominal; (—) Nominal

4. DISCUSSÃO

Após as simulações, o impacto de falhas de dispositivos foi registrado em uma "Tabela de Análise de Perigos". Para fornecer uma referência comparativa para a abordagem computacional, a metodologia tradicional HAZOP (baseada no conhecimento humano) foi aplicada ao mesmo estudo de caso. O HAZOP foi realizado por um grupo composto por uma equipe de quatro pessoas, com um facilitador de HAZOP, um engenheiro de processo, um engenheiro de controle de processo e um engenheiro especializado no processo LIPP-SHAC. O estudo foi desenvolvido em duas seções de duas horas cada e os resultados da simulação não foram compartilhados com o grupo, de modo que as duas abordagens pudessem ser consideradas independentes uma da outra.

O objetivo das análises realizadas pelo HAZOP e da análise computacional foi a identificação de riscos potenciais. As análises propostas não se concentraram no projeto de salvaguardas ou na estimativa de riscos.

Usando a abordagem orientada ao processo (análises tradicionais do HAZOP), o estudo registrou cinquenta e seis cenários. Por outro lado, através da abordagem orientada a dispositivos (procedimento computacional), foram gerados trinta e sete cenários. As principais diferenças observadas entre os resultados obtidos nos dois métodos discutidos foram investigadas.

O número significativamente maior de cenários através do HAZOP tradicional está relacionado ao número expressivo (40%) de discussões repetitivas que foram necessárias na perspectiva da variável de processo, mas

redundante do ponto de vista da falha. Por exemplo, uma simulação relacionada a uma determinada falha foi repetida por três desvios diferentes de processo gerados pelas discussões do HAZOP.

Desconsiderando esse efeito de repetitividade e agrupando cenários semelhantes, as análises identificaram 31 cenários diferentes. A **Fig. 4** estratifica as principais diferenças observadas para ambas as aplicações.

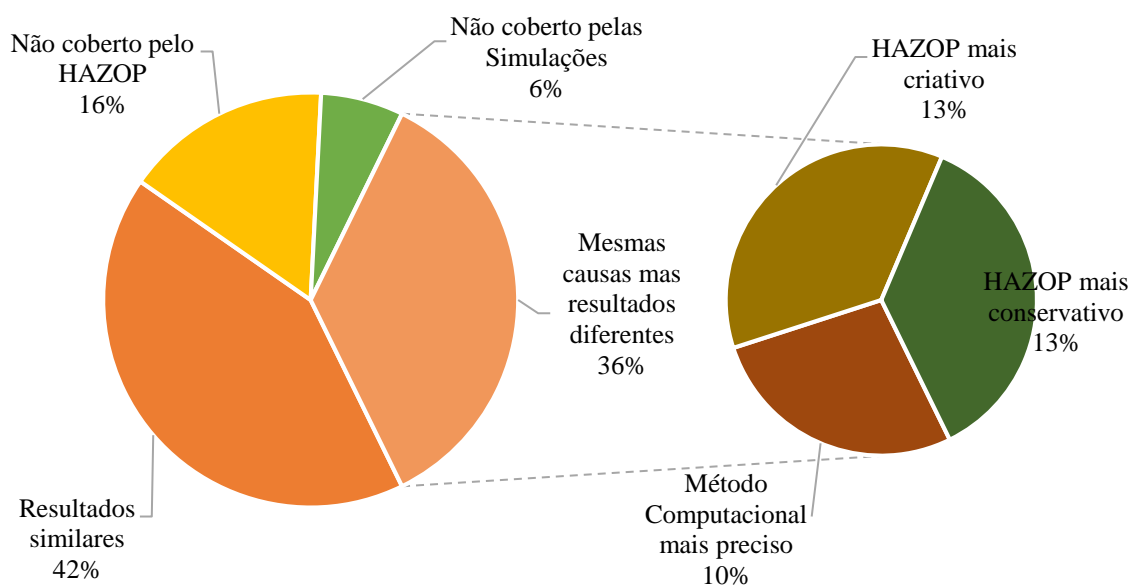


Fig. 4 – Comparação entre os métodos tradicional e computacional para análise de riscos

Aproximadamente metade das discussões alcançou os mesmos resultados. Esta é uma observação importante, levando em consideração o esforço necessário para desenvolver um modelo robusto capaz de descrever todas as condições de simulação. Supondo que o raciocínio baseado experiência seja capaz de identificar parte significativa dos riscos existentes, a aplicação da simulação talvez deva ser direcionada apenas para cenários complexos.

Considerando as diferenças entre a estrutura sistemática de ambos os métodos, a abordagem orientada a dispositivos usada no procedimento computacional detectou mais causas, embora muitas delas levassem a cenários não relevantes para a segurança. Essas causas nem sequer foram discutidas durante a análise HAZOP devido à capacidade do grupo de filtrar discussões relevantes. Por outro lado, a abordagem orientada a dispositivos foi assertiva ao englobar todos os dispositivos de processo, enquanto a abordagem orientada a processos, dependendo do escopo dos desvios do HAZOP, torna difícil cobrir todos os dispositivos de processo. No entanto, o método HAZOP motivou o pensamento criativo, que foi a principal razão para as causas adicionais identificadas nesse estudo e que não foram cobertas pelo estudo baseado em computação.

Aproximadamente um terço das discussões começou pelas mesmas causas, mas resultou em diferentes impactos na segurança. Quando os resultados computacionais foram menos assertivos do que a abordagem do HAZOP, pôde-se observar que a experiência operacional fez fosse possível correlacionar efeitos além dos resultados imediatamente fornecidos pelas simulações. No entanto, a falta de informações quantitativas e dinâmicas sobre o comportamento do processo tornou o grupo HAZOP propenso a conclusões conservadoras, o que poderia implicar na priorização de recursos mal direcionada e em investimentos desnecessários na tomada de decisões posteriores do processo.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo investigou o uso de um método computacional de identificação de perigos e uma análise tradicional baseada na experiência operacional. No presente trabalho, a abordagem heurística foi geralmente mais conservadora do que o estudo computacional, superestimando os riscos do processo. Em menos casos, o estudo baseado na experiência operacional também ignorou alguns mecanismos de risco. No entanto, foi

demonstrado que em quase 50% dos cenários discutidos, a experiência humana era suficientemente precisa para identificar a resposta do processo em situações de falha.

Quando cenários mais complexos, as diferenças entre os métodos foram enfatizadas. No entanto, para aproximadamente 60% dos casos em que foram observadas grandes diferenças entre as metodologias, a equipe do HAZOP conseguiu diagnosticar que a discussão proposta poderia ser imprecisa e recomendou uma análise computacional para complementar a sua reconhecida limitação.

Também foi notável que o método tradicional impulsionou a criatividade humana e incentivou o raciocínio além da relação imediata fornecida pelas simulações. A interpretação dos resultados da simulação de falhas limitou de alguma forma a extrapolação de consequências. No entanto, o procedimento computacional foi mais sistemático e permitiu melhor documentação dos perigos, uma vez que as simulações permitiram a observação do comportamento de múltiplas variáveis de processo, algumas das quais geralmente não são medidas na planta real, proporcionando melhor entendimento do mecanismo de ocorrência do cenário crítico, como também fornecendo informações dinâmicas e valores-limite para desvios críticos.

Percebeu-se também que, dependendo do procedimento, diferentes causas poderiam ser identificadas. Portanto, é importante reconhecer que, embora a abordagem computacional seja mais precisa e sistemática, ela se baseia em uma identificação heurística de falhas e ainda carrega a possibilidade de riscos encobertos.

Foi demonstrado que a abordagem orientada ao processo foi mais repetitiva e que o raciocínio do processo nos nós (agrupando muitos equipamentos e tubulações) pode contribuir para a negligência de possíveis fontes de perigos. A limitação dos desvios de HAZOP usados também pode ter contribuído para esse fator. No entanto, o raciocínio do processo em termos de desvios de variáveis desencadeou um pensamento mais criativo.

Com base na experiência alcançada neste trabalho, pode-se notar que a experiência humana e o conhecimento do processo podem, de fato, direcionar o esforço para simulações, descartando “simulações de baixo valor agregado”, uma vez que o conhecimento heurístico alcança resultados mais rápidos e em muitos casos suficientemente preciso. Recomenda-se, então, que, em vez de fazer uma análise computacional completa, os cenários sejam avaliados primeiro de acordo com a percepção humana, para descartar cenários não críticos, economizando algum tempo e esforço computacional. Quando não está claro se as condições máximas permitidas podem ser excedidas ou se o comportamento dinâmico pode introduzir riscos adicionais, os resultados da simulação podem ser valiosos e apoiar a compreensão de cenários complexos pré-selecionados, evitando subestimar ou superestimar os riscos potenciais.

6. REFERENCES:

- [1] H. Pasman, Risk Analysis and Control for Industrial Processes - Gas, Oil and Chemicals, 2015. <https://doi.org/10.1038/ni1584>.
- [2] R. Raoni, A.R. Secchi, M. Demichela, Employing process simulation for hazardous process deviation identification and analysis, Saf. Sci. 101 (2018) 209–219. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2017.09.014>.
- [3] J.C.S. Dutra, T. de S. a Feital, S. Skogestad, E.L. Lima, J.C. Pinto, Control of Bulk Propylene Polymerizations Operated with Multiple Catalysts through Controller Reconfiguration, Macromol. React. Eng. (2014) 201–216. <https://doi.org/10.1002/mren.201300139>.
- [4] A.G. Mattos Neto, J.C. Pinto, Steady-state modeling of slurry and bulk propylene polymerizations, Chem. Eng. Sci. 56 (2001) 4043–4057. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00076-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00076-8).
- [5] D.M. Prata, M. Schwaab, E.L. Lima, J.C. Pinto, Nonlinear dynamic data reconciliation and parameter estimation through particle swarm optimization: Application for an industrial polypropylene reactor, Chem. Eng. Sci. J. 64 (2009) 21–22. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.05.028>.
- [6] J. dos S. Silva, OTIMIZAÇÃO DA TRANSIÇÃO DE GRADES NA POLIMERIZAÇÃO EM MASSA DO PROPENO, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2018.