



## ANÁLISE HAZOP DE UNIDADE EM PEQUENA ESCALA PARA PRODUÇÃO DE BIOQUEROSENE A PARTIR DE ÉSTERES DE CADEIA CURTA

HAZOP ANALYSIS OF SMALL-SCALE UNIT FOR BIOKEROSENE PRODUCTION FROM SHORT-CHAIN ESTERS

ANÁLISIS HAZOP DE UNA UNIDAD A PEQUEÑA ESCALA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOQUEROSENO A PARTIR DE ÉSTERES DE CADENA CORTA

Amanda Lívia de Oliveira <sup>1\*</sup>, Francisco de Assis da Silva Mota <sup>2</sup>, Antônio Bruno de Vasconcelos Leitão <sup>3</sup>, Nayara Cardoso de Medeiros <sup>4</sup>, & Francisco de Tarso Ribeiro Caselli <sup>5</sup>

<sup>1 2 4 5</sup> Engenharia de Produção, <sup>3</sup> Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Piauí

<sup>1\*</sup> [amandaoliveira@ufpi.edu.br](mailto:amandaoliveira@ufpi.edu.br) <sup>2</sup> [assismota@ufpi.edu.br](mailto:assismota@ufpi.edu.br) <sup>3</sup> [antoniobruno@ufpi.edu.br](mailto:antoniobruno@ufpi.edu.br) <sup>4</sup> [nayaramedeiros@ufpi.edu.br](mailto:nayaramedeiros@ufpi.edu.br)

<sup>5</sup> [tarso.caselli@ufpi.edu.br](mailto:tarso.caselli@ufpi.edu.br)

### ARTIGO INFO.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biocombustível; Biodiesel; Bioquerosene; Hazop.

**KEYWORDS:** Biofuel; Biodiesel; Biokerosene; Hazop.

**PALABRAS CLAVE:** Biocarburante; Biodiésel; Bioqueroseno; Hazop.

\*Autor Correspondente: Oliveira, A. L., de.

### RESUMO

Com a intensa industrialização, vem a necessidade por mais fontes de energias para suprir essa demanda. Com a conscientização da população e dos governos, a busca por fontes de energias renováveis, como biocombustíveis, é crescente. Nesse sentido, tem-se o bioquerosene para aviação, como substituto ideal para querosene derivado do petróleo, podendo ser obtido pelo processo de transesterificação de gordura animal ou vegetal e álcool. Contudo, em processos industriais como estes, indústrias como estas podem gerar diversos riscos podendo comprometer a saúde do operador, equipamentos, produção e outros. Por esse motivo, tem-se como objetivo realizar uma análise de riscos em uma unidade de produção em pequena escala de bioquerosene para aviação, utilizando a metodologia Hazop, na qual, separa a unidade de produção em nós, analisando-os separadamente. Assim, com riscos identificados, é possível encontrar as causas, consequências e melhores ações para evitá-los. Dessa forma, foi observado que vazão e temperatura são os principais parâmetros que influenciam nessa unidade de produção, sendo necessário estudá-los para padronizar as cargas ideais de cada equipamento, e não gerar transtornos. Também os equipamentos de controle, como válvulas, bombas e tubulações, devem seguir com as manutenções periódicas.

### ABSTRACT

With intense industrialization comes the need for more energy sources to supply this demand. With the awareness of the population and governments, the search for renewable energy sources, such as biofuels, is growing. Aviation biokerosene is an ideal substitute for petroleum-based kerosene and can be obtained through the transesterification process of animal or vegetable fat and

alcohol. However, in industrial processes such as these, it can generate several risks that can compromise the health of the operator, equipment, production, and others. For this reason, the objective is to perform a risk analysis in a smallscale production unit of biokerosene for aviation, using the Hazop methodology, which separates the production unit into nodes, analyzing them separately. Thus, with identified risks, it is possible to find the causes, consequences, and best actions to avoid them. With this, it was observed that flow rate and temperature are the main parameters that influence this production unit, being necessary to study them in order to standardize the ideal loads of each equipment, and not to generate disturbances. Also, control equipment such as valves, pumps and piping should follow periodic maintenance

### RESUMEN

Con la intensa industrialización llega la necesidad de más fuentes de energía para abastecer esta demanda. Con la concienciación de la población y los gobiernos, crece la búsqueda de fuentes de energía renovables, como los biocombustibles. En este sentido, el bioqueroseno para la aviación es un sustituto ideal de la parafina derivada del petróleo, que puede obtenerse mediante el proceso de transesterificación de grasa animal o vegetal y alcohol. Sin embargo, en procesos industriales como estos, las industrias pueden generar diversos riesgos que pueden comprometer la salud del operador, los equipos, la producción y otros. Por esta razón, se pretende realizar un análisis de riesgos en una unidad de producción de bioqueroseno para la aviación en pequeña escala, utilizando la metodología Hazop, en la cual, se separa la unidad de producción en nodos, analizándolos por separado. Así, con los riesgos identificados, es posible encontrar las causas, consecuencias y mejores acciones para evitarlos. Con esto, se observó que el flujo y la temperatura son los principales parámetros que influyen en esta unidad de producción, siendo necesario estudiarlos para estandarizar las cargas ideales de cada equipo, y no generar trastornos. También, los equipos de control, tales como válvulas, bombas y tuberías deben seguir con el mantenimiento periódico.



## 1. INTRODUÇÃO

A crescente industrialização, a necessidade de fontes de energia e inúmeros conflitos políticos envolvendo dependência energética influenciam na busca por meios alternativos de fontes de energia. Por isso, vários são os esforços de pesquisadores na busca e no melhoramento dos combustíveis “verdes”, como biodiesel e bioquerosene, que apresentam impactos ambientais menores quando comparados a combustíveis fósseis. O biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação ou de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, respectivamente (Xing, Chen, & Jiang, 2023; Akkarawatkhosith, Bangjang, Kaewchada, & Jaree, 2023).

Outro combustível que possui grandes vantagens na área industrial, é o querosene de aviação, produzido por fracionamento por meio de destilação à pressão atmosférica, seguidos de tratamentos e acabamentos. Como todo e qualquer processo envolvendo sistemas complexos na área química, à possibilidade de ocorrer falhas em decorrências de suas condições operacionais, tais como temperatura, vazão e pressão, sendo assim necessário tomar medidas de precauções de segurança e operação no processo (Zecerdegani, Ordudari, Karimi, Esmaeili, & Khorvash, 2023). Tendo como ponto de partida crucial para se ter um sistema funcionando com o menor risco de acidentes, análise Hazop é um estudo prático que visa não só diminuir os riscos de operação nos processos, mas também permite aos engenheiros e operadores dos sistemas terem conhecimento sobre o funcionamento, medidas de manutenção e controle de riscos do sistema (Lacerda, Rocha, & Poly, 2020).

Com base nessas informações, esse estudo tem como objetivo realizar uma análise de risco utilizando a metodologia Hazop em uma unidade de produção de bioquerosene para aviação a partir de ésteres de cadeias curtas. Dessa forma, sendo possível identificar os riscos existentes, com suas causas, consequências e propor planos de melhorias.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. HAZARD AND OPERABILITY STUDIES – HAZOP

A análise HAZOP, Estudo de Riscos e Operabilidade, é uma técnica desenvolvida para se identificar e avaliar riscos, ou problemas de segurança, em uma planta de processos e problemas operacionais que, embora não perigosos, poderiam comprometer a habilidade da planta em atingir a produtividade prevista no projeto (Severi, Pérez, Pascual, Muñoz, & Lebrero, 2022; Chokparova, Becher, Klose, Strufe, & Urba, 2023). Dentre os riscos que se pode citar estão: Riscos humanos, riscos técnicos ou tecnológicos, riscos incontroláveis e riscos mercadológicos.

Hashemi-Tilehnoee, Pazirandeh, & Tashakor (2010) e Dunjón, Fthenakis, Vílchez, & Arnaldos (2010), definem que, análise HAZOP, é o método mais abrangente e utilizado na indústria química como meio de identificar riscos a partir das condições básicas de operação,



efetuando modificações nos parâmetros e observando as consequências dessas mudanças. A característica essencial da abordagem do estudo de HAZOP, então, é rever todos os desenhos e/ou procedimentos de processo em uma série de reuniões, durante as quais uma equipe multidisciplinar utiliza um protocolo definido para avaliar metodicamente o significado dos desvios da intenção de projeto (Noakes, Chow, Ko, & McKa, 2011).

## 2.2. BIOQUEROSENE

No Projeto de Lei Nº 3213/2009 aborda sobre um Programa Nacional de Bioquerosene incentivando a produção do biocombustível destinado a aviação. Ademais, na Lei Nº 12.490/2011 no Art.6º, define o bioquerosene de aviação como “substância derivada de biomassa renovável que pode ser usada em turborreatores e turbopropulsores aeronáuticos ou, conforme regulamento, em outro tipo de aplicação que possa substituir parcial ou totalmente combustível de origem fóssil”.

O método de obtenção do bioquerosene comumente utilizado são processos transesterificação, onde os óleos de origem vegetal ou animal, os triglicerídeos, reagem com álcool na presença de um catalisador, convertendo-se em glicerina e ésteres (metílicos e etílicos), e estes, por sua vez, passam por uma destilação fracionada para a obtenção dos ésteres de cadeias leves compatíveis ao querosene de aviação de origem fóssil (Chiaramonti et al., 2014; Haster, Santos, & Fabris, 2019; Fonseca, Oliveira, Fréty, & Sales, 2021).

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O presente trabalho utilizou como objeto de pesquisa a unidade em pequena escala para produção de bioquerosene a partir de ésteres de cadeia curta. A unidade física encontra-se no Laboratório de Pesquisas e Desenvolvimento GEAPI (Grupo de Estudos Avançados em Processos Industriais) localizado na UFPI (Universidade Federal do Piauí). A unidade piloto tem 3.10 m comprimento, 2.30 m de altura (Figura 1).

**Figura 1.** Unidade piloto para produção de biodiesel.



Fonte: Autores (2023).



O processo se inicia com a mistura de óleo rico em ácidos láuricos, C12, álcool, metanol, e solução com catalisador, NaOH ou KOH, no reator de misturas, TR01. Em seguida, de forma a melhorar essa mistura, o produto da reação é enviado ao mix estático MX01. Nele o produto da reação passa por mais uma etapa de forma a favorecer o deslocamento cinético e separação da glicerina. Do tanque TP01 é enviado um surfactante de forma a favorecer a separação da glicerina. Este processo possui dois elementos, equipamentos, destinados à separação das fases relacionais, o hidrociclone (HC01) e o decantador horizontal (DC01), ambos em fase de estudos para melhoramento das operações de separação e para onde a mistura de ésteres e glicerina são enviados.

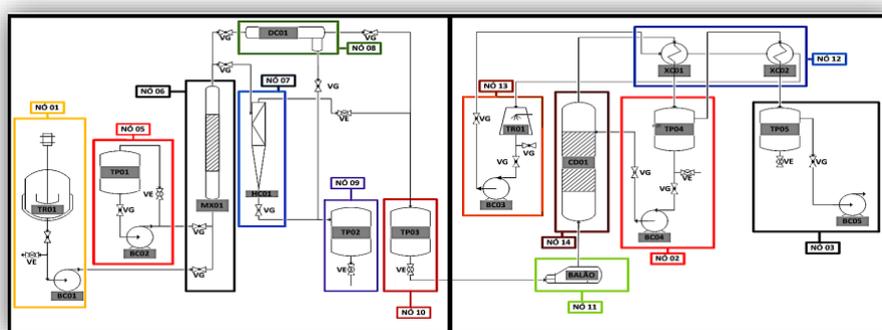
As fases, isoladas são enviadas aos tanques TP02 e TP03. A fase éster, acumulada no TP03, é enviada à base do sistema de destilação, balão de destilação, de forma a iniciar o processo de isolamento das frações compatíveis com o querosene de aviação (QAV). Do tanque de armazenamento do biodiesel, TP03, o biocombustível é direcionado para a coluna de destilação CD01, na qual ocorre a destilação dos ésteres de biodiesel. Nesta é obtido o produto de topo, ésteres de cadeia C6 a C12, estes sendo condensados nos tanques TP04 e TP05. As frações, condensadas nos trocadores de calor, XC01 e XC02, são as frações compatíveis com o querosene de aviação.

### 3.2. CONSTRUÇÃO DAS PLANILHAS

Para realização do estudo e análise HAZOP, foi necessário primeiro, conhecer o funcionamento do sistema e a partir disso definir os pontos críticos suscetíveis à falha do equipamento. Dessa forma, o estudo Hazop consiste na separação de uma unidade de produção de acordo com os equipamentos envolvidos, onde cada separação é chamada de nó. Esses nós são analisados com base nos processos químicos e os parâmetros (vazão, temperatura, nível, pressão e outras) envolvidos.

Com os parâmetros delimitados, vem a escolha dos desvios, que são as alterações nos parâmetros dos quais desviam-se do padrão (maior, menor, nenhuma e outras). Palavra-Guia é a junção do parâmetro e do desvio, como por exemplo maior vazão. Com essas informações, é possível identificar causas e consequências dos principais riscos existente em uma unidade de produção, e assim, propor medidas que devem ser tomadas para minimizar ou sanar tais problemas (Figura 2).

**Figura 2.** Fluxograma da unidade piloto de produção divididas em nós para realização da análise Hazop.



Fonte: Autores (2023).



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do conhecimento sobre o sistema proposto, assim como os mecanismos de funcionamento dos dispositivos que os compõem e o fluxograma de processo mostrando os pontos a serem analisados, a metodologia Hazop foi aplicada. No Quadro 01, foi analisado o funcionamento do reator TR01 que tem a função de reagir a mistura de óleo e álcool. Esse dispositivo tem um mecanismo de agitação controlado pela rotação das pás acopladas a um motor e outro de aquecimento controlado através de uma resistência elétrica.

Quadro 01. Análise Hazop do Nó 1 – Reator.

Sistema/Subsistema: Mistura e Reação		Parâmetros: Vazão, pressão e temperatura		Nó 01: Reator	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa (s)	Consequência (s)	Providência (s)
01	Temperatura	Mais	Defeito na resistência elétrica; Problemas nas malhas de controle.	Explosões e contaminações; Oxidação da matéria prima; Não acompanhamento de parâmetros reacionais.	Averiguar se a resistência está nos parâmetros de projeto; Se necessário, corrigir as malhas de controle.
		Menos	Problemas nas malhas de controle; Resistência fora dos parâmetros de projeto.	Mistura não reagida; Impedimento de realização do processo.	Verificação da malha de controle; Verificar se a resistência é correspondente a especificada no projeto.
			Falha no fornecimento de energia; Defeito na resistência elétrica.	Mistura não reagida; Impedimento de realização do processo.	Reestabelecer a fonte de energia; Averiguar condições dos processos.
	Vazão	Mais	Abastecimento excessivo; Válvulas e bombas centrífugas desconfiguradas.	Redução da vida útil do reator; Desbalanceamento molar.	Inspeccionar processo de abastecimento do reator.
		Menos	Problemas no fornecimento de matéria-prima; Tubulações fraturadas ou problemas na bomba abastecimento.	Redução na produção; Possibilidade vazamentos e contaminação ambiental.	Melhorar a logística; Rever a compatibilidade química dos materiais construtivos e rever projeto mecânico.
		Nenhuma	Falha no fornecimento de energia; Perda da bomba por corrosão no rotor; Rompimento das tubulações.	Paralisação total do processo.	Rever fontes auxiliares de energia; Manutenção ou reposição da bomba.

Fonte: Autores (2023).

Com a análise desse nó, é possível identificar que as principais falhas no reator estão ligadas aos parâmetros vazão e temperatura, por conta dos mecanismos de agitação e aquecimento existente nesse dispositivo. Os próximos nós analisados foram 02 e 03, como mostra a Tabela 02, que tem como equipamentos principais os condensadores TP02 e TP03, onde são obtidos os ésteres C6 e C12 condensado, após o processo de destilação do biodiesel.



**Citação (APA):** Oliveira, A. L., de., Mota, F. A. S., Leitão, A. B. V., Medeiros, N. C., de., & Caselli, F. T. R. (2023). Análise Hazop de unidade em pequena escala para produção de bioquerosene a partir de ésteres de cadeia curta. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(5), Edição Especial "Lean além da Manufatura", 80-90.

**Quadro 02.** Análise Hazop do Nó 2 e 3 – Condensadores.

Sistema/Subsistema: Refrigeramento		Parâmetros: Vazão e Nível		Nó 02 e 03: Condensadores	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
02	Vazão	Mais	Falhas nas válvulas de controle de água de refrigeração ou no sistema de controle.	Problemas no arrefecimento; Falha no condensador.	Rever aos componentes químicos dos materiais; Manutenção da torre de resfriamento.
		Menos	Menor refluxo.	Torre de destilação trabalha de forma ineficiente.	Rever o dimensionamento da bomba.
	Nível	Mais	Falha no sistema de controle de nível.	Excesso de nível no fundo da torre.	Rever os sensores de níveis e controladores.
		Menos	Menor refluxo.	Torre de destilação trabalha de forma ineficiente.	Rever o dimensionamento da bomba.

Fonte: Autores (2023).

Em específico, o nó 02 é trabalhado uma parte importante no sistema de destilação, o refluxo. No topo da coluna de destilação, existe um condensador, que condensa o vapor proveniente da coluna, sendo parcialmente condensado, designado por refluxo. Já na Tabela 03, é analisado o nó 04, onde encontra-se a coluna de destilação do biodiesel. Esse equipamento é responsável por isolar o produto da mistura reacional que também contém água, ácido carboxílico e álcool não reagidos.

**Quadro 03.** Análise Hazop do Nó 4 – Coluna de Destilação.

Sistema/Subsistema: Separação		Parâmetros: Vazão e temperatura		Nó 04: Coluna de destilação	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
04	Vazão	Mais	Falha nas válvulas de controle de vazão; Falha no bombeamento	Sobrecarga do condensador e refeedor.	Manutenção na malha de controle de abastecimento; Verificar o projeto quanto a capacidade de produção.
		Menos	Falha nas válvulas de controle de vazão.	Impedimento da passagem de líquido para o refeedor; Falha no sistema de fracionamento.	Verificar a atuação das válvulas; Verificar o projeto dos pratos.
		Nenhuma	Problemas no sistema de geração de vapor.	Parada parcial da unidade.	Rever a seleção de material mecânico; rever projeto mecânico.
	Temperatura	Mais	Falha no sistema de aquecimento; Obstrução da tubulação de fluidos refrigerados.	Sobrecarga do condensador; Redução da eficiência produtiva.	Manutenção nos equipamentos envolvidos no aquecimento e tubulações.
		Menos	Falha no sistema de refrigeração. Obstrução da tubulação de fluidos aquecidos.	Sobrecarga do aquecimento; Redução da eficiência produtiva.	Manutenção nos equipamentos envolvidos no refrigeração e tubulações.

Fonte: Autores (2023).



Com análise do nó 04 é possível identificar que, para o bom funcionamento da coluna de destilação, é necessário que as malhas de controle de abastecimento da coluna, aquecimento e refrigeração estejam em condições adequadas, assim sendo viável controlar a vazão e temperatura desse sistema. Na Tabela 04, foram analisadas as possíveis falhas nos tanques dos nós 05, 09 e 10. O tanque do nó 05 (TP01) armazena um surfactante que é inserido no sistema quando é desejado a emulsão entre óleo e glicerina. Logo, a liberação do mesmo em um momento não planejado é indesejado. Os tanques TP02 e TP03 têm a função de armazenar os componentes glicerina e biodiesel já separados, respectivamente.

**Quadro 04.** Análise Hazop do Nó 5, 9 e 10 – Tanques de Armazenamentos.

Sistema/Subsistema: Mistura & Reação; Separação.		Parâmetros: Vazão e pressão		Nós 05, 09 e 10: Tanques de armazenamentos	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
5, 9 e 10	Vazão	Mais	Problemas na bomba; Problema no fornecimento de óleo e/ou álcool.	Rompimento das tubulações; Contaminação ambiental; Prejuízos econômico com manutenção.	Reparar danos ambientais, se houver; realizar manutenção preventiva nos trechos de tubulação.
		Menos	Desfeito na bomba; vazamento na tubulação; Problemas no sistema de alimentação.	Diminuição da produção; Mistura com baixa força de arrasto no MIX;	Troca ou manutenção da bomba e tubulações; Verificação do nível de fluido; Verificação do sistema de alimentação.
		Nenhuma	Falha no fornecimento de energia; bomba quebrada; Válvulas fechadas ou tubulações fraturadas.	Impedimento total da realização do processo; logística prejudicada.	Reparo imediato da bomba. Instalações de fontes de energia auxiliares; Reparo das tubulações; averiguar plano de manutenção.

Fonte: Autores (2023).

As possíveis falhas nos nós 05, 09 e 10 estão ligados somente ao parâmetro vazão, pois as variações de temperatura e pressão nos fluidos que entram ou saem dos tanques são mínimas e não influenciam na eficácia do processo de forma relevante. Na Tabela 05, foi analisado apenas o parâmetro de vazão, pois as variações de temperatura e pressão são mínimas e não influenciam no processo e muito menos no seu funcionamento. Ou seja, a eficiência do Mix Estático depende somente da vazão para gerar o arrasto satisfatório garantindo a reação por completa da mistura e a passagem do fluido para os outros dispositivos.



**Quadro 05.** Análise Hazop do Nó 6 – Mix Estático.

Sistema/Subsistema: Mistura & Reação		Parâmetros: Vazão, pressão e temperatura		Nó 06: Mix Estático	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa(s)	Consequência(s)	Providência(s)
06	Vazão	Menos	Problema na bomba; Vazamento nas tubulações.	Acúmulo de líquido no Mix; Diminuição da produção.	Averiguar plano de manutenção; Reparo nas bombas e tubulações.
		Nenhuma	Rompimento na tubulação; falha da bomba; Falha no fornecimento de energia ou na malha de controle;	Paralisação da produção; Problemas de logística;	Reparo de tubulações e bombas e bomba; rever plano de manutenção; reajustar logística;

Fonte: Autores (2023).

O mix estático é um dispositivo que tem como função nesse sistema aumentar a eficiência reação iniciada no reator da mistura óleo e álcool. Como foi colocado de forma verticalizada ele depende, principalmente, da vazão para o seu perfeito funcionamento. Após a mistura reagir completamente a mesma é direcionada para o decantador ou para o ciclone ou para ambos ao mesmo tempo. Na Tabela 06, é referente a análise de falha do nó 07 que engloba o ciclone e algumas tubulações. Esse dispositivo tem a função de separar a mistura reagida no Mix Estático.

**Quadro 06.** Análise Hazop do Nó 7 – Ciclone.

Sistema/Subsistema : Separação		Parâmetros: Vazão, pressão e temperatura		Nó 07: Ciclone	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providencia (s)
07	Vazão	Menos	Vazamento nas tubulações; Falhas na bomba; Defeito na válvula;	Diminuição da produção; Problemas com a logística.	Reparo ou troca das válvulas, tubulações e bomba; Verificar plano de manutenção; Rearranjar plano de manutenção;
		Nenhuma	Falha no sistema de bombeamento; vazamento das tubulações; Válvula fechada ou com defeito;	Problemas de logística; Paralisação do processo.	Rever plano de manutenção; Averiguar fornecimento de energia e malha de controle; Reajustar logística;

Fonte: Autores (2023).

Os parâmetros necessários para o funcionamento do ciclone estão ligados a somente a vazão do fluido, a variação da temperatura e pressão no processo são mínimas e não influenciam no processo de separação biodiesel e glicerina. Na Tabela 08, trata da análise de falha de outro dispositivo de separação, o Decantador. Tem como função separar por diferença de densidade o biodiesel da glicerina



**Citação (APA):** Oliveira, A. L., de., Mota, F. A. S., Leitão, A. B. V., Medeiros, N. C., de., & Caselli, F. T. R. (2023). Análise Hazop de unidade em pequena escala para produção de bioquerosene a partir de ésteres de cadeia curta. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(5), Edição Especial "Lean além da Manufatura", 80-90.

**Quadro 07.** Análise Hazop do Nó 8 – Decantador.

Sistema/Subsistema: Separação		Parâmetros: Vazão		Nó 08: Decantador	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
08	Vazão	Menos	Problema no acionamento da válvula ou defeito da mesma; Vazamento nas tubulações; Falha na bomba.	Baixa eficiência no processo de decantação; Impossibilita o biodiesel de escoar pela tubulação.	Avaliar nível do biodiesel pelos visores; Reparo ou troca da bomba e tubulações; rever plano de manutenção;
		Nenhuma	Quebra da bomba ou tubulações; Falha no fornecimento de energia.	Paralisação total do processo; logística prejudicada;	Reajustar logística; providenciar novas opções para fonte de energia;

Fonte: Autores (2023).

Assim como no ciclone, no decantador a temperatura e a pressão não influenciam no seu rendimento de decantação, agindo apenas graças ao arrasto do fluido gerado pela vazão do fluido causado pela bomba. O decantador e o ciclone apresentam a mesma função: separar o biodiesel da glicerina. Com os dois dispositivos acoplados ao sistema é possível avaliar qual tem maior eficiência quando se varia os parâmetros de processo. Na Tabela 08, é analisado o nó 11, na qual trata-se do refeedor, no qual foram avaliados os parâmetros de vazão e temperatura, cabendo ressaltar que não havendo passagem do processo do nó 10 ao nó 11 o processo não teria continuidade, ou seja, o sistema de destilação não irá funcionar.

**Quadro 08.** Análise Hazop do Nó 11 – Refeedor.

Sistema/Subsistema: Aquecimento		Parâmetros: Vazão e temperatura		Nós 11: Refeedor	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
11	Vazão	Menos	Falha nas válvulas de controle de vazão de vapor; Problemas no sistema de geração de vapor.	Parada parcial da unidade.	Rever o projeto mecânico; Realizar manutenções mensais.
	Temperatura	Mais	Problemas na passagem do líquido para a coluna de destilação.	Aumento da pressão do gás; Aumento da temperatura; Possibilidade de explosões.	Realizar manutenções mensais.

Fonte: Autores (2023).

O refeedor tem a função de receber o biodiesel separado e aquece-lo para envio da coluna destilação, além de auxiliar no refluxo da mesma. Sua alimentação está ligada ao tanque de armazenamento de biodiesel, por esse motivo, entende-se que deve analisar a malha de controle e tubulação que entre esses dois equipamentos. Riscos relacionados a temperatura elevada estão ligado diretamente ao refeedor, sendo necessário manutenções periódicas. Tabela 09 é referente ao nó 12, que trata das possíveis causas, consequências e efeitos dos trocadores de calor, sobre o sistema de destilação. Os principais pontos a serem observados são as perdas de cargas térmicas, quando há a troca térmica.



**Quadro 09.** Análise Hazop do Nó 12 – Trocador de Calor.

Sistema/Subsistema: Refrigeramento		Parâmetros: Vazão, pressão e temperatura		Nós 12: Trocadores de Calor	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
12	Vazão	Mais	Maior intensidade de turbulência;	Ruptura da tubulação; Ineficiência na condensação.	Avaliar a carga térmica; reavaliar sistemas de utilidade industrial (água de refrigeração).
		Menos	Menores cargas térmicas do refeedor.	Tempo de destilação menor; Insuficiência dos trocadores de calor na separação de substâncias.	Avaliar o sistema de vácuo e dimensionamento do refeedor.
	Temperatura	Mais	Ruptura dos tubos a condições de elevadas temperaturas; Aumento da velocidade da substância.	Contaminação dos fluidos; Perda de carga; poderá causar dilatação térmica do material.	Rever projeto de controle, que evite oscilações na temperatura; especificar o tipo das substâncias.
		Menos	Precipitação das impurezas nas superfícies dos tubos.	O óleo não terá pressão suficiente para escoar até a coluna.	Avaliar a eficiência do projeto.

Fonte: Autores (2023).

Os trocadores de calor desse nó são responsáveis por refrigerar a solução oriunda da torre de destilação, sendo que o XC01 trabalha também para proporcionar refluxo para a coluna de destilação. Logo, é importante manter sua temperatura e vazão dentro do padrão delimitado afim de que tenha uma eficiência na destilação. Tabela 10 é referente ao nó 13, que trata das possíveis causas, consequências e efeitos da torre de resfriamento, atuando com os condensadores. No qual são considerados os parâmetros de vazão, pressão e temperatura.

**Quadro 10.** Análise Hazop do Nó 13 – Torre de resfriamento.

Sistema/Subsistema: Refrigeramento		Parâmetros: Vazão, pressão e temperatura		Nó 13: Torre de resfriamento	
Nó	Parâmetros	Desvio	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
13	Vazão	Menos	Falha no sistema de resfriamento	Menor potencial de resfriamento; Bomba de vácuo trabalha de forma ineficiente.	Rever aos componentes químicos dos materiais e dimensionamento da bomba; Manutenção da torre de resfriamento.
	Pressão	Menos	Válvula de expansão bloqueada ou entupida; Gás refrigerante insuficiente.	O fluido de refrigeração terá dificuldade de escoar; Problemas na absorção de calor.	Rever a compatibilidade química dos materiais; Rever o sistema de bombeamento.
	Temperatura	Mais	Líquido absorve calor ao passar pela bomba.	Falha no processo de resfriamento.	Realizar manutenções mensais.

Fonte: Autores (2023).



Os nós estudados na tabela acima referem-se a torre de resfriamento. O parâmetro de vazão nos mostra que, aumentando a vazão do líquido é possível o aumentar de temperatura. A pressão torna-se importante por se responsável por influência na eficiência na transferência de calor. A torre é de total importância para o sistema, pois o líquido que passa pela bomba adquire grandes quantidades de temperatura, sendo necessário o resfriamento.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo teve como objetivo realizar uma análise de riscos e operabilidade Hazop em uma unidade de produção de bioquerosene a partir de ésteres de cadeia curta. Para isso, a unidade de produção foi separada em 13 nós e analisados, identificando os riscos com suas causas, consequências e planos de ação. Assim, a análise Hazop realizada mostrou-se satisfatória, uma vez que, foi identificado e exemplificado que uma simples alteração nos parâmetros de processo pode acarretar diversos riscos na unidade de produção.

Observou-se, também, que os parâmetros vazão e temperatura foram os mais recorrentes no estudo, devido os processos químicos e equipamentos envolvidos no sistema. Logo, a adoção de uma manutenção periódica nos equipamentos de controle, bombeamento e tubulações, são importantes para o rendimento positivo da unidade, bem como, analisar o projeto, como um todo, a fim de que, todos os padrões de alimentação, temperatura, pressão e nível sejam compatíveis com os equipamentos. Dessa forma, o estudo mostra-se importante por apresentar uma metodologia de análise de riscos pouco difundida, Hazop, e aplicá-la em uma nova linha de produção de bioquerosene, obtendo dados satisfatórios. Portanto, esse trabalho auxiliará em pesquisas futuras tanto sobre a análise do processo como sobre a unidade em si.

## REFERÊNCIAS

- Akkarawatkhoosith, N., Bangjang, T., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2023). Biodiesel production from rice bran oil fatty acid distillate via supercritical hydrolysis–esterification–transesterification in a microreactor. *Energy Reports*, 9, pp. 5299-5305, 2352-4847. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.348>
- Chokparova, Z., Becher, K., Klose, A., Strufe, T., & Urbas, L. (2023). Cryptographic protocol for privacy-preserving integration of HAZOPs in modular process plants. *Computers & Chemical Engineering*, 108295, 0098 - 1354. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108295>
- Dunjó, J., Fthenakis, V., Vilchez, J. A., & Arnaldos J. (2010). Hazard and operability (HAZOP) analysis, A literature review. *Journal of Hazardous Materials*, 173(3), pp. 19-32, 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.076>
- Fonseca, N. S. C., Oliveira, V. C., Fréty, R., & Sales, E. A. (2021). Thermal and Catalytic Fast Pyrolysis of Oily Extracts of Microalgae: Production of Bioquerosene. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 32(4), 811–822. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20200232>
- Harter, L. V. L., Santos, D. Q., & Fabris, J. D. (2019). Destilação atmosférica do biodiesel derivado do óleo de macaúba ou do palmiste para obtenção da fração de ésteres leves para uso como combustível de aviação. *Química Nova*, 42(2), 143–148. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170320>
- Hashemi-Tilhehnoe, M., Pazirandeh, A., & Tashakor, S. (2010). HAZOP-study on heavy water research reactor primary cooling system. *Nuclear Energy*, 37(3), pp. 428-433, 0306-4549. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.12.006>
- Lacerda, A. L. F., Rocha, G. S., & Poly, T. T. A. (2020). Análise preliminar de perigos aplicada à produção de cerveja. (Projeto Final de Graduação), Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil.
- Noakes, N., Chow, C.C. L. Ko, E., & McKay, G. (2011). Safety education for chemical engineering students in Hong Kong: Development of HAZOP Study teaching module. *Education for Chemical Engineers*, 6(2), pp. e31 - e55, 1749-7728. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2010.11.001>
- Severi, C. A., Pérez, V., Pascual, C., Muñoz R., & Lebrero, R. (2022). Identification of critical operational hazards in a biogas upgrading pilot plant through a multi-criteria decision-making and FTOPSIS-HAZOP approach. *Chemosphere*, 307(4), 135845, 0045 - 6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135845>
- Xing, Z., Chen, C., & Jiang, X. (2023). A molecular investigation on the mechanism of co-pyrolysis of ammonia and biodiesel surrogates. *Energy Conversion and Management*, 289, 17164, 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117164>
- Zevedegani, S. K., Ordudari, Z., Karimi, A., Esmaili, R., & Khorvash, M. K. (2023). Comparison of the chemical health risk assessment of exposure to metal fumes for the furnace operator of a foundry industry using quantitative and semi-quantitative methods. *Heliyon*, 9(1), 2405-8440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12913>

