

APLICAÇÃO DO HAZOP DINÂMICO NA AVALIAÇÃO DE PERIGO OPERACIONAL EM UMA COLUNA DEPROPANIZADORA UTILIZANDO SIMULADOR DE PROCESSO

¹Diego Paulino de Araujo, ²Ana Carolina de Oliveira Plens

RESUMO

O trabalho teve por objetivo realizar uma análise de risco de um condensador de uma coluna de destilação, por meio do desenvolvimento da técnica de HazOp alinhada ao simulador de processo. Dessa forma, foram quantificados o processo e as possíveis salvaguardas deste estudo relacionando causa e efeito por meio dos métodos de perguntas de *What-If* e as consequências do HazOp. As variações foram feitas no processo à jusante e à montante da coluna onde foi avaliado o fechamento e a abertura de válvula de controle, elencando os problemas envolvidos em virtude na pressão do condensador. Nesse sentido, foram simuladas duas situações: uma com a válvula fechada em 95% e outra com a válvula aberta em 95%. Com esses valores foi observado o desvio da pressão do condensador, onde foi possível gerar uma análise de risco para identificar o grau de probabilidade e severidade do processo em estudo.

1. INTRODUÇÃO

O estudo HazOp (*Hazard and Operability Study*) é um procedimento qualitativo para análise metódica das etapas dos processos químicos e petroquímicos, a fim de determinar os possíveis desvios das condições normais de operação. A metodologia HazOp é realizada por uma equipe multidisciplinar de especialistas, a qual envolve pessoas da operação, manutenção, processos e segurança de processos [7] [3] [12].

Aplicando-se a metodologia, é possível classificar a causa e suas respectivas consequências por meio de uma matriz de risco podendo ser classificada como probabilidade versus severidade de forma qualitativa, informando novos cenários em relação ao processo que está sendo avaliado [7] [19].

A metodologia utiliza estruturação que gera perguntas sistemáticas através do uso de palavras guias durante sua análise. Essas perguntas são fundamentais na avaliação da metodologia podendo evitar falhas industriais. Alguns acidentes que marcaram a indústria química e *offshore* são conhecidos até hoje, tais como: Seveso, Bophal, flixborough, Piper Alpha que ocorreram por negligência operacional, em virtude da não utilização de uma metodologia de análise de risco eficiente que possibilitasse a prevenção desses cenários ou até mesmo o gerenciamento de mudanças para contornar possíveis problemas durante o acontecimento do evento [9] [12]. Com o passar do tempo, as indústrias perceberam que, para garantir sua sustentabilidade global, seria necessário aceitar o desafio de aprender com as falhas internas e externas para permanecerem no mercado. Embora os processos sejam mais sofisticados e cada vez mais complexo, o uso da metodologia HazOp é importante para garantir a segurança de processo e aceitação da indústria perante a sociedade [2] [7] [19].

Um modo de avaliar essa metodologia é criando simulações referentes a um equipamento ou uma etapa de processo que se deseja estudar. Os modelos dinâmicos são utilizados para compreensão de fenômenos que possam acontecer na alteração de um *set-point* ou em algumas variáveis de processo, tais como pressão, temperatura e vazão [10].

Isimite & Rubini (2016) abordam o estudo e investigação de acidentes de processos, por meio do desenvolvimento do estudo HazOp dinâmico em um acidente ocorrido em 2005 em uma refinaria do Texas com a empresa BP (British Petroleum).

O HazOp dinâmico baseia-se em uma simulação de processo combinada com HazOp tradicional que auxilia na investigação de cenários e avaliações de riscos de processo [3]. A utilização desta abordagem é útil para a identificação precisa de consequências e desvios relacionados a variáveis de processo. Desta forma, é possível reduzir a subjetividade na determinação das severidades e probabilidades de eventos catastróficos em relação aos processos químicos e petroquímicos.

1 MSc, Engenheiro de Processos - VS Engenharia Consultoria e Projetos LTDA

2 PhD, Engenheira Química - Universidade de Sorocaba

Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivo aliar o *software* de simulação de processo com o estudo HazOp a fim de avaliar os riscos de processo em uma torre despropanizadora em função do condensador da torre. A variável de estudo foi a pressão de saída do topo da torre e, posteriormente, foi desenvolvido uma análise HazOp com esta variante de processo.

2. DESCRIÇÃO

A destilação é uma técnica de separação utilizada pelas indústrias químicas e petroquímicas. O design e o controle dessa operação são vitais para assegurar a eficiência da planta química e assegurar a qualidade dos produtos obtidos durante o processo produtivo [6].

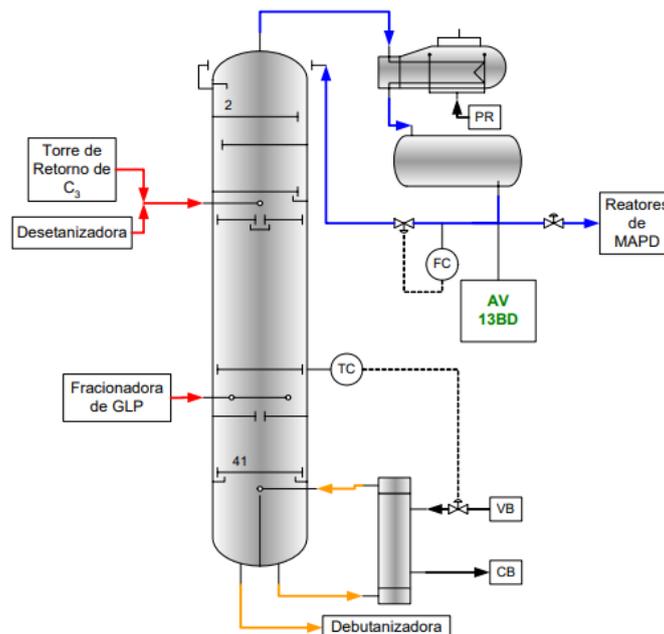
A torre despropanizadora é um equipamento que realiza a separação de multicomponentes cuja sua finalidade é produzir uma corrente rica no ponto de corte de C₃, ou seja, uma corrente de composto alifático contendo três carbonos em sua estrutura química. Subsequentemente, essa corrente é encaminhada para as indústrias petroquímicas de segunda geração para a produção do propeno e propano [4].

A torre contém de 42 a 47 estágios para efetuar a separação de seus produtos através dos fenômenos de transferência de massa e calor. As especificações de design do equipamento requerem a utilização de um condensador total, presente no topo da coluna, e um refeedor. O calor fornecido à torre é gerado pelo refeedor de fundo com vapor de baixa pressão em torno de 3,5 kgf.cm⁻² [4] [13].

A coluna é alimentada por três correntes de fundo, oriundas de outras colunas de destilação envolvidas no processo. Essas correntes são distribuídas por meio de duas alimentações independentes. A alimentação do processo é composta por uma mistura da corrente de fundo de uma coluna desetanizadora e pela corrente de fundo de uma torre de reciclo de corte C₃. As demais correntes de alimentação do fundo são constituídas por componentes leves, misturadas e alimentadas no 20º prato da torre. A corrente de fundo da torre de retificação de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) é formada por uma mistura com pesomolecular médio, o qual é introduzido no 32º estágio da torre despropanizadora [4] [13].

Em termos quantitativos, a carga é composta pelas correntes de fundo da torre de retificação de GLP e da desetanizadora, enquanto a torre de reciclo corresponde a menos de 3% da carga total da torre [4]. A Figura 1 indica um esquema simples da torre despropanizadora utilizada na geração de produtos para indústrias de segunda geração.

Figura 1 - Fluxograma de uma torre depropanizadora.



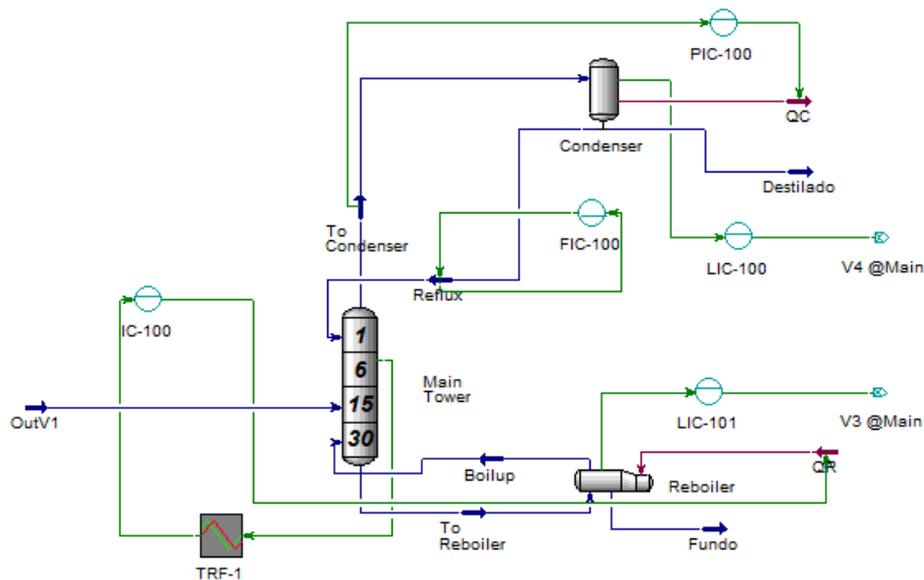
Fonte: Adptado Facchin (2005).

3. METODOLOGIA

Foi realizado o estudo do HazOp dinâmico com o *software* Aspen Tech® que tem como simulador o Hysys®. A versão do *software* é a 8.8 licenciado pela Universidade Metodista de Piracicaba (Unimep) situada em Santa Bárbara d'Oeste no interior de São Paulo.

Foi desenvolvido um PFD que fosse capaz de compreender alguns pontos entre o simulador *versus* HazOp. Primeiramente, foi desenvolvida a simulação da coluna despropanizadora em estado estacionário e, em seguida, foram inseridos os dados operacionais, bem como os parâmetros do processo para desenvolvimento do estado dinâmico. A Figura 2 mostra a coluna despropanizadora, já em seu estado dinâmico contendo controladores PID (Controlador Proporcional Integral Derivativo) sendo um controlador de pressão do condensador (PIC-100) e o outro para o controle do refluxo da torre (FIC-100), além de um atuador concentrado no refeedor.

Figura 2 - Coluna despropanizadora em modelo dinâmico de processo.



3.1 Caracterização dos componentes e escolha do pacote termodinâmico

Inicialmente, definiram-se os componentes químicos utilizados no processo de produção, independente dos equipamentos e modelos escolhidos. A descrição das frações molares, bem como dos componentes utilizados para simular a torre, é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - fração molar da corrente de alimentação

Componentes	Composiç
leves	ão
Propano	0,30
i-Butano	0,40
n-Butano	0,30

Fonte: Porfírio (2001).

Na segunda etapa, inseriu-se o pacote termodinâmico para representar o processo de destilação, garantindo que o modelo escolhido obtivesse resultados próximos aos dos processos reais.

Nesse sentido, optou-se pelo pacote do modelo termodinâmico de *Peng-Robinson* (PR), o qual é formado por equações de estado para resolver problemas de não linearidades entre propriedades líquido-vapor. O cálculo é aplicado em hidrocarbonetos (leves e pesados) e em processos que envolvem gás natural. A equação de *Peng-Robinson* pode ser descrita conforme a Equação 1.

$$P = \frac{RT}{v - \text{?}} - \frac{\text{?}(T)}{v^2 + 2\text{?}v - \text{?}^2}$$

(1)

Onde:

P = Pressão (Pa);

R = Constante dos gases ideais (m³.Pa.(K.mol)⁻¹);

v = Volume molar (cm³.mol⁻¹);

b e a = São parâmetros da equação que estão relacionados com a força de atração intermolecular e volume das moléculas, respectivamente;

T = Temperatura absoluta (K).

3.2 Parâmetros de processo da torre

Os parâmetros utilizados para a simulação foram retirados de artigos científicos e replicados no Hysys® com modificações para obter aproximações de resultado com foco na convergência da torre.

A dinâmica feita no processo foi baseada nos trabalhos de Kang, Guo (2016), Ramzan, Compart, Witt (2007), Rix et al. (2015) e Matos (2009) onde os autores realizaram análises de diferentes controles de processo para o estudo dinâmico. Neste trabalho o objetivo foi avaliar a pressão de saída no topo da torre para desenvolver o HazOp dinâmico. Na Tabela 2 são apresentadas as condições de operação da coluna de destilação

Tabela 2 - Condições de operação da torre despropanizadora

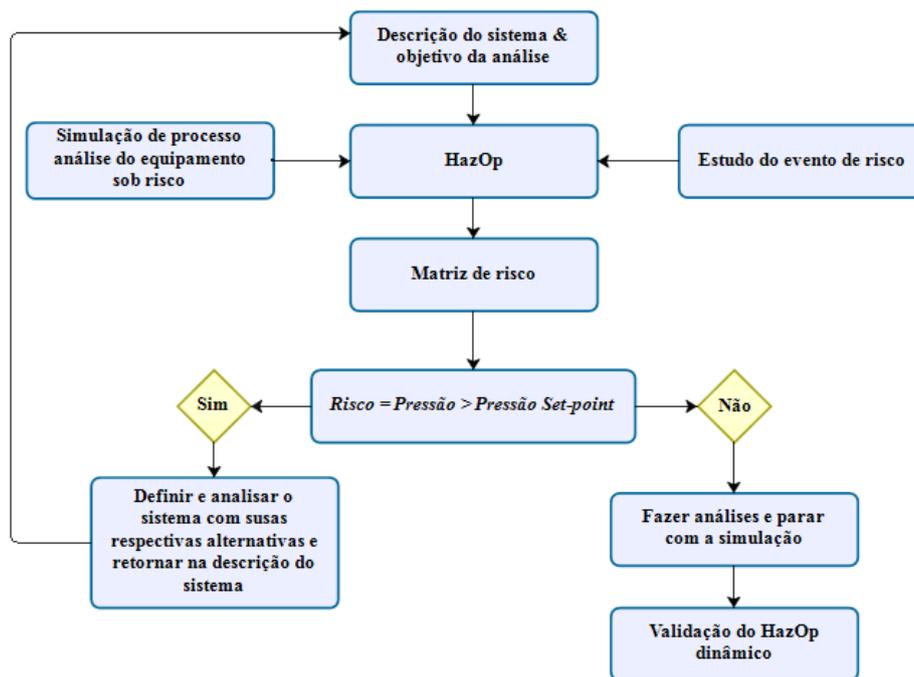
Variável	Valores	Unidade
Vazão de entrada da torre	605	Kg.h ⁻¹
Quantidade de pratos	30	-
Pressão superior	13,79	bar
Pressão inferior	13,94	bar
Temperatura superior	39,19	°C
Temperatura inferior	79,11	°C

Fonte: Porfírio (2001), Kang, Guo (2016).

3.3 HazOp – Estudo de Perigos e Operabilidade

Para criar a integração de um HazOp dinâmico, foi desenvolvido um fluxograma para analisar as etapas de simulação em conjunto com as informações requeridas para a análise de risco. Estudos feitos por Ramzan, Compart, Witt (2007) e Fu et al. (2012) simplificaram um diagrama esquemático entre a simulação de processo e o estudo HazOp. A Figura 3 é uma adaptação do fluxograma sugerido por Ramzan, Compart, Witt (2007) e Fu et al. (2012) afim de criar uma sistemática para entender o que se deseja quantificar na simulação de processo e, posteriormente, definir uma estrutura para a análise de risco.

Figura 3 - Fluxograma para validação do HazOp dinâmico.



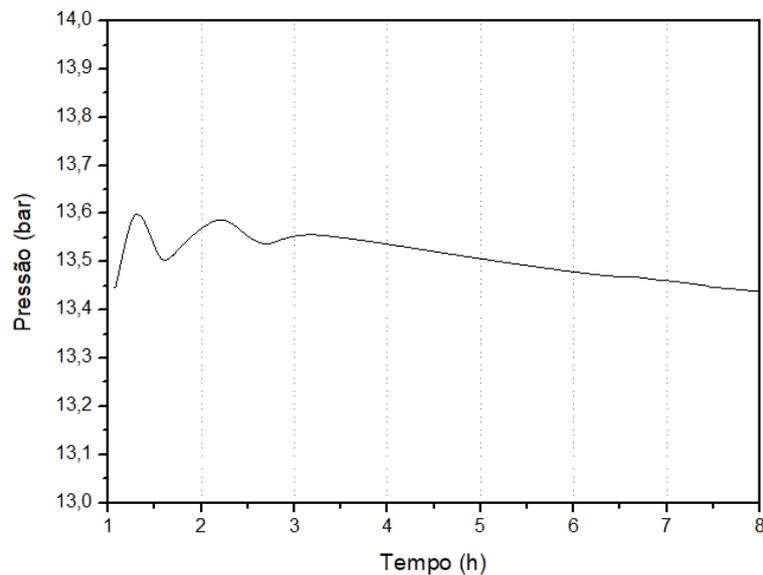
Fonte: Adaptado de Ramzan, Compart, Witt (2007), Fu et al. (2012).

Mapeando-se as condições operacionais da coluna, é possível criar condições de parâmetros operacionais dentro do simulador, o que possibilita determinar os valores aproximados de uma torre de separação. Com o fluxograma Figura 3 é possível incrementar as variáveis de processo juntamente com o HazOp, possibilitando analisar os diversos cenários de risco que a torre pode oferecer em um ambiente industrial.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando a condição de pressão do condensador que se encontra na Figura 4, nota-se o PV máximo e mínimo, que são as variáveis de processo que se deseja controlar, e o *set-point*, que corresponde ao ajuste das variáveis de processo durante a operação. A Figura 4 representa a operação normal onde a válvula de controle do destilado está aberta em 50% para padronizar o desenvolvimento da simulação e avaliar as condições abaixo e acima desse valor.

Figura 4- Condição inicial de operação.

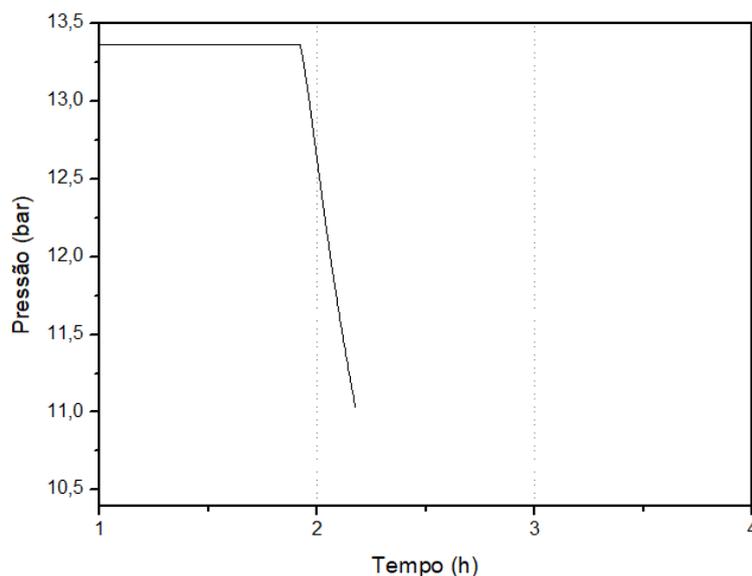


Os valores para as variáveis de processo foram adotadas com PV variando entre os limites de 13 e 14 bar para o condensador. Como observado na Figura 4, a representação dessa variação de pressão foi incrementando uma taxa de 2,5 % no controlador da corrente da coluna para verificar a sensibilidade e a resposta do modelo dinâmico e se o modelo corresponde a um ajuste superior ao que foi realizado na válvula de controle da coluna.

Após essa verificação, foram realizadas perturbações a jusante na válvula de saída do condensador, incrementando-se uma taxa de 5% no controlador da válvula de processo para verificar a variação de pressão no condensador. Na Figura 5 é possível analisar o perfil da pressão em relação ao tempo de duas horas de produção. Nota-se que o perfil da pressão assemelha - se ao apresentado por Matos (2009).

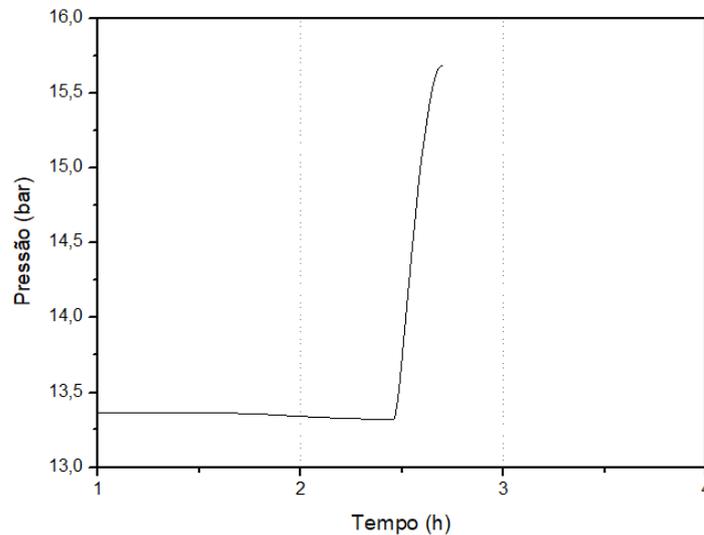
Foi verificado a perda de carga, em virtude da válvula ser fechada em 95% para simular uma falta de pressão no condensador, resultante de um problema mecânico ou operacional. Para que o sistema convirja, a válvula não pode ser fechada em 100% de modo que comprometa a execução da simulação. Com o HazOp tradicional não é possível obter detalhes para verificar quanto tempo demora para uma válvula retornar ao seu *set-point* de operação. Esse tipo de informação é de suma importância para consolidar um procedimento operacional ou até mesmo um treinamento operacional para esse tipo de cenário.

Figura 5- Condição da válvula de controle com fechamento de 95% da corrente de destilado.



A próxima condição foi incrementar uma taxa de 10% no controlador da válvula para avaliar uma abertura de 95% de vazão da válvula para verificar o aumento da pressão na corrente de destilado, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6- Condição da válvula de controle com abertura de 95% da corrente de destilado.



Nas Figura 5 e 6 foi demonstrado um valor pequeno de perturbação para exemplificar um cenário de sob pressão no condensador por uma falha na válvula de controle de destilado podendo aumentar ou diminuir drasticamente o valor de *set-point* e o mesmo podendo demorar horas para retornar ao seu patamar de processo original de operação. Com este tipo de falha pode ocorrer o cenário de ruptura no vaso, liberando vapor inflamável em forma de nuvem podendo ocasionar uma explosão em forma de nuvem.

De posse das informações referentes as variações de processo nas Figura 5 e 6 foi criado um HazOp tradicional combinado as consequências com a metodologia *What-If* para verificar se as salvaguardas são plausíveis na operação do condensador e também com o processo a montante e jusante da coluna de destilação.

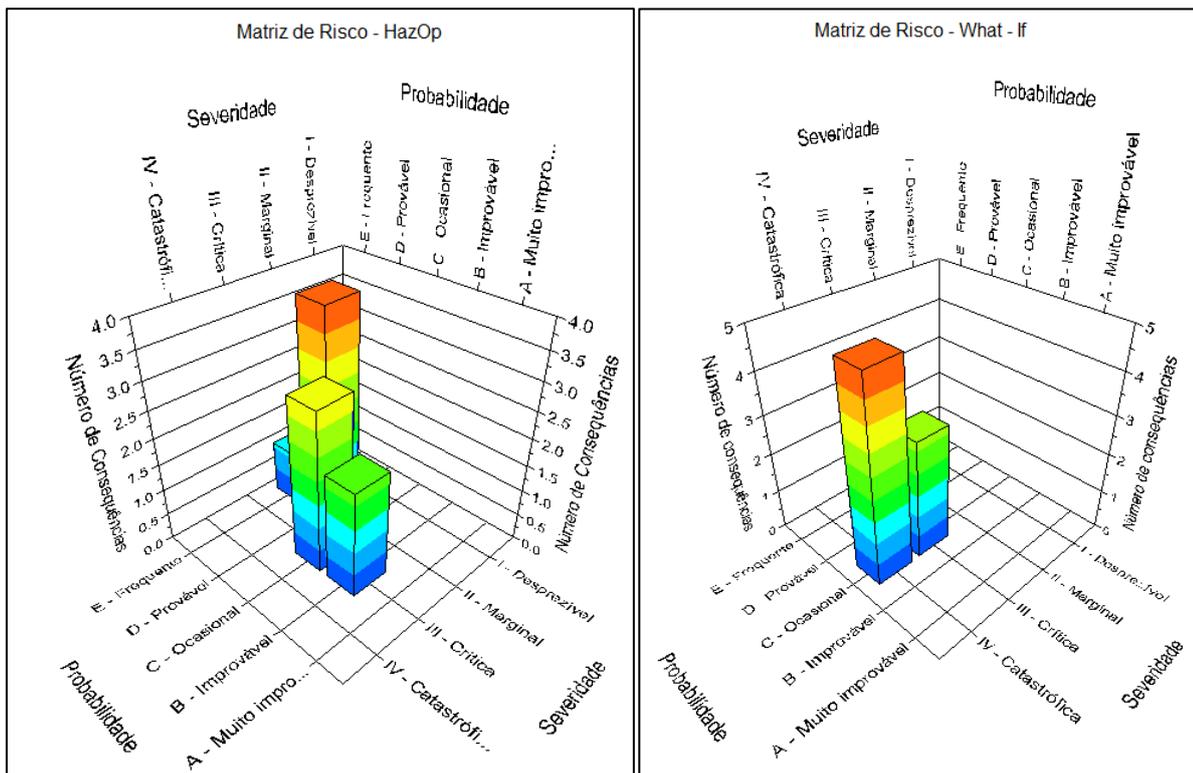
Para a classificação do risco foi utilizada a norma FEPAN N° 01/01 Fev 2016 para classificar os riscos encontrados no HazOp e no *What-If*. A Figura 7 apresenta a matriz de risco para avaliação das perguntas referente ao estudo de risco da torre de separação.

Figura 7- Matriz de Risco conforme Fepam (2016).

SEVERIDADE	PROBABILIDADE				
	A - Muito improvável	B - Improvável	C - Ocasional	D - Provável	E - Frequente
I - Desprezível	1	1	1	2	3
II - Marginal	1	1	2	3	4
III - Crítica	2	2	3	4	5
IV - Catastrófica	2	3	4	5	5

Os resultados obtidos entre as metodologias de análise de risco foram distribuídos em um gráfico tridimensional para realizar o comparativo entre as perguntas realizadas no HazOp com as respectivas salvaguardas. Com as perguntas realizadas no HazOp, foram formuladas perguntas do *What-If* para validar as salvaguardas que estavam de acordo com a proposta do estudo de HazOp para o condensador da coluna. Na Figura 8 a está descrito o estudo feito com a metodologia HazOp com sua respectiva resposta sobre a matriz de risco Fepam (2016) indicada na Figura 7. Na Figura 8 b está descrito o estudo *What-If* feito com as perguntas do HazOp para validar as salvaguardas requeridas para a torre de destilação.

Figura 8 (a)- Matriz de risco HazOp e **(b)** matriz de risco *What-If*.



Verificando os cenários de sob pressão no condensador, é possível perceber que a tendência para a matriz HazOp Figura 8 a não possui consequências de catástrofe da coluna, considerando os cenários mais críticos. Referente a pontuação da norma, o cenário não aceito é o nível 5 da matriz Fepan, pois pode acarretar danos na instalação ou ao seu entorno. Nesse sentido deve-se estudar uma forma de como abaixar esse cenário de não aceito para moderado e aceito.

Para a matriz *What-If* Figura 9 b foi possível validar as salvaguardas juntamente com as perguntas do HazOp, notando-se que o cenário é crítico em virtude das condições de processo da coluna. No entanto, as salvaguardas mencionadas neste estudo complementam o HazOp com as salvaguardas pré-estabelecidas. O *What-If* obteve mais salvaguardas que complementassem no estudo HazOp para minimizar ainda mais o estudo realizado no condensador da coluna de destilação.

5. CONCLUSÃO

Incrementar o estudo computacional de simulação e controle de processo na disciplina Segurança de Processo pode conceder algumas vantagens como visto nas Figura 5 e 6 no requisito de entender qual a melhor condição para operar uma coluna de destilação. Isso está ligado ao pilar de entendimento de perigos e riscos no elemento que corresponde ao conhecimento do processo.

Com base nas informações geradas é possível determinar os cenários críticos como foi exemplificado nas Figura 5 e 6 entre baixa e alta pressão. Esses perfis característicos não seriam possíveis verificar com o HazOp, pois a ferramenta é apenas semi qualitativa onde as palavras guias são utilizadas, desta forma não é possível verificar mais informações adicionais em processos e/ou equipamentos.

Estudos com essa finalidade permitem criar diversos cenários plausíveis de operação e até mesmo de possíveis catástrofes, afim de evitá-las aplicando-se o estudo computacional. Entretanto, é possível conciliar os métodos tradicionais de análise de risco e quantificar os dados gerados pelo simulador, posteriormente desenvolver outros estudos de segurança em relação ao equipamento e até mesmo gerar banco de dados. É interessante mencionar que as palavras guias para metodologias semi qualitativas se tornaram quantitativas e mais assertivas durante uma análise de risco. Isso é representado na Figura 8, onde realizou-se um HazOp e o *What-If*, sendo que o segundo auxiliou na validação das salvaguardas e, ajustando as duas ferramentas no quesito de verificar mais condições de falha do condensador, foi possível caracterizar as salvaguardas sugeridas no HazOp, conciliando com as no *What-If*, que permitiu sugerir novas salvaguardas, as quais não foram identificadas no estudo inicial do HazOp.

Este tipo de estudo pode ser custoso em relação ao H/h (Homem/hora) requerido para o seu desenvolvimento, uma vez que a maior dificuldade é gerar as condições próximas da realidade da planta e entender o que se deseja extrair durante esse estudo. Além de mapear cenários plausíveis de operação ou até de testar outras condições de processo em ambiente computacional, sua aplicação é eficiente para a compreensão e entendimento de todas as condições operacionais que se pode trabalhar, além de avaliar as fases durante a startup de um equipamento ou até mesmo uma planta industrial.

6. REFERENCES:

- [1] Costa, E. C. Modelagem e simulação do processo de fracionamento, purificação e desacidificação do produto líquido orgânico obtido via craqueamento termo – catalítico de óleos vegetais. (Tese de Doutorado) – UFPA. Belém do Pará, p. 37. 2014.
- [2] Dunjó, J., Fthenakis, V., Vílchez, J & Arnaldos, J. (2010). “*Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review*”. Journal of Hazardous Materials. 173, 19-32.
- [3] Eizenberg, S., Shacham, M., & Brauner, N. (2006). “*Combining HAZOP with dynamic simulation – Applications for safety education*”. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 19, 754-761.
- [4] Facchin, S. Técnicas de análise multivariável aplicadas ao desenvolvimento de analisadores virtuais. (Dissertação de Mestrado) – UFRGS. Rio Grande do Sul, p. 101. 2005.
- [5] Fepam. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (2016). (Acessado Julho 2020). http://www.fepam.rs.gov.br/central/formularios/arq/manual_risco.pdf
- [6] Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L & Andersen, L. Princípios das Operação Unitária. 1 Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos. p. 68-125 1982.
- [7] Fu, J., Zhao, D., Zhang, C & Liu, Y. (2012). “*Quantitative process risk analysis based on dynamic simulation of gas gathering process*”. (Acessado em Maio 2020). <https://www.scientific.net/AMR.399-401.2226>
- [8] Isimite, J. & Rubini, P. (2016). “*A dynamic HAZOP case study using the Texas city refinery Explosion*”. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 40, 496-501.
- [9] Janosovský, J., Danko, M., Labovský, J & Jelemenský, L. (2017). “*The role of a commercial process simulator in computer aided HAZOP approach*”. Process Safety and Environmental Protection. 107, 12-21.
- [10] Johnson, R. (2010). “*Beyond-compliance uses of HAZOP/LOPA studies*”. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 23, 727-733.
- [11] Kang, J., Guo, L. (2016). “*HAZOP analysis based on sensitivity evaluation*”. Safety Science 88, 26-32.
- [12] Leite, F.S.L. Sistema de gestão de segurança de processo baseada em risco na indústria do petróleo. (Teste de Conclusão de Curso) – UFRJ. Rio de Janeiro, p. 39. 2018.
- [13] Lopes, M.S. Estudo de caso de uma coluna depropanizadora. (Teste de Conclusão de Curso) – UFRGS. Rio Grande do Sul, p. 12. 2011.
- [14] Matos, J. S. G. C. Aplicação do HAZOP dinâmico na avaliação de perigo operacional em uma coluna de destilação de uma planta de separação de ar. (Dissertação de Mestrado) – UFRJ. Rio de Janeiro, p. 35. 2009.
- [15] Nunes, P. L. Simulação dinâmica de uma unidade de destilação atmosférica de petróleo usando o software UniSim – Estudo de caso. (Dissertação de Mestrado) – UFRN. Rio Grande do Norte, p. 22. 2014.
- [16] Porfírio, C. R. Implantação de um controlador multimodelos em uma coluna depropanizadora industrial. (Dissertação de Mestrado) – USP. São Paulo, p. 19. 2001.
- [17] Ramzan, N., Compant, F, & Witt, W. (2007). “*Application of extended HAZOP and event-tree analysis for investigating operational failures and safety optimization of distillation column unit*”. Process Safety Progress 26, 248-257.

[18] Rix, A., Bodizs, L., & Schallenberg, J. (2015). “*Dynamic models safety shutdown of distillation columns*”. Chemical Engineering Research and Design 99, 208-214.

[19] Wu, J. & Lind, M. (2018). “*Management of system complexity in HAZOP for the Oil & Gas industry*”. IFAC PapersOnLine. 51 (8), 211-2016.