

**ANÁLISE HAZOP DE UMA UNIDADE DE DESTILAÇÃO ATMOSFÉRICA DE
PETRÓLEO E SIMILARIDADE EM PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS
SUSTENTÁVEIS PARA AVIAÇÃO (SAFs)**

 <https://doi.org/10.56238/arev6n3-015>

Data de submissão: 04/10/2024

Data de publicação: 04/11/2024

Caio Braga de Sousa

Universidade Federal do Ceará - UFC

E-mail: caiobragasousa@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8898-2533>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1052623215695269>

Francisco de Assis da Silva Mota

Dr. em Engenharia de Teleinformática

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

E-mail: assis.mota@ufrn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2286-5289>

LATTES: <https://lattes.cnpq.br/9509458964109076>

Antônio Bruno de Vasconcelos Leitão

Dr. em Engenharia em Engenharia Mecânica

Universidade Federal do Piauí - UFPI

E-mail: antoniobruno@ufpi.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5770-942X>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/5567801490506745>

Danielle Christine Almeida Jaguaribe

Dra. em Engenharia de Química

Universidade Federal da Paraíba - UFPB

E-mail: dcaj@academico.ufpb.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1836-5403>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/5182923745438960>

Geordy Souza Pereira

Dr. em Engenharia Mecânica

Universidade Federal do Piauí - UFPI

E-mail: geordy@ufpi.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7025-328X>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1287499167497435>

Nayara Cardoso de Medeiros

Dra. em Engenharia de Produção

Universidade Federal do Piauí - UFPI

E-mail: nayaramedeiros@ufpi.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1620-4318>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/2918639969872058>

Francisco Rafael Campos de Macedo

Dr. em Engenharia de Materiais
Universidade Federal do Piauí - UFPI
E-mail: francisco.campos@ufpi.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9018-3856>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9723284671263507>

Matheus das Neves Almeida

Dr. em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Piauí - UFPI
E-mail: matheusalmeyda@ufpi.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-9295>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1617448355677392>

RESUMO

A produção de derivados de petróleo se destaca mundialmente, dentre os processos de produção de energias não renováveis, como a mais conhecida mundialmente. Neste trabalho, uma coluna de destilação atmosférica que processava 100.000 barris/dia (662,5 m³/h) de petróleo cru foi simulada com o uso do software CHEMCAD®. Foram obtidos deste procedimento o Diagrama de Fluxo de Processo (PFD) e o Diagrama de Tubulação e Instrumentação (PI & D) para a unidade, correspondente a automação da mesma. Posteriormente, uma análise HAZOP (Estudo de Perigo e Operabilidade) foi conduzida no intuito de se identificar riscos na unidade que, embora não perigosos, poderiam comprometer a habilidade desta em atingir sua produtividade. Os principais riscos do processo estiveram relacionados a incêndios, explosões e contaminações ambientais provenientes de vazamentos e rompimentos em tubulações, bombas, trocadores de calor, a própria coluna, entre outros equipamentos. A análise HAZOP foi capaz, através do uso das palavras guia, identificar os possíveis riscos operacionais advindos dos desvios nas intenções de operação, como possibilidades de incêndios, explosões, contaminações ambientais e suas consequências. Foi possível identificar os riscos que estão associados à seleção de materiais, ao projeto mecânico dos equipamentos às especificações dos acessórios. Sendo, portanto, o estudo realizado um levantamento importante para redução de possíveis falhas na indústria petrolífera. E, sendo este estudo um aprofundamento a respeito dos processos de destilação para produtos derivados do petróleo. Entende-se que seu aprofundamento, em decorrência do desenvolvimento de novos produtos renováveis, em especial os combustíveis sustentáveis para aviação (SAFs), devido serem processos semelhantes de purificação, empregam a mesma metodologia para identificação de possíveis falhas na produção.

Palavras-chave: Destilação Atmosférica. PI&D. Operações Unitárias.

1 INTRODUÇÃO

Dentre todas as indústrias de processo existentes, o refino de petróleo é considerado como àquele em que a complexidade é elevada ao máximo. Esta complexidade está intrinsecamente relacionada a três fatores principais: as operações unitárias propriamente ditas, o controle dos processos de refino e os aspectos relacionados à segurança e ao meio ambiente. Quanto a estes dois últimos tópicos, é bem enfatizado por Fahim *et al.* (2009) que todos os serviços de rotina numa refinaria devêm estar de acordo com altos padrões de segurança e operabilidade.

Como principal processo das grandes refinarias, a destilação atmosférica do petróleo tem aspectos delicados de operação e segurança que devem ser levados em consideração no projeto de qualquer unidade de refino. Isto se deve ao fato de que a parada desta operação unitária, por quaisquer motivos, levará a parada da planta inteira quando a mesma estiver em operação.

A análise HAZOP (Hazard and Operability Studies) 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 (AIChE, 1992). Matos (2009) e Dunjó *et al.* (2010), definem que, a análise HAZOP, é o método mais abrangente e utilizado na indústria química como meio de identificar riscos. Santos e Theobald (2013) definem o HAZOP com uma técnica indutiva, qualitativa e estruturada.

A técnica HAZOP, segundo Sinnott (2005), foi desenvolvida pela Petrochemical Division of Imperial Chemical Industries (ICI), na Inglaterra, sendo reportada pela primeira vez por Lawley em 1974, no livro intitulado de *Operability Studies and Hazard Analysis*.

A metodologia está baseada em um procedimento estruturado que gera perguntas, baseadas em um conjunto de “palavras guias” (*Guide Words*), aplicadas a pontos críticos do sistema em estudo (nós), visando descobrir todos os possíveis desvios das condições normais de operação (TELLES, 2003), identificando as causas responsáveis por tais desvios e as respectivas consequências (AGUIAR, 2008).

Embora existam diversos trabalhos que reportam resultados da análise HAZOP aplicada a processos de alta complexidade e risco, a aplicação prática da mesma é praticamente inexistente quando se refere à destilação atmosférica de petróleo, e mesmo sendo essa operação de elevada importância. Portanto, tal trabalho pretende preencher uma lacuna no que diz respeito à compreensão dos riscos deste tipo de unidade, bem como servir como um guia de aplicação para projetos futuros.

2 METODOLOGIA

2.1 SIMULAÇÃO DO PROCESSO

Como em todo projeto de um processo, a construção do diagrama de PI & D sucede a elaboração do PFD (*Process Flow Diagram*). Este mostra o arranjo das operações unitárias no processo, as conexões entre as correntes, as vazões (de preferência mássicas ou molares), composições destas e condições de operação como pressão e temperatura (SINNOTT, 2005).

Para construção do PFD do processo de destilação atmosférica do petróleo, um caso real de estudo foi considerado, sendo que este foi modelado e simulado com a resolução simultânea de balanços de massa e energia com o auxílio do software CHEMCAD[®]. Este caso de estudo foi proposto por Fahim *et al.* (2009). A implementação do caso proposto no software escolhido foi realizada seguindo o procedimento proposto por (ROCHA, 2009). A coluna atmosférica em questão tinha a capacidade de processar 100.000 barris/dia (662,5 m³/h) de petróleo cru já previamente dessalgado. Os dados termofísicos do petróleo utilizado para a modelagem e simulação foram também obtidos de Fahim *et al.* (2009). A Tabela 1 são apresentados os dados de ponto de ebulição verdadeiro (PEV), sendo que o petróleo utilizado tinha um °API igual de 29,32.

Tabela 1 - Dados de PEV para o petróleo usado.

% em Volume Recolhido	Ponto de Ebulição (°F)
0,0	15,0
4,5	90,0
9,0	165,0
14,5	240,0
20,0	310,0
30,0	435,0
40,0	524,0
50,0	620,0
60,0	740,0
70,0	885,0
76,0	969,0
80,0	1015,0
85,0	1050,0

Na Tabela 02, de acordo com simulações, são apresentados a composição de *Light Ends* medidas em percentagem em volume.

Tabela 2 - Composição de *Light Ends*.

Componente	% Volume de Líquido
Metano	0,0065
Etano	0,0225

Propano	0,32
i-Butano	0,24
n-Butano	0,82
Total	1,409

As condições operacionais deste sistema, bem como todas as especificações utilizadas estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições Operacionais.

Carga da Unidade	T= 25 ⁰ C; P= 101,3 kPa $\dot{v} = 1,00 \times 10^5$ barris/dia (662,5 m ³ /h)
Aquecedor da Carga	T=330 ⁰ C (temperatura de aquecimento); $\Delta P = 34,47$ kPa (5psia) (queda de pressão).
Coluna Atmosférica	N _t = 29 (número de estágios teóricos); $\Delta P_c = 9$ psia (62,05kPa) (no condensador); P _c =135,8 kPa (pressão no condensador); P _f =218,6 kPa (pressão no fundo); T _c = 37,8 ⁰ C (Temperatura no condensador); T _{pts} =121,1 ⁰ C (Temperatura no estágio de topo); T _{bts} = 315,6 ⁰ C (Temperatura no fundo); F _p = 28 (estágio de alimentação); Q _p =28 (carga térmica de fundo).
Vapor para o <i>Stripping</i> da Coluna	T = 190,6 ⁰ C; P = 1034,2 kPa $\dot{M}_{ms} = 3402$ kg/k(vazão mássica).
Vapor para o <i>Stripper</i> lateral de óleo diesel	T = 148,9 ⁰ C; P = 344,7 kPa; $\dot{M}_{ds} = 1360,8$ kg/h.
Vapor para o <i>Stripper</i> lateral de AGO	T = 148,9 ⁰ C; P = 344,7 kPa; $\dot{M}_{As} = 1134$ kg/h.
Especificações Gerais	Vazão de Nafta = 152,4 m ³ /dia; 7,91 x 10 ⁶ kJ/h (no Stripper de querosene).

As condições de refluxo no qual utilizou-se *pumpsaround* é mostrado na Tabela 4. Nela é apresentada os estágios de retirada e retorno para a coluna de fracionamento.

Tabela 4 - Especificações para os *pumpsaround*.

<i>Pump around</i>	Estágio de Retirada	Estágio de Retorno	\dot{v} (barris/dia)	Carga Térmica (Btu/h)
PA 1	2	1	50000	-5,80 x 10 ⁷
PA 2	17	16	30000	-3,90 x 10 ⁷
PA 3	22	21	30000	-3,69 x 10 ⁷

Os dados relacionados aos strippers laterais do sistema são apresentados na Tabela 5. Nela é identificada a localização de esgotamento e retorno de material no qual a fluido dinâmica da torre foi obtida.

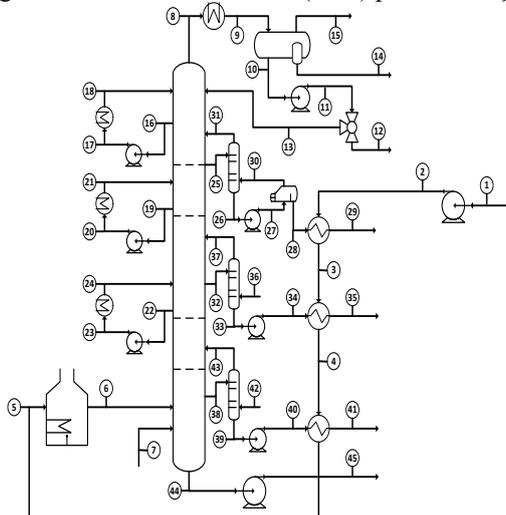
Tabela 5 - Especificações os strippers laterais.

<i>Stripper</i>	Estágio de Retirada	Estágio de Retorno	\dot{v} (barris/dia)
Kero - SS	9	8	9300
Diesel - SS	17	16	19250
AGO - SS	22	21	4500

Após inserção de todos estes dados no software CHEMCAD[®], os balanços de massa e energia foram resolvidos. Com os resultados obtidos, o PFD do processo foi construído, sendo este apresentado na Figura 1. Os fluxos avaliados na Figura 1 foram, portanto, as intenções de operação para a unidade. Ou seja, são elas que devem ser mantidas em seus pontos fixos (set points).

A partir do PFD, apresentado, abaixo (Figura 01), o diagrama de PI & D para a unidade foi construído baseando-se nas sugestões dadas por Nisenfeld e Seemann (1981) e Kister (1992). No diagrama, também são apresentadas as seleções de posição de falha das válvulas: se falha - fecha (FF) ou falha - abre (FA)

Figura 1 – Diagrama de fluxo de Processo (PFD) para destilação atmosférica.



2.2 CONSTRUÇÃO DAS PLANILHAS DE HAZOP E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os subsistemas e os nós de estudo selecionados, seguiu-se a etapa de construção das planilhas de HAZOP para os desvios possíveis. Ou seja, cada variável (parâmetro) desta tabela foi analisada para cada nó estudo identificado na Figuras 2 e 3.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os fluxogramas de Controle (PI&D) e de marcação de nós. As malhas de controle foram desenvolvidas com uma sistemática Feedback. Para tanto, sensores de temperatura, nível e fluxo redirecionam seus sinais aos controladores que conferem os valores obtidos nos sensores com os setpoints padrões de projeto.

Todo o processo de análise de segurança, utilizando o estudo HAZOP, possui como dados de avaliação a simulação, inicialmente, realizada no CHEMCAD[®]. As frações apresentadas na Tabela 2 (Composição de Light Ends) foram alimentadas no diagrama da Figura 1. Como resultado da simulação tem-se as composições de cada corrente de processo (Tabela 6). E, com a obtenção destes dados, faz-se o monitoramento de todas as condições as quais foram estimadas o funcionamento do sistema de destilação atmosférico apresentado. Sabendo que, cada equipamento, projetado e desenvolvido, possui suas relações de dados e folhas de especificações técnicas. E, com estes dados, foi possível acompanhar condições de fadiga, esforço mecânico e térmico no qual cada equipamento poderá suportar na unidade de processamento.

E, neste acompanhamento de processo, o controle da unidade torna-se, extremamente, importante, visto que cada equipamento, escolha de material, juntas de vedação, possui um limite de seguridade o qual deve ser respeitado.

Tabela 6 – Correntes de entrada e saída na unidade de destilação de petróleo.

Corrente	1	2	3	4	5	6	7	8
Fração de Vapor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	1,00	1,00
T (°C)	27,0	27,1	47,0	88,0	98,0	330,0	190,6	133,8
P (kPa)	101,3	517,1	482,6	448,2	413,7	379,2	1034,2	197,9
Vazão Mássica (kg/h)	5,82x10 ⁵	3,40x10 ³	1,86x10 ⁵					
Corrente	12	13	14	15	16	19	22	25
Fração de Vapor	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T (°C)	38,9	39,8	39,8	39,8	156,30	264,0	320,6	205,7
P (kPa)	135,8	135,8	135,8	135,8	198,7	213,6	218,6	205,8
Vazão Mássica (kg/h)	1,11x10 ⁵	6,92x10 ⁴	5,71x10 ³	0,00	2,57x10 ⁵	1,68x10 ⁵	1,75x10 ⁵	6,23x10 ⁴
Corrente	28	32	34	36	38	40	42	45
Fração de Vapor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	1,00	1,00

T (°C)	234,8	264,0	245,1	148,9	320,6	291,3	148,9	344,2
P (kPa)	197,9	213,6	197,9	344,7	218,6	197,9	344,7	197,9
Vazão Mássica (kg/h)	5,09x10 ⁴	1,25x10 ⁵	1,11x10 ⁵	1,36x10 ³	3,37x10 ⁴	2,72x10 ⁵	1,13x10 ³	2,81x10 ⁵

O Fluxograma de processo utilizado na simulação já foi apresentado Figura 1. Nesta etapa todas as correntes de entrada e saída do processo são avaliadas de forma a se obter o maior grau de pureza nas correntes de saída. As correntes de entrada e saída estão relacionadas na Tabela 6. Nestas são apresentadas as condições de processo que são acompanhadas e monitoradas a cada momento em sistemas de automação e controle. E, com isso, tem-se a possibilidade de prever dados aos equipamentos de processamento e pontos de falhas.

A partir do diagrama de PI & D da unidade (Figura 2), os subsistemas e os nós de estudo foram selecionados. Na Figura 3 são representadas estas seleções. O Fluxograma possui uma linha de corrente que consiste do bombeamento de óleo oriundo de um sistema de dessalgação de petróleo. Assim, embora não listado no fluxograma de processos, toda a carga de hidrocarbonetos já foi tratada na dessalgadora.

Figura 2 – Diagrama de Tubulação e Instrumentação (PI & D) para a destilação atmosférica de petróleo.

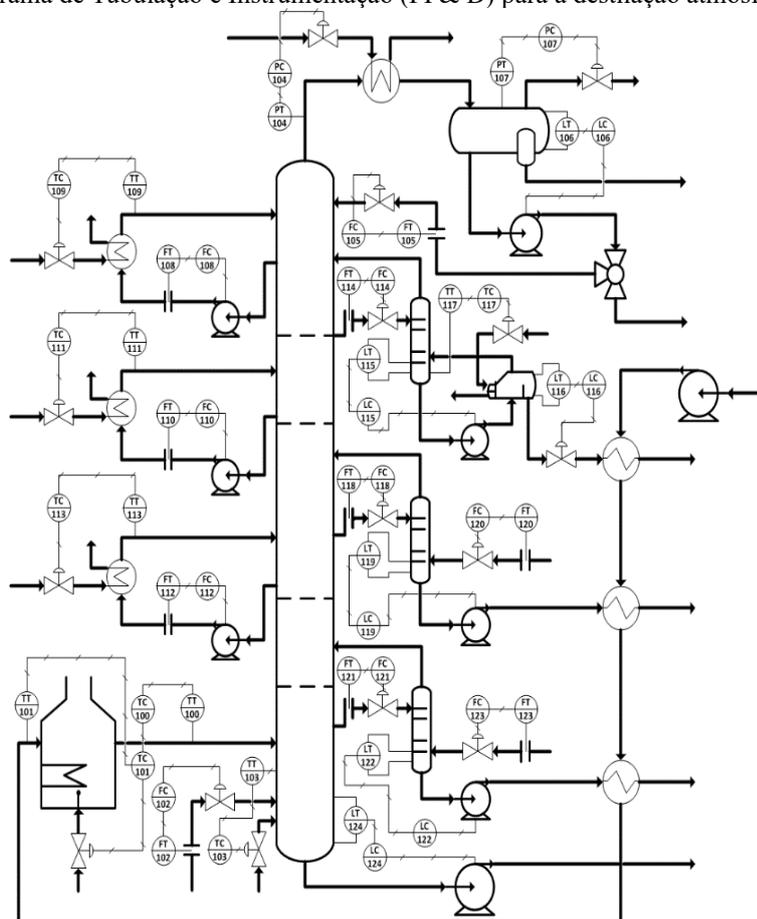
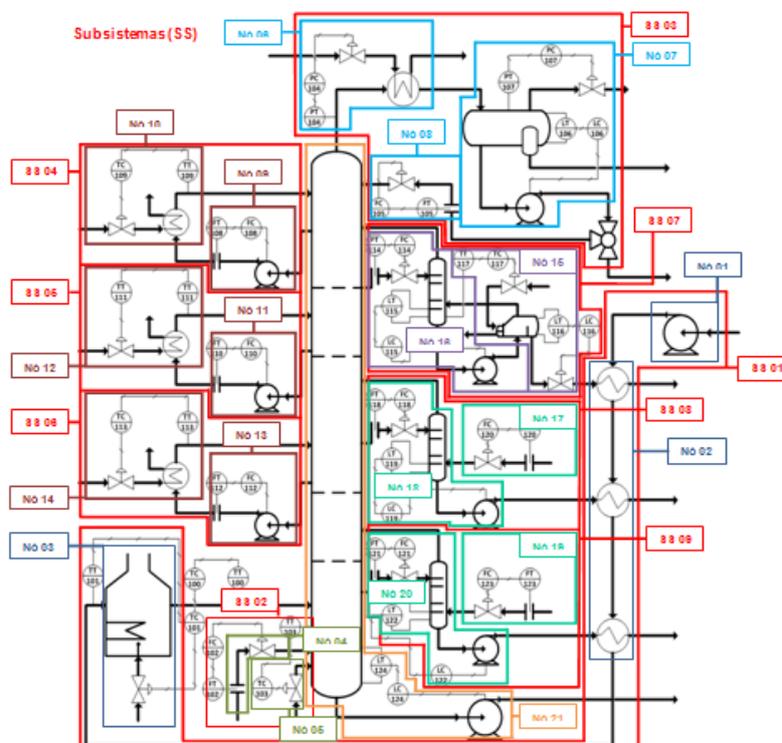


Figura 3 – Sistemas e nós de estudos selecionados.



3 RESULTADOS

De posse dos dados de simulação, fluxogramas de processo e automação, o estudo de segurança envolvendo a metodologia HAZOP foi aplicado e avaliado nas tabelas que se seguem (Tabelas de 07 a 19). Os levantamentos, empregados para colunas de destilação atmosféricas, aprofundamento das cadeias de fluxo, massa, automação são abordados em termos de sistema produtivo que poderá auxiliar no conhecimento aprofundado de processos e redução de possíveis acidentes industriais. Isso, quando utilizado em novos processos, no caso dos combustíveis sustentáveis para aviação (SAFs), possibilitam um maior domínio de ações preventivas e preditivas.

Após a avaliação dos fluxogramas de processo e automação, e com o auxílio da Tabela 07 tem-se os dados do óleo após sair da dessalgadora e bombeado através da bateria de trocadores, de forma a recuperar a energia de frações que saem da torre, e é direcionado até o forno para receber a carga térmica final antes de ser alimentado na coluna.

Tabela 07 – Planilha Referente ao nó 1.

Sistema/Subsistema 01: Bombeamento e Aquecimento		Parâmetros: Vazão e pressão		Nó 01: Bomba de carga de cru e tubulações	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
1	Vazão	(2)Menos; (3)Nenhuma	(2) Problemas no fornecimento de óleo; Vazamento nas tubulações (por fraturas nas mesmas e/ou nos flanges) e/ou na bomba.	(2) Redução na produção; Possibilidade de incêndios e/ou explosões no caso de vazamentos e contaminação ambiental.	(2) Melhorar a logística; Rever a compatibilidade química dos materiais construtivos e rever projeto mecânico.
			(3) Falha nas válvulas de controle de vazão: Vazamento na tubulação.	(2) Possibilidade de incêndios e contaminação ambiental.	(2) Verificar o projeto mecânico das tubulações e bombas e rever controladores
			(3) Falha no fornecimento de energia; Perda da bomba por corrosão no rotor; rompimento das tubulações.	(3) Possibilidade de incêndios e contaminações ambientais.	(3) Projetar sistema auxiliar para caso de queda de energia.
	Pressão	(2)Menos	(2) Perda na eficiência da bomba.	(2) redução na altura de carga da bomba; Perda de produção,	(2)Rever a compatibilidade química dos materiais

A temperatura não foi selecionada como variável a ser avaliada em virtude do fato de que as vazões das retiradas podem variar dentro de uma dada faixa, não sendo necessário, portanto, controlar a temperaturas de saída da carga de cru em cada trocador. Como será visto posteriormente, a temperatura de entrada da carga na coluna será ajustada pelo o aquecedor/forno. Também, temperaturas mais baixas das retiradas laterais não serão conseguidas somente pelo o uso dos pré-aquecedores. Será necessário então um posterior resfriamento destas correntes usando trocadores de calor adicionais (Nisenfeld; Seemann, 1981).

Na avaliação deste nó as análises de segurança detectaram como maior consequência as possibilidades de incêndios e contaminação ambiental. As causas ficaram enfatizadas nos problemas na tubulação e rompimentos de tubulações. No entanto, o cálculo da espessura da parede dos tubos (Schedule) deve seguir as pressões do projeto. E, o maior fator que pode ocorrer nestas circunstâncias seria corrosão por escolha inadequada de materiais.

Na Tabela 08, pré-aquecedores de carga, é mostrado o estudo enfatizando a bateria de trocadores utilizados no aproveitamento de energia do sistema de destilação. Nesta avaliação pode-se observar que, para as variáveis monitoradas, os problemas, imediatos, é a parada completa da unidade, no caso mais simples uma baixa produção, com possibilidades de incêndios e perda de operadores. Uma

atenção, maior, deve-se ser dada ao sistema de dessalgação do óleo extraído e enviado a unidade de refino.

Tabela 08 – Planilha Referente ao nó 2.

Sistema/Subsistema 01: Bombeamento e Aquecimento		Nó 02: Pré-aquecedores de carga 01, 02 e 03.		Parâmetros: Vazão e pressão	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
2	Vazão	(2)Menos; (3)Nenhuma	(2) Vazamento no casco ou tubos causado por corrosão, incrustação ou fadiga térmica.	(2) Possibilidade de incêndios, explosões e mistura de líquidos do casco e tubos.	(2) Rever compatibilidade química dos materiais e projeto mecânico dos trocadores.
			(3) Obstrução no casco causado por incrustação; Obstrução dos tubos causados por coque; rompimento do casco ou tubos (espelhos) por dilatação térmica.	(3) Parada completa da unidade se ocorrer na destilação atmosférica; explosão no caso de rompimentos; contaminação ambiental	(3) Avaliar a eficiência da dessalgadora; Rever a compatibilidade química dos materiais; Verificar projeto mecânico dos trocadores com ênfase no vazão de fluidos.
	Pressão	(2)Menos	(2) Perda elevada no casco causado por incrustação salina; perda de carga nos tubos causada por deposição de coque	(2) Baixa vazão e produção.	(2) Avaliar a eficiência da dessalgadora; Usar tubos de menor diâmetro.

Na Tabela 08 é avaliado o aquecedor do forno. Neste sistema temperaturas superiores a 340° C devem ser evitadas. Uma vez que, segundo Bombardelli *et al.* (2005), isso evitará a formação de coque e, por fim, não irá favorecer o surgimento de incrustações. Neste sistema, como mostrado na Figura 2, houve o acréscimo de um sistema de controle do tipo cascata em dois níveis no aquecedor/forno. Este tipo de estratégia é mais eficiente para o controle de temperatura do que uma simples estratégia do tipo *feedback*, em virtude de uma maior lentidão inerente na resposta de uma malha de controle de temperatura (Smith; Corripio, 2008). Logo, com o sistema em questão, as oscilações de temperatura em torno do ponto fixo (*set point*) serão menores, como requisitado na Tabela 09.

Tabela 09 – Planilha Referente ao nó 3.

Sistema/Subsistema 01: Bombeamento e Aquecimento		Nó 03: Aquecedor/forno de carga		Parâmetros: Vazão, pressão e temperatura	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
3	Vazão	(2) Menos, (3)Nenhuma	(2) Vazamentos nos tubos de troca térmica causado por fadiga ou corrosão.	(2) Incêndios ou explosões; contaminação ambiental.	(2) Rever a seleção de materiais construtivos; rever projeto mecânico dos trocadores.

			(3) Obstrução total nos tubos causada por sal ou coque; falha na válvula de controle de gás; rompimento dos tubos de troca térmica.	(3) parada do aquecedor no caso de falha da válvula; possibilidade de incêndio; contaminação ambiental.	(3) Avaliar a eficiência da dessalgadora; Rever a compatibilidade química dos materiais; Verificar projeto mecânico dos trocadores.
Pressão	(1) Mais, Menos		(1) Elevação por aumento da temperatura aumentando a fração de vapor.	(1) Fragilização dos materiais construtivos e possível ruptura; rompimentos e/ou vazamentos com possibilidades de incêndios; contaminação ambiental.	(1) Adição de sistema de controle mais rígido, que evite oscilações na temperatura de saída do aquecedor (Forno)
			(2) Perda de carga nos tubos causadas por incrustação salina e/ou coque	(2) O petróleo cru aquecido não terá pressão suficiente para escoar até a coluna; redução na produção.	(2) Avaliar a eficiência da dessalgadora no caso de incrustação salina; Evitar trabalhar em temperaturas acima de 340°C.
Temperatura	(1) Mais, (2) Menos		(1) Falha no controle de vazão de gás combustível e/ou no sistema de controle.	(1) Aumento de temperatura poderá provocar dilatação térmica do material construtivo.	(1) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual ocorra uma sintonia de controlares corretamente.
			(2) Problema no fornecimento de gás combustível para o forno; falha na válvula de controle de vazão de gás.	(2) Redução da temperatura da carga para a coluna e consequente perda de eficiência na separação	(2) Projetar um sistema auxiliar de fornecimento de gás; verificar o funcionamento das válvulas; rever o funcionamento dos controladores.

Na Tabela 10 é mostrado os nós referentes ao envio de vapor do forno ao fundo da coluna destinado ao aquecimento e processo de *stripping* na base da coluna. Para tanto, os elementos a serem monitorados são relevantes as variáveis de vazão, pressão e temperatura. Pois, uma vez que se trata de arraste e aquecimento, as modificações no fluxo terá com problema, principal, a separação inadequada das frações de petróleo.

Tabela 10 – Planilha Referente aos nós 4 e 5.

Sistema/Subsistema 02: Vapor para a coluna		Nós 04 e 05: Linhas de fornecimento de vapor para <i>stripping</i> e aquecimento do fundo da coluna		Parâmetros: Vazão, pressão e temperatura	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa	Consequência (s)	Providência (s)
4 e 5	Vazão	(1) Mais, (2) Menos, (3) Nenhuma	(1) Falha na válvula de controle de vazão de vapor ou no sistema de controle.	(1) Excesso de vapor dentro da coluna e com isso interferência na separação; superaquecimento no fundo da coluna ocasionando a formação de coque e danificando o equipamento.	(1) Verificar a atuação das válvulas e rever a sintonia de controle das malhas.
			(2) Problemas no sistema de geração de vapor; falha nas válvulas de controle de	(2) Falta de vapor na seção de <i>stripping</i> da coluna prejudicando a evaporação da fração leve; diminuição	(2) Verificar a atuação das válvulas; rever a sintonia de controle das malhas e verificar

		vazão de vapor; vazamento nas tubulações de vapor.	da temperatura no fundo da coluna prejudicando a separação.	a montagem das tubulações em termos normativos.
		(3) Falha nas válvulas de controle (off); problemas no sistema de geração de vapor e rompimento das tubulações de vapor.	(2) Acidentes na unidade com possíveis danos ao operador; parada na unidade.	(3) Verificar a atuação das válvulas; rever projeto mecânico das tubulações; Realizar um estudo HAZOP sobre as caldeiras para evitar a parada (<i>shutdown</i>) das mesmas.
Pressão	(1) Mais, (2) Menos	(1) Problemas no sistema de geração de vapor devido controle de pressão nas caldeiras.	(1) Rupturas nas tubulações com rompimentos e vazamentos.	(1) Realizar uma análise HAZOP sobre as caldeiras.
		(2) Problemas no sistema de geração de vapor.	(2) O vapor para <i>stripping</i> não terá pressão suficiente para chegar à coluna; perda de eficiência na separação e perda de eficiência no aquecimento da base da coluna.	(2) Realizar uma análise HAZOP sobre as caldeiras.
Temperatura	(1) Mais, (2) Menos	(1) Problemas no sistema de geração de vapor devido a malha de controle na temperatura das caldeiras.	(1) Tensões nas tubulações com possíveis rompimentos e vazamentos.	(1) Realizar uma análise HAZOP sobre as caldeiras.
		(2) Problemas no sistema de geração de vapor ocasionado pela malha de controle de temperatura nas caldeiras.	(2) Baixas temperaturas no <i>stripping</i> quanto no vapor de aquecimento reduzem o fracionamento reduzindo a produção.	(2) Realizar uma análise HAZOP sobre as caldeiras.

Como mostrado nas Tabelas 09 e 10, seria necessária a inserção de sistemas reservas (ou redundantes) para fornecimento de ar de instrumentos para as válvulas de controle citadas, pois estas válvulas são consideradas pontos críticos na operação. Também, como enfatizado na Tabela 10, seria necessária a realização de um estudo de HAZOP sobre caldeira. Este estudo é, no entanto, previsível, visto que a análise pode e deveria ser aplicada a todos os equipamentos de processo, em qualquer projeto (Kletz, 2001).

Mostra-se na Tabela 11 e na Figura 3, a temperatura não foi selecionada como uma variável a ser estudada no condensador (Nó 06), mesmo este sendo um sistema de troca térmica. Isto se deve ao fato de que o vapor de topo a ser condensado estava em seu ponto de orvalho, sendo isto mostrado na simulação do caso de estudo. Ou seja, a temperatura 138,8⁰C da corrente 8 (vapor de topo) correspondeu a temperatura do ponto de orvalho. Logo, uma variação na pressão desta corrente afetará esta temperatura por deslocamento do equilíbrio termodinâmico (Smith *et al.*, 2005).

Tabela 11 – Planilha Referente ao nó 6.

Sistema/Subsistema a 03: Topo		Parâmetros: Vazão e pressão		Nó 06: Condensador.	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
6	Vazão	(1)Mais, (2)Menos, (3)Nenhuma	(1) Falhas nas válvulas de controle de água de refrigeração ou no sistema de controle.	(1)Redução da pressão no topo da coluna ocasionado o aumento de frações pesadas.	(1)Verificar a atuação das válvulas; rever a sentia de controle das malhas.
			(2)Vazamentos no casco do condensador ou na tubulação de vapor; vazamentos na água de refrigeração; falhas nas válvulas de controle.	(2)Possibilidade de incêndios devido o vazamento de vapor; aumento de pressão no topo da coluna; diminuição da corrente de condensados (NAFTA).	(2) Adequação do projeto mecânico da tubulação e rever sintonia de controladores.
			(3) Obstrução total da tubulação de refrigeração por incrustação salina; rompimento da tubulação; rompimento da tubulação de saída de vapor no topo.	(3) Possibilidade de incêndios no caso de explosões com derramamento e possível contaminação ambiental.	(3) Controlar a salinidade da água de refrigeração; compatibilidade química dos materiais construtivos e rever projeto mecânico.
	Pressão	(2)Menos	(2) Incrustação salina no casco do condensador com elevação da perda de carga.	(2) Fluido de refrigeração com dificuldades de escoar no casco do condensador.	(2) Controlar a salinidade da água de refrigeração e efetuar um estudo HAZOP sobre o sistema de bombeamento.

Portanto, se o controle de pressão da coluna atuar corretamente, a temperatura do topo será inevitavelmente controlada de um modo indireto. Se a temperatura aumentar, a pressão irá aumentar fazendo com que o sistema de controle atue sobre a válvula de água (abertura), aumentando a taxa de condensação de vapores e conseqüentemente reduzindo a pressão. Se a temperatura diminuir, a pressão também irá diminuir fazendo com que a válvula de controle atue sobre a válvula de água (fechamento), reduzindo a taxa de condensação de vapores e conseqüentemente reduzindo a pressão.

Na Tabela 12 foi realizado o estudo envolvendo o separador trifásico e a bomba de envio de material (Nó 7). Nesta avaliação, os maiores problemas que podem ocorrer decorrem fragilidades mecânicas ou seleção inadequada de material. E, como consequência destas causas tem-se a possibilidade de incêndios, queima de hidrocarbonetos, superando seus pontos flash e chegando a seu ponto de combustão.

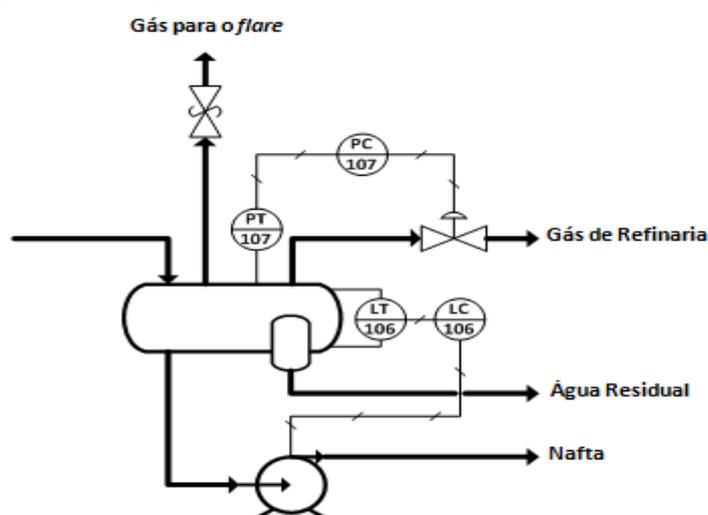
E, como vista em outros nós, a sistemática de controle, aqui apresentada, possui a função de manter *setpoints* que se tem como base a manutenção estrutural dos equipamentos. Com isso, a variável de pressão de vapor é monitorada e controlada.

Tabela 12 – Planilha Referente ao nó 7.

Sistema/Subsistema 03: Topo		Parâmetros: Vazão, pressão e nível		Nó 07: Separador trifásico e bomba	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
7	Vazão	(2)Menos; (3)Nenhuma	(2) Vazamentos nas tubulações, na bomba ou no separador trifásico causado por fragilização dos materiais de construção.	(2) Possibilidades de incêndios e explosões; contaminação ambiental.	(2) Rever a seleção dos materiais de construção; rever projeto mecânico.
			(3) Rompimento das tubulações do separador ou da bomba causado por fragilização dos materiais construtivos.	(3) Parada completa da unidade; possibilidade de incêndios e contaminação ambiental.	(3) Rever a seleção dos materiais de construção; rever projeto mecânico.
	Pressão	(1)Mais; (2)Menos	(1) Falha na válvula de controle de pressão ou no sistema de controle.	(1) Aumento de pressão no separador.	(3) Selecionar uma válvula adequada; rever a sintonia de controle e utilizar válvula de alívio ou segurança.
			(2) Falha na válvula de controle de pressão ou no sistema de controle e perda de eficiência da bomba causada pela corrosão no rotor.	(2) Vaporização de hidrocarbonetos mais pesados, sendo que estes saíram na corrente de gás da refinaria, ao invés de saírem na corrente de NAFTA.	(2) Selecionar uma válvula ou sistema de controle adequado; rever a sintonia de controladores.

No caso do controle de pressão do separador trifásico, uma modificação no sistema para incluir uma válvula de alívio (ou de segurança) é mostrada na Figura 04.

Figura 04 – Diagrama de PI & D com sistema de alívio de pressão.



Neste sistema, se a pressão exceder um máximo no caso de falha no sistema de controle de pressão, a válvula de alívio reduzirá a pressão do separador enviando a quantidade de gás excedente para um *flare* (queimador).

Na Tabela 13 foi avaliada a razão de refluxo de material na torre. A razão de refluxo para a caso estudo foi calculada pelo software CHEMCAD como sendo igual a 0,637. Tal valor representou a intenção de operação para o sistema estudado. Um desvio que reduza a vazão da corrente de refluxo prejudicará a fracionamento porque existirá uma menor quantidade de líquido para haver transferência de massa dos componentes mais pesados da fase vapor para a fase líquida (Perry; Green, 2008). Inversamente, um desvio que aumente a vazão da corrente de refluxo aumentará o inventário de líquido na coluna, sendo necessária uma maior quantidade de energia para vaporizar este excesso de líquido, para manter vazões molares de líquido descendente e vapor ascendente aproximadamente iguais (McCabe *et al.*, 1985).

O elemento de estudo dos nós 9, 11 e 13 são os *pump around* (Refluxo circulante). E, uma vez que se trata do refluxo de frações de hidrocarbonetos que serão retirada de um prato e recirculada a um estágio superior, de maneira a otimizar a transferência de massa, o maior impacto seria vazamentos com possibilidade de incêndios. E, novamente, para este caso, a variável temperatura não foi avaliada, mesmo o nó de estudo tendo um equipamento de troca térmica. Isto se deve ao fato de que o controle de temperatura é efetuado pelo ajuste da vazão de água de resfriamento, sendo que esta variável já foi avaliada. Logo, o estudo da temperatura seria uma redundância.

Tabela 13 – Planilha Referente ao nó 8.

Sistema/Subsistema 03: Topo		Parâmetro: Vazão		Nó 08: Corrente de refluxo no topo	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
8	Vazão	(1)Mais; (2)Menos; (3)Nenhuma	(1) Falha na válvula de controle de vazão ou no sistema de controle.	(1) Aumento de refluxo ocasionará o aumento da carga térmica no refeedor.	(1) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual ocorra uma sintonia de controlares corretamente.
			(2) Falha nas válvulas de controle de vazão ou no sistema de controle.	(2) Redução na vazão da corrente de refluxo prejudicará o fracionamento das correntes de interesse.	(2) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual ocorra uma sintonia de controlares corretamente.
			(3) Rompimento da tubulação por fragilização do material de construção.	(3) Possibilidade de incêndios e explosões; parada completa da unidade e contaminação ambiental.	(3) Rever a seleção dos materiais de construção; rever projeto mecânico.

Tabela 14– Planilha Referente aos nós 9, 11 e 13.

Sistemas/Subsistemas 04, 05 e 06: Sistema de <i>pump around</i>		Parâmetros: Vazão e pressão		Nós 09, 11 e 13: Bombas de retirada e tubulações	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa(s)	Consequência (s)	Providencia (s)
9,11 e 13	Vazão	Mais, Menos, Nenhuma	(1) Falha na válvula de controle de vazão de vapor ou no sistema de controle.	(1) Redução do nível de líquido no prato e redução	(1) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual

				da eficiência na separação de fases.	ocorra uma sintonia de controlares corretamente
			(2) Vazamentos nos tubos de troca térmica causado por fadiga ou corrosão ou nas bombas; Falha nas válvulas de controle de vazão	(2) Possibilidade de incêndios no caso de rompimentos, com perda de material ou humanas; contaminação ambiental.	(2) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual ocorra uma sintonia de controlares corretamente.
			(3) Falha no fornecimento de energia para a bomba; Perda da bomba causada por corrosão; Rompimento das tubulações causada por corrosão.	(3) Possibilidade de incêndios e explosões; parada completa da unidade e contaminação ambiental.	(3) Projetar sistema auxiliar para fornecimento de energia; Rever a compatibilidade química dos materiais e verificar projeto de tubulações
	Pressão	Menos	(2) Perda de eficiência da bomba devido corrosão	(2) Redução de altura manométrica.	(2) Rever a seleção de materiais construtivos; rever projeto mecânico.

Como observado nas Tabelas 14 e 15, os resultados foram generalizados para três subsistemas (04 a 06) e seis nós de estudo (09 a 14). Isto se explica pelo de fato de que os subsistemas (pump around) e os nós estudos possuem semelhança operacional, mesmo não possuindo as mesmas intenções de operação, como mostrado na Figura 1.

Tabela 15 – Planilha Referente aos nós 10, 12 e 14.

Sistemas/Subsistemas 04, 05 e 06: Sistema de <i>pumpsaround</i>		Parâmetros: Vazão e pressão		Nós 10, 12 e 14: Sistemas de refrigeração (<i>cooling</i>)	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa(s)	Consequência (s)	Providencia (s)
10,12 e 14	Vazão	(1)Mais; (2)Menos; (3)Nenhuma	(1) Falha na válvula de controle de vazão de vapor ou no sistema de controle.	(1) Redução da temperatura no prato de retorno, reduzindo a quantidade de vapor por aumento da condensação e prejudicando o fracionamento.	(1) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual ocorra uma sintonia de controlares corretamente.
			(2) Vazamento no casco do trocador; vazamentos nas tubulações de água de refrigeração; vazamentos entre tubos e casco do trocador; Falha nas válvulas de controle de vazão (fechamento excessivo) e/ou nos sistemas de controle.	(2) Possibilidades de incêndios e explosões; Superaquecimento da corrente de retorno; parada da planta.	(2) Rever a seleção dos materiais de construção; rever projeto mecânico e malha de controle e sua instrumentação.
			(3) Obstrução do casco do trocador causada por incrustação salina; Obstrução nos tubos por depósito de coque; e danos com vazamentos nas tubulações por fadiga mecânica	(3) Possibilidade de incêndios e explosões com perdas de material e humano; contaminação ambiental e parada da planta.	(3) Controlar a salinidade da água de refrigeração; rever a seleção dos materiais de construção e projeto mecânico.
	Pressão	(2)Menos	(2) Incrustação salina no casco do condensador com elevação da perda de carga.	(2) O fluido de refrigeração (água) terá	(2) Controlar a salinidade da água de refrigeração e efetuar

				dificuldades de escoar no casco do trocador.	um estudo HAZOP sobre o sistema de bombeamento.
--	--	--	--	--	---

E, a verificação dos pontos de avaliação possibilita a análise de fluxo no qual o elemento de controle, válvulas, é responsável por uma grande parte das causas verificadas. E, fatores de vazamentos causados por falha no sistema de tratamento primário são relatados na recirculação nos pratos de separação. E, contudo, a segurança da unidade poderá apresentar sérias consequências com riscos a operador e ambiente ao redor da mesma.

Na Tabela 16 a temperatura e o nível de líquido na operação do refervedor já são controlados pela a vazão de vapor e vazões de entrada e saída, de modo que não foi necessária a discussão da influência destas variáveis.

O vapor a ser usado para aquecimento no refervedor é o vapor saturado, a uma temperatura acima daquela requisitada para corrente de vapor de hidrocarbonetos que entra no *stripper*. A análise desta temperatura do vapor de aquecimento também não é necessária, em virtude da sua condição de saturação, sendo que a pressão deste já determinar sua temperatura.

Tabela 16 – Planilha Referente ao nó 15.

Sistema/Subsistema 07: <i>Stripper</i> lateral 01		Parâmetros: Vazão e pressão		Nó 15: Refervedor do <i>stripper</i> lateral 01	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
15	Vazão	(1)Mais, (2)Menos, (3)Nenhuma	(1) Falha nas válvulas de controle de vazão de vapor e nível do refervedor (abertura excessiva) e/ou nos sistemas de controle.	(1) Prejuízos para o fracionamento; Ruptura de tubos por fadiga térmica.	(1) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual ocorra uma sintonia de controlares corretamente.
			(2) Vazamentos na tubulação ou casco do refervedor; Falha nas válvulas de controle de vazão de vapor ou no sistema de controle.	(2) Possibilidades de incêndios e explosões; falha no sistema de <i>stripper</i> e fracionamento inadequado do fluido; Inundação de líquido no equipamento.	(2) Rever a seleção dos materiais de construção; rever projeto mecânico e sintonia de controle da planta.
			(3) Problemas no sistema de geração de vapor (Caldeiras); Rompimento do casco e tubulações; Falhas nas válvulas de nível e vazão.	(3) Possibilidade de incêndios e explosões; parada completa da unidade e contaminação ambiental.	(3) Realizar um estudo HAZOP nas caldeiras; rever a seleção de material mecânico; rever projeto mecânico.
	Pressão	(1)Mais, (2)Menos	(1) Problemas no sistema de geração de vapor devido controle de pressão nas caldeiras.	(1) Excesso de pressão poderá ocasionar rupturas nas tubulações.	(1) Realizar um estudo HAZOP no sistema de geração de vapor (Caldeiras).
(2) Problemas no sistema de geração de vapor .			(2) Pressão insuficiente para o processo de <i>stripper</i> e, fracionamento	(2) Realizar um estudo HAZOP no sistema de geração de vapor (Caldeiras).	

				fora do especificado em projeto	
--	--	--	--	---------------------------------	--

O nó avaliado no estudo da Tabela 17 corresponde ao sistema de *Stripper*. Nesta avaliação a unida mudança das observações do nó 15 é apenas o nível a ser controlado. Nesta avaliação, assim como em outros, observa-se a possibilidade de inundação de sistema de contato líquido e vapor (*Stripper*), incêndios e falha no escoamento de material. E, como ajustes, deve-se fazer o controle da malha, evitar vazamentos por falta de compatibilidade química dos materiais e do projeto mecânico.

Tabela 17 – Planilha Referente ao nó 16.

Sistema/Subsistema 07: <i>Stripper</i> lateral 01		Parâmetros: Vazão, pressão e nível		Nó 16: <i>Stripper</i> e bomba	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providência (s)
16	Vazão	(1)Mais, (2)Menos, (3)Nenhuma	(1) Falha na válvula de controle de vazão na retirada lateral ou no sistema de controle.	(1) O aumento da vazão líquido para a coluna, que se não controlado pelo sistema de controle de nível, causará a inundação do <i>stripper</i> .	(1) Selecionar uma válvula de controle projetada adequadamente; rever a sintonia de controladores
			(2) Vazamentos nas tubulações, na bomba ou no <i>stripper</i> ; falha na válvula de controle de vazão da retirada lateral.	(2) Possibilidades de incêndios e explosões; contaminação ambiental; Redução de contato líquido e vapor.	(2) Rever compatibilidade química dos materiais construtivos; verificar projeto mecânico; selecionar uma válvula adequada e rever a sintonia de controladores
			(3) Falha no fornecimento de energia para a bomba; Perda da bomba causada por corrosão; Rompimento das tubulações causada por corrosão.	(3) Possibilidades de incêndios e explosões com perdas de material e humano; contaminação ambiental e parada da planta.	(3) Projetar sistema auxiliar para fornecimento de energia; Rever a compatibilidade química dos materiais e verificar projeto de tubulações.
	Pressão	(2)Menos	(2) Perda de carga nos <i>strippers</i> causado pela deposição de coque; perda de eficiência da bomba.	(2) Redução do contato líquido e vapor; redução de escoamento de líquido em virtude de baixas pressões.	(2) Rever projeto e escoamento referencial; rever seleção de materiais compatíveis quimicamente aos fluidos.
	Nível	(1)Mais; (2)Menos	(1) Falha no sistema de controle de nível (Incluindo sensores).	(1) Excesso de líquido no fundo da torre causando inundação	(1) Rever os sensores de nível e controladores.
			(2) Falha no sistema de controle de nível (Incluindo sensores).	(2)Risco de cavitação no sistema de bombeamento	(2) Rever a malha de controle e a sintonia de controladores

De maneira semelhante aos *pumpsaround*, os dois últimos *strippers* laterais possuem aspectos operacionais semelhantes, com objetivos semelhantes. Logo, os resultados da Tabela 18 são referentes aos *strippers* 02 e 03.

Tabela 18 – Planilha referente aos nós de estudo 17 a 20.

Sistemas/Subsistemas 08 e 09: <i>Strippers</i> laterais 02 e 03		Parâmetros: Vazão, pressão, temperatura e nível		Nós 17 a 20: <i>Strippers</i> e bombas	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providencia (s)
17 a 20	Vazão	(1)Mais, (2)Menos, (3)Nenhuma	(1) Falha na válvula de controle de vazão da saída lateral ou no sistema de controle. Falha na válvula de controle de vazão de vapor para o stripper.	(1) Inundação do stripper causado pelo aumento de vazão de líquido e o excesso de vapor irá provocar arraste de componentes pesados para o topo.	(1) Selecionar válvulas e/ou sistema de controle no qual ocorra uma sintonia de controlares corretamente.
			(2) Vazamentos nas tubulações, na bomba ou no stripper; Falha na válvula de controle na retirada lateral ou no sistema de controle.	(2) Possibilidade de incêndios ou explosões; Contaminação ambiental; Redução de líquido no contato líquido e vapor causando problemas na separação de frações	(2) Rever a seleção de materiais de construção; Verificar projeto mecânico; Rever projeto de automação e instrumentação.
			(3) Falha no sistema de fornecimento de energia para a bomba; Perda da bomba por corrosão; Obstrução de trechos da tubulação; Falha na válvula de controle	(3) Possibilidade de incêndios e explosões; parada completa da unidade e contaminação ambiental.	(3) Projetar sistema auxiliar para fornecer energia as bombas; Remover o coque; Rever a seleção de materiais de construção; Rever projeto mecânico; Rever sistema de controle da válvula.
	Pressão	(1)Mais; (2)Menos	(1) Problemas no sistema de geração de vapor devido controle de pressão nas caldeiras.	(1) Ruptura nas tubulações de transporte de vapor com possibilidade de vazamentos.	(1) Realizar um estudo HAZOP no sistema de geração de vapor (Caldeiras).
			(2) Perda de carga elevada nos pratos do stripper devido a deposição de coque nas válvulas; Perda de eficiência nas bombas devido a corrosão; Problemas no sistema de geração de vapor.	(2) Dificuldades de escoamento de fluidos através do stripper com redução de contato líquido e vapor; redução da vaporização de hidrocarbonetos.	(2) Seleção de materiais das válvulas que não sofram corrosão por coque; rever a compatibilidade química dos materiais; Realizar uma análise HAZOP nas caldeiras.
	Temperatura	(1)Mais, (2)Menos	(1) Problemas no sistema de geração de vapor devido controle de pressão nas caldeiras.	(1) Vaporização excessiva de líquido e aumento de frações pesadas com má separação de fases.	(1) Realizar um estudo HAZOP no sistema de geração de vapor (Caldeiras).
			(2) Problemas no sistema de geração de vapor ocasionado pela malha de controle de temperatura nas caldeiras.	(2) Menor taxa de vaporização dos componentes mais leves.	(2) Realizar um estudo HAZOP no sistema de geração de vapor (Caldeiras).
	Nível	(1)Mais, (2) Menos	(1) Falha no sistema de controle de nível ou instrumentação utilizada.	(1) Excesso de líquido no <i>stripper</i> que poderá causar inundação no equipamento de separação.	(1) Rever a sintonia de controle e instrumentação utilizada.
			(2) Falha no sistema de controle de nível ou instrumentação utilizada.	(2) Redução do nível de líquido no <i>stripper</i> com a ocorrência de problemas de cavitação na bomba	(2) Rever a sintonia de controle e instrumentação utilizada

A principal operação unitária da unidade de refino trata-se da coluna de destilação (Tabela 19). A unidade poderá sofrer problemas de fluxo de material, entrando e saindo. No caso de vazamentos, rompimento de tubulações poderá ocorrer à possibilidade de incêndios. As providências a serem tomadas envolvem os projetos mecânicos e a compatibilidade química dos materiais. E, para a coluna, a temperatura foi avaliada no sistema de vapor para aquecimento. O aumento de pressão no fundo poderia ocorrer de dois modos: ou pelo superaquecimento em virtude do aumento da temperatura do vapor de aquecimento, ou pelo aumento da pressão do vapor de *stripping*. Em ambos os casos, um aumento excessivo na pressão poderia ocasionar rupturas no material de construção da coluna, com possibilidades de acidentes, e parada total da unidade e/ou da refinaria.

Tabela 19 – Planilha referente ao nó de estudo 21.

Sistemas/Subsistema: Coluna de destilação		Parâmetros: Vazão, pressão e nível		Nó 21: Coluna atmosférica	
Nó	Variáveis	Palavras Guia	Causa (s)	Consequência (s)	Providência (s)
16	Vazão	(2)Menos, (3)Nenhuma	2)Vazamentos nas tubulações ou na bomba.	(2) Possibilidade de incêndios ou explosões; Contaminação ambiental.	(2)Rever a seleção de materiais de construção; Verificar projeto mecânico.
			(3) Obstrução de tubulação por coque; Obstrução de válvulas em algum prato de contato líquido e valor; Falha no sistema de fornecimento de energia para as bombas; Fragilização de material mecânico.	(3)Possibilidade de incêndios e explosões; parada completa da unidade e contaminação ambiental.	(3) Projetar a tubulação de modo que não haja deposição de coque; Projetar sistema auxiliar para fornecimento de energia; Rever projeto mecânico e inspecionar as soldas.
	Pressão	(2)Menos	(2)Perda elevada nos pratos da coluna devido obstrução por deposição de coque; Perda de eficiência na bomba causado pela corrosão.	(2)Dificuldades de escoamento de vapor reduzindo o contato líquido e vapor; Escoamento de líquido reduzido em virtude da baixa eficiência da bomba	(2)Rever projeto mecânico e seleção de materiais construtivos.
Nível		(1)Mais; (2)Menos	(1) Falha no sistema de controle de nível (Incluindo sensores).	(1) Excesso de líquido no fundo da torre causando inundação	(1) Rever os sensores de nível e controladores.
			(2) Falha no sistema de controle de nível (Incluindo sensores).	(2)Risco de cavitação no sistema de bombeamento	(2) Rever a malha de controle e a sintonia de controladores

O processo de destilação, como abordado para estudo de petróleo, poderá, de acordo com F.A.S. MOTA *et al*, (2025), ser incorporado a um sistema de destilação de frações que possuem faixas de separação que necessitem de avaliações de processos e automação. Com isso, estratégia de controle que envolva a separação em pratos, separação lateral para recirculação de não condensáveis, podem ser utilizados com mesma configuração destes PFD. Assim, os levantamentos realizados por com F.A.S.

MOTA *et al*, (2025), que avaliam aspectos de destilação de ésteres, podem ser abordados com a mesma ação empregada para processos de destilação de petróleo. Ressaltando que, o processo apresentado pelos pesquisadores retrata estudos de separação de faixas de ésteres que, podem ser avaliados como um precursor de combustíveis sustentáveis para aviação (SAFs).

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do trabalho conduziu a elaboração de estudo referente a um caso proposto na literatura, que foi modelado e simulado com o auxílio do software CHEMCAD ®. E como observado nos resultados e nas discussões, serviu como delimitação das intenções de operação para o funcionamento da unidade.

Como demonstrado, a análise HAZOP foi capaz, através do uso das palavras guia, identificar os possíveis riscos operacionais advindos dos desvios nas intenções de operação, como possibilidades de incêndios, explosões, contaminações ambientais e suas consequências. Foi possível identificar os riscos que estão associados à seleção de materiais, ao projeto mecânico dos equipamentos às especificações dos acessórios.

Além dos riscos, foi possível a identificação de desvios que estão relacionados à perda de produção da unidade pela parada da mesma, perda de produção de um determinado produto específico (fração ou retirada lateral) e ao não funcionamento adequado de um dado equipamento. Quanto a este último tópico, a redução na eficiência das bombas, redução do contato líquido/vapor, inundação de equipamentos (da coluna atmosférica, dos strippers e/ou do separador trifásico) e refulvador do stripper lateral 01, falha nas válvulas e/ou nos sistemas de controle foram os principais problemas verificados por estas possíveis falhas. As falhas mecânicas que possam ocorrer na unidade devem-se, em muitos casos, a incompatibilidade química entre o material mecânico e os produtos que o sistema processa. Com isso, o cumprimento de normas construtivas e projetos mecânicos que sigam as determinadas normas são extremamente importantes ao funcionamento correto do sistema.

Após, avaliações realizadas em estudos realizados por F.A.S. MOTA *et al*, (2025), entende-se que os estudos realizados para torres de destilação para petróleo, podem, após adequações de fluxo de massa e volumétricos, serem empregados para sistemas de obtenção de ésteres, desta forma, as ações realizadas neste desenvolvimento, poderão ser empregadas como uma base científica para novos combustíveis do futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao conselho nacional de Ciência e Tecnologia (CNPq), o qual os recursos para este projeto foram obtidos na chamada combustíveis para o futuro.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. A. *Metodologias de Análise de Risco – APP & HAZOP*. Rio de Janeiro: Apostila de AGUIAR, 2008.
- BOMBARDELLI, C. *et al.* *O Processo de Incrustação por Coque na Indústria do Petróleo*. In: Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás, 3., 2004, Salvador. *Anais...* Salvador: IBP, 2004. P. 3.
- DUNJÓ, J.; FTHENAKIS, V.; VÍLCHEZ, J. A.; ARNALDOS, J. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literatura review. *Journal of Hazardous Materials* 173 (2010) 19-32.
- FAHIM, M. A.; AL-SAHHAF T. A.; ELKILANI A. S. *Fundamentals of Petroleum Refining*. 1st ed. Oxford, UK: Elsevier, 2009.
- GUIDELINES for Hazard Evaluation Procedures. 2nd ed. New York, USA: CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY of the American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 1992.
- KISTER, H. Z., *Distillation Design*, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, 1992.
- KLETZ, T. *HAZOP and HAZAN*. 4th ed. Warwickshire, UK: Institution of Chemical Engineers (IChemE), 2001.
- MATOS, J. S. G. C. Avaliação de perigo operacional em uma coluna de destilação de uma planta de separação de ar. 2009. 167 f. Tese (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- F.A.S. MOTA, A.S.S. FURTADO , A.B.V. LEITAO , N.C. MEDEIROS , G.S. PEREIRA , M.N. ALMEIDA , A. OLIVEIRA , M.M. OLIVEIRA , F.T.R. CASELLI. Obtention of methyl esters fractions through distillation and pour point evaluation of the obtained fractions. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 24, N°. 1,2025.
- McCabe, W. L.; Smith, J. C. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1985.
- NISENFELD, A. E.; SEEMANN, R. C. *Distillation Columns*. Triangle Park, North Carolina, USA: Instrument Society of America (ISA), 1981. (Monograph Series 2).
- PERRY, R. H.; GREEN D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th ed. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 2008.
- ROCHA, L. B. *Projeto de uma Unidade de Fracionamento Atmosférico de Petróleo Utilizando HYSYS*. Fortaleza, UFC, 2009, 116 p. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Ceará, 2009.
- SANTOS, W. L.; THEOBALD, R. Estudo de perigos e operabilidade (HAZOP) em uma planta piloto de desestabilização de emulsões de petróleo via micro-ondas. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, BA, 2013.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. *Princípios e Prática do Controle Automático de Processo*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. 7th ed. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 2005.

SINNOTT, R. K. *Chemical Engineering Design*. 4th ed. Oxford, UK: Elsevier, 2005. (COULSON & RICHARSON'S Chemical Engineering Series, vol. 6).

TELLES, P. S. *Materiais para Equipamentos de Processo*. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.