



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Desenvolvimento de Curvas Operacionais para uma Torre Absorvedora de Propeno

*Autor: Gabriel Schleicher Leão*

*Orientador: Marcelo Farenzena*

Porto Alegre, fevereiro de 2024



Autor: Gabriel Schleicher Leão

# Desenvolvimento de Curvas Operacionais para uma Torre Absorvedora de Propeno

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química*

Orientador: Marcelo Farenzena

Banca Examinadora:

Prof. Doutor, Pedro Rafael Fernandes, UFRGS

Doutorando, Jônathan Dambros, UFRGS

Porto Alegre

2024

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Marlise e Renato, que me apoiaram e incentivaram não apenas em minha trajetória acadêmica, mas em todos os âmbitos de minha vida. Sempre me incentivando a fazer o máximo que pudesse e me auxiliando nas dúvidas e incertezas que tive ao longo do caminho. À minha irmã que apesar de insuportável em alguns momentos se fez presente em momentos em que precisava de um ombro para reclamar e chorar.

Ao prof. Farenzena pela orientação na elaboração deste trabalho. Ajudando nas diversas dúvidas que surgiram ao longo do desenvolvimento.

Aos colegas de trabalho os quais também ajudaram não apenas neste trabalho, mas em minha formação como engenheiro. Estes não apenas me ensinaram parte do que sei hoje, mas também servem de lembrança que ainda tenho muito a aprender na carreira que encolhi seguir.

Aos amigos que a UFRGS me trouxe, muitos os quais, pela característica do curso, já perdi contato, mas outros que ainda hoje mantenho proximidade. E por fim, mas não menos importante, aos amigos que já estavam antes da UFRGS e que ainda estão aqui me auxiliando nos maus e bons momentos.

## RESUMO

Queda nas demandas de produção por recessões em segmentos do mercado, forçam os engenheiros a voltarem suas atenções à redução de custos na produção do produto, de forma a manterem a operação da planta ainda competitiva e viável. Para isso torna-se essencial o conhecimento dos equipamentos da planta de forma a possibilitar a melhora em suas operações.

A absorção, como segunda maior operação de engenharia química realizada na indústria, é frequentemente usada na recuperação de matérias primas não reagidas no processo de produção. Esta recuperação possibilita que esses componentes recuperados sejam novamente adicionados ao processo assim permitindo que as operações sejam competitivas no mercado atual. O aumento na recuperação das matérias por uma coluna absorvedora pode ser atingido através da construção das curvas de operação. Essas curvas podem ser obtidas através de simuladores que possibilitam a construção de modelo que, uma vez validado, permite a obtenção de resultados confiáveis sem os custos de realizar as variações no equipamento real.

Neste trabalho melhorias na operação de uma torre absorvedora de propeno de uma planta de borracha EPDM foram propostas. Isso foi atingido através da implementação de modelo da coluna absorvedora em simulador Aspen Plus e construção de curvas de operação de forma a analisar a sensibilidade do sistema a mudanças nos parâmetros de operação da torre: vazão de solvente, temperatura do solvente, vazão de entrada dos gases e composição do gás de entrada. A partir dos resultados obtidos verificou-se que a correta operação da torre pode trazer ganhos significativos a planta, aproximadamente 3,5% do total gasto com propeno no ano.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> gradiente de concentração para teoria das duas resistências: (a) teoria do filme; (b) gradientes mais realistas (extraído de Seader et al., 2011).....	4
<b>Figura 2.2:</b> Coluna de absorção recheada (retirado de Warren L. McCabe et al., 1993).....	6
<b>Figura 2.3:</b> Gráfico ilustrando a perda de carga em função da vazão dos gases de entrada (extraído de Billet, 1995).....	7
<b>Figura 2.4:</b> recheios aleatórios comumente usados: (a) Anel de Raschig; (b) Anéis metálicos de Pall; (c) Anéis plásticos de Pall; (d) Cela de Berl; (e) Cela de Intalox em cerâmica; (e) Cela Super Intalox em plástico; (f) Cela Intalox em metal. (retirado de Warren L. McCabe et al., 1993).....	8
<b>Figura 2.5:</b> Tipos de distribuidores líquidos (adaptado de Billet, 1995) .....	9
<b>Figura 2.6:</b> curva da equação de Colburn, número de unidades de transferência considerando operação em contracorrente, equilíbrio seguindo a lei de Henry e constante A ou 1/A (extraído de Turton, 2008).....	13
<b>Figura 3.1:</b> fluxograma do processo de produção de EPDM. ....	15
<b>Figura 3.2:</b> fluxograma torre de absorvedora.....	16
Figura 3.3: representação da torre absorvedora no Aspen.....	18
<b>Figura 4.1:</b> Indicação do diferencial de pressão hidráulica e vazão de gás para cada um dos estágios da torre. ....	21
<b>Figura 4.2:</b> Porcentagem de perdas para o flare mantendo a vazão de hexano de lavagem no máximo e variando a vazão de entrada da torre. ....	22
<b>Figura 4.2:</b> Porcentagem de propeno perdido variando a temperatura do hexano de lavagem para diversas vazões de entrada. ....	22
<b>Figura 4.3:</b> Perdas de C2 e C3 variando a composição do gás de entrada.....	23
<b>Figura 4.4:</b> Perdas para diferentes composições do gas de entrada variando a vazão de isohexano de lavagem .....	24
<b>Figura 4.5:</b> Perdas para diferentes vazões de entrada variando a vazão de hexano de lavagem. ....	24

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> características recheio metálicos (retirado de Strigle, 1994). .....	11
<b>Tabela 3.1:</b> Valores típicos dos instrumentos de controle da torre absorvedora .....	17
<b>Tabela 3.2:</b> composição da corrente de entrada da torre absorvedora. ....	18
<b>Tabela 4.1:</b> comparação da composição molar do gás de saída da torre .....	20

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C3 ou propeno – 1-Propeno

C2 ou eteno – 1- Eteno

EPDM – Borracha de Etileno-Propileno-Dieno



## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Absorção de gases	3
2.1.1	Transferência de Massa	3
2.1.1.1	Teoria do filme	3
2.1.2	Condição de equilíbrio para interface líquido-gás	4
2.1.3	Colunas de recheadas	5
2.1.3.1	Recheios	7
2.1.3.2	Solvente	8
2.1.3.3	Distribuidores	8
2.1.3.4	Perda de Carga	9
2.2	Curvas de performance	11
2.2.1	Curvas de performance aplicadas a torres absorvedoras	12
3	Materiais e Métodos	14
3.1	Estudo de Caso	14
3.1.1	Processo da planta	14
3.1.2	Torre absorvedora de propeno (T-1606)	16
3.2	Metodologia computacional	17
3.2.1	Construção do modelo	17
4	Resultados	20
4.1	Validação do modelo	20
4.2	Análise Hidráulica	20
4.3	Curvas de operação	21
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	26
	REFERÊNCIAS	27

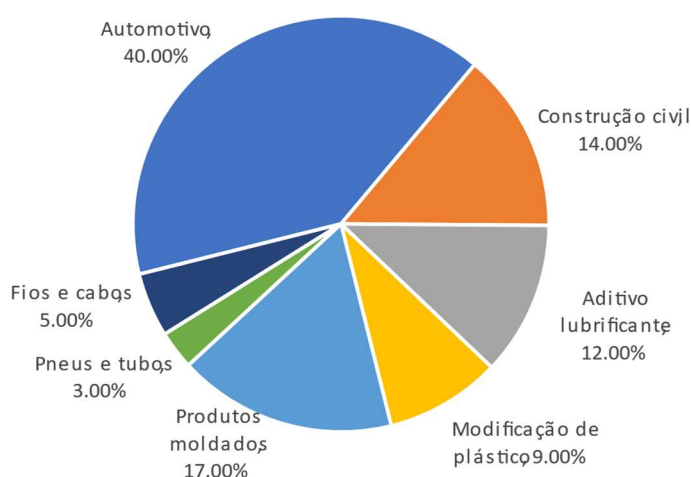


## 1 Introdução

Ainda que uma definição exata para o termo recessão não exista, de forma geral, esse termo é usado para descrever longos períodos de declínio na atividade econômica de um país. Segundo o *International Monetary Fund* muitos analistas usam a queda do PIB (Produto Interno Bruto) de um país por dois trimestres consecutivos para determinar um cenário de recessão. Porém estes alertam que esta definição é muito específica e muitos cenários podem não apresentar esta prerrogativa e ainda assim serem representativos de uma recessão.

Ainda que não se possa enquadrar a atual conjuntura do Brasil na definição clássica de recessão, a atual situação do setor automotivo no Brasil não é nada animadora. A desaceleração da atividade econômica, alta inflação e juros elevados estão levando empresas a ajustarem os planos de produção. Desta forma diversas empresas do ramo estão suspendendo linhas de produção e concedendo férias coletivas a seus empregados. Enquanto outras até mesmo deixaram o país. Este cenário vem sendo a regra a alguns anos e na visão de economistas do Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos do Bradesco, novas paradas de fábricas devem ocorrer (Fábricas, 2023).

Um dos reflexos desse cenário é a queda nas vendas das indústrias produtoras de intermediários, resinas termoplásticas e empresas de transformação plástica, respectivamente, indústrias de 2ª e 3ª geração (Gomes et al., 2005), responsáveis por produzir partes para as linhas de montagem de carro. Essa queda pode afetar fortemente a borrachas que possuem seu uso atrelado a um setor específico do mercado, caso da borracha de EPDM. Como demonstra a Figura 1.1, cerca de 40% do mercado de EPDM encontra-se diretamente correlacionada ao ramo automotivo. Sendo assim esta desaceleração na produção de carros afetou fortemente as demandas de produção das plantas de EPDM.



**Figura 1.1:** Divisão do mercado de EPDM por setor comercial (adaptado de market-research-experts.com)

Esse cenário de baixa demanda de produção é sempre caracterizado pela realocação dos esforços dos engenheiros à busca pela redução de custos de produção da borracha. Em análise de custos interna da planta o propeno aparece como um dos maiores custos para a planta em termos de matéria prima, correspondendo a aproximadamente 25% dos custos totais da planta ou 52 milhões de reais aproximadamente. Sendo assim a recuperação dos monômeros não reagidos representa uma grande oportunidade de corte de gastos.

O processo de polimerização da borracha de EPDM faz uso de três comonômeros como matéria prima: eteno, propeno e ENB. A reação é feita em solução de isohexano havendo o reciclo da fase gasosa do reator. Após concluída a reação, os gases presentes nos vasos de desativação e subsequentes são processados por uma torre de absorção responsável por recuperar os monômeros de propenos que ainda estão presentes. Sendo assim, a aprimoração no controle da torre pode levar a uma maior recuperação de propeno e a um processo mais eficiente.

Com isso, o objetivo deste trabalho é analisar o processo de recuperação de propeno para diferentes vazões de hexano de lavagem, buscando minimizar perdas do comonômero do processo. Para isso, utilizou-se de simulações em estado estacionário no simulador Aspen Plus V12.1 para replicar a torre. Foram retornadas curvas de operação para diferentes condições do processo.

Para que fosse atingido o objetivo proposto foi necessário primeiramente, entender o processo de absorção bem como o funcionamento de uma torre absorvedora. Conhecendo os parâmetros de *design* e operação que afetam seu funcionamento. Posteriormente criou-se modelo da torre em simulador comercial (Aspen Plus V12.1). Validando-se os dados obtidos por simulação para assim, garantir que o modelo criado representa fielmente o processo em área. Então construiu-se as curvas de operação analisando a recuperação de propeno para diferentes vazões de isohexano possíveis ganhos obtidos com a correta operação da torre.

Este estudo foi dividido em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo a motivação, o objetivos e a estrutura do trabalho foi apresentado. Na segunda parte a revisão dos principais conceitos necessários para o entendimento do processo de absorção e para a criação de curvas de operação foi abordada. Posteriormente o caso estudado e as metodologias aplicadas para a análise dos resultados foram exploradas. Os resultados e curvas de operação retornadas foram apresentados e discutidos na quarta parte. Por fim apresentou-se breve fechamento do trabalho no último capítulo.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Absorção de gases

A remoção de um ou mais componentes de uma mistura gasosa através do contato dessa mistura com um líquido (solvente) é a segunda maior operação de engenharia química realizada na indústria (Sovilj et al., 2019). Esta operação é baseada na transferência de massa ocorrida na interfase líquido-gás sendo controlada principalmente pela velocidade de difusão dos gases em um solvente de baixa volatilidade (Pérez Sánchez et al., 2016). Esse processo pode ainda ser caracterizado pela ocorrência de reação química entre os componentes presentes. Caso essa reação tenha grande efeito na velocidade de transferência do soluto para o solvente denomina-se essa então uma absorção química. Caso não se tenha reação, ou ela tenha pequeno impacto na transferência, denomina-se uma absorção física (Richardson et al., 1999).

Segundo Richardson et al. (1999) quando é feito o projeto de um equipamento que tenha por objetivo a absorção de um gás, deve-se certificar de que este gás entre intimamente em contato com o líquido. Sendo a eficiência do equipamento determinada pelo sucesso em promover o contato entre as duas fases. Ainda segundo Richardson et al. (1999) apesar de a forma geral do equipamento ser similar a uma torre de destilação, o método de operação de uma torre absorvedora é diferente. Nela os gases são introduzidos no fundo da torre enquanto o solvente é injetado no topo da coluna, como um líquido; o gás que deseja ser absorvido deixa a torre pelo fundo junto ao solvente líquido, enquanto os outros componentes saem pelo topo.

#### 2.1.1 Transferência de Massa

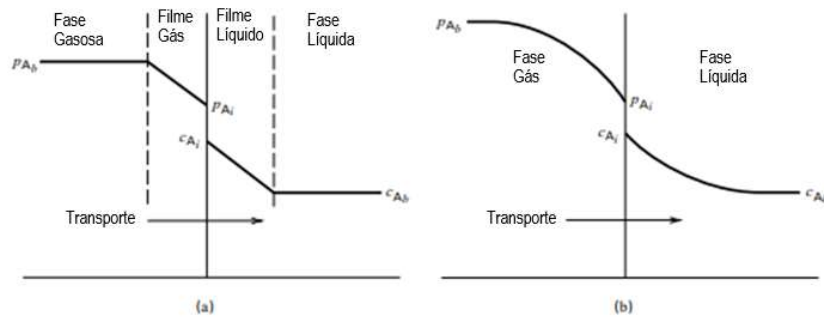
Quando se olha para o estudo de transferência de massa interfacial a teoria de dois filmes de Whitman representa a primeira tentativa de explicar a transferência de material de um fluido para outro e ainda que não represente exatamente as condições praticas em muitos equipamentos, sua teoria nos dá expressões que podem ser aplicadas a dados experimentais sendo por essa razão usada extensamente (Backhurst et al., 2002).

##### 2.1.1.1 Teoria do filme

Foi proposto por Lewis & Whitman (1924) que a velocidade de absorção de um soluto em uma mistura gasosa por um líquido é limitada pelo processo de difusão. Segundo eles na interfase gás-líquido, tanto no lado líquido quanto no lado gasoso, há a formação de um filme no qual os efeitos convectivos são tão rápidos em relação à velocidade de difusão que eles não teriam efeito apreciável na velocidade de absorção. Assim pode ser concluído que não se tem a formação de diferenças de concentração devido à canalização e que esses filmes seriam as resistências controladoras do processo de transferência de material de uma fase para a outra.

A velocidade de difusão através do filme gasoso é proporcional a diferença de concentração do soluto no interior da mistura gasosa e no filme externo. Já a difusão através do filme líquido é controlada pela diferença de concentração do soluto entre

a interface do líquido e o interior do corpo líquido. Como a espessura dos filmes descritos anteriormente é muito pequena, a quantidade real de soluto contida neles é negligenciável frente à quantidade de soluto que é transportada por difusão através deles. Assim pode-se concluir que a quantidade de soluto que passa através de um filme deve passar pelo outro, podendo então os dois filmes serem considerados como duas resistências difusivas em série. Podendo ainda, em algumas situações, um dos filmes ser desprezado (Lewis & Whitman, 1924).



**Figura 2.1:** gradiente de concentração para teoria das duas resistências: (a) teoria do filme; (b) gradientes mais realistas (extraído de Seader et al., 2011).

A Figura 2.1 representa de forma gráfica o modelo das concentrações proposto pela teoria do filme e a direita representa um gradiente mais realista das concentrações. Por fim Lewis & Whitman (1924) propõem a equação 2.1 para o cálculo da velocidade de absorção por unidade de área ( $\frac{1}{A} \frac{dW}{dt}$ ) em  $\frac{g}{h \cdot cm^2}$ . Essa propriedade seria igual ao coeficiente difusivo por unidade de área ( $k_G$  para o filme gasoso e  $k_L$  para o filme líquido) multiplicado pela diferença da concentração de soluto na fase e na interfase gasosa, respectivamente  $P_G$  e  $P_i$  para o gás e  $C_L$  e  $C_i$  e para o líquido.

$$\frac{dW}{A \cdot dt} = k_G(P_G - P_i) = k_L(C_L - C_i) \quad (2.1)$$

### 2.1.2 Condição de equilíbrio para interface líquido-gás

Gibbs mostrou que duas fases entram em equilíbrio uma vez que se atinge a igualdade de todos os potenciais, incluindo não apenas a temperatura e a pressão, mas também o potencial químico ( $\mu$ ). Potencial químico pode ser entendido como a tendência de um componente em abandonar a fase, sendo assim uma medida da instabilidade do componente na fase (Foust et al., 1982).

Trabalhos posteriores mostraram que o potencial químico poderia ser substituído pela fugacidade ( $f$ ) através da equação 2.2. Tendo como vantagem o fato de poder ser relacionado a grandezas físicas mensuráveis.

$$\mu_i = RT \ln f_i + \theta \quad (2.2)$$

onde  $\theta$  é uma função da temperatura (Foust et al., 1982).

Assim pode-se representar o equilíbrio gás-líquido de uma coluna absorvedora pela igualdade da fugacidade das duas fases.

$$f_i^G = f_i^L \quad (2.3)$$

Pode-se expressar a fugacidade da fase gasosa pela pressão parcial do gás na pressão de interesse, considerando comportamento ideal e pressão muito baixa. Sendo, então, conveniente acrescentar um fator de correção.

$$f_i^G = \left(\frac{f}{p}\right)_i P y_i \quad (2.4)$$

onde  $\left(\frac{f}{p}\right)_i$  é o fator de correção, razão entre a fugacidade e a pressão total do sistema,  $P$  é a pressão total e  $y_i$  é a fração molar do componente na mistura.

Já a fugacidade do líquido pode ser definida pela pressão de vapor do componente puro ( $P_i^v$ ) multiplicado pela fração molar do componente no líquido ( $x_i$ ), multiplicada pelo coeficiente de atividade ( $\gamma_i$ ).

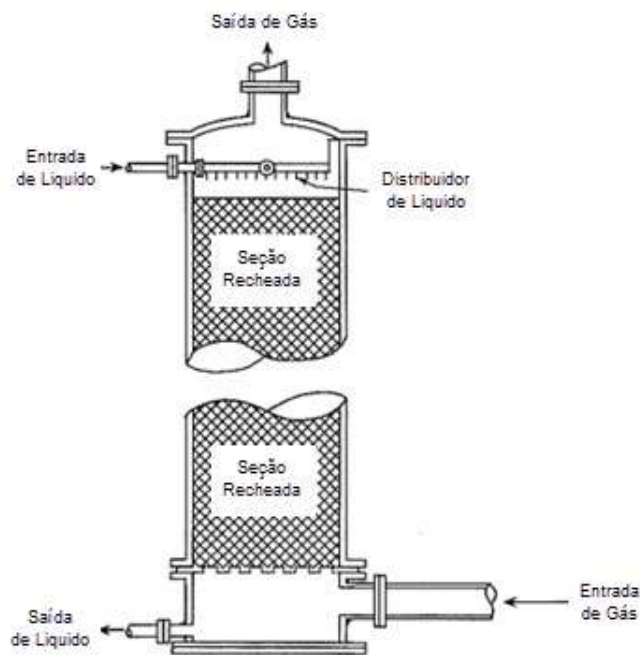
$$f_i^L = P_i^v x_i \gamma_i \quad (2.5)$$

Juntando as equações 2.3, 2.4 e 2.5 e considerando comportamento ideal de ambas as fases, chega-se à Lei de Raoult (equação 2.6). Essa nos mostra que a transferência de massa de uma fase para outra está intimamente relacionada a pressão de vapor do componente (Sinnott, 2008).

$$P y_i = P_i^v x_i \quad (2.6)$$

### 2.1.3 Colunas de recheadas

Colunas recheadas podem ser usadas em uma série operações, como: destilação, absorção de gases, extração líquido-líquido e dessorção. Diferentemente de uma coluna de pratos em uma coluna recheada o contato entre as fases é contínuo e não separado em uma série de equilíbrios (pratos). O líquido é injetado no topo escoando para a base da coluna; enquanto os gases são injetados na base da coluna escoando para topo, contra correntemente. Na Figura 2.2 pode-se ver um diagrama ilustrando o funcionamento de uma torre de recheio (Sinnott, 2008).



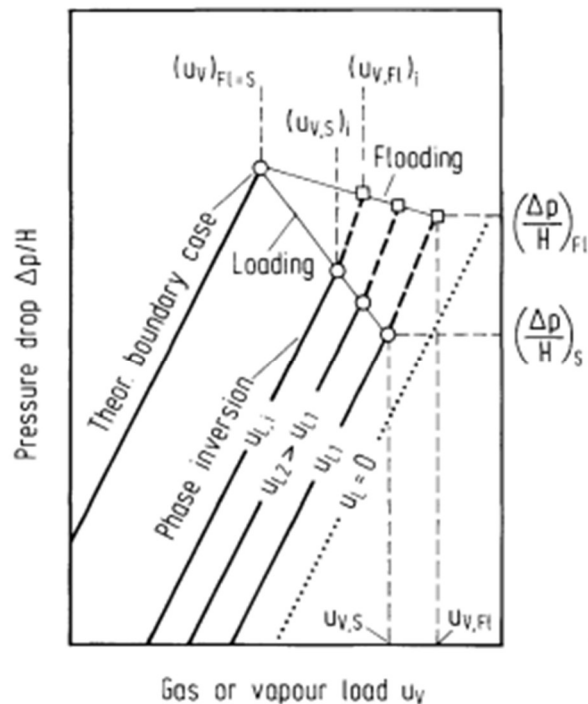
**Figura 2.2:** Coluna de absorção recheada (retirado de Warren L. McCabe et al., 1993)

A performance de uma coluna recheada é intimamente dependente da manutenção de uma boa distribuição tanto do gás quanto do líquido ao longo do recheio da torre (Sinnott, 2008). Para Billet (1995) a otimização na escolha de um recheio para uma torre seria impossível.

Com relação a operabilidade das colunas de absorção pode-se dividir essa em faixas de operabilidade. Conforme aumenta-se a velocidade da entrada de gases para a torre, aumenta-se também o acúmulo de líquidos na coluna. Com isso reduz-se a área livre para a vazão do gás o que acaba por aumentar o diferencial de pressão da torre.

As faixas são então definidas com base no acúmulo de líquido no recheio. Em um primeiro momento com uma vazão muito baixa, a torre encontra-se abaixo do ponto de carregamento. Nesta faixa não se percebe grande acúmulo no recheio e as interações entre o solvente e os gases são reduzidas. Com o aumento da vazão passa-se o ponto de carregamento, onde o recheio da torre encontra-se preenchido pelo solvente maximizando as interações gás-líquido. Contudo ao seguir-se aumentando a vazão atinge-se o ponto de inundação, onde os gases carregam o solvente acumulado para a saída gasosa. A Figura 2.3 ilustra o aumento da vazão dos gases de entrada indicando os pontos de carregamento (*loading*) e inundação (*flooding*) (Lima et al., 2021).





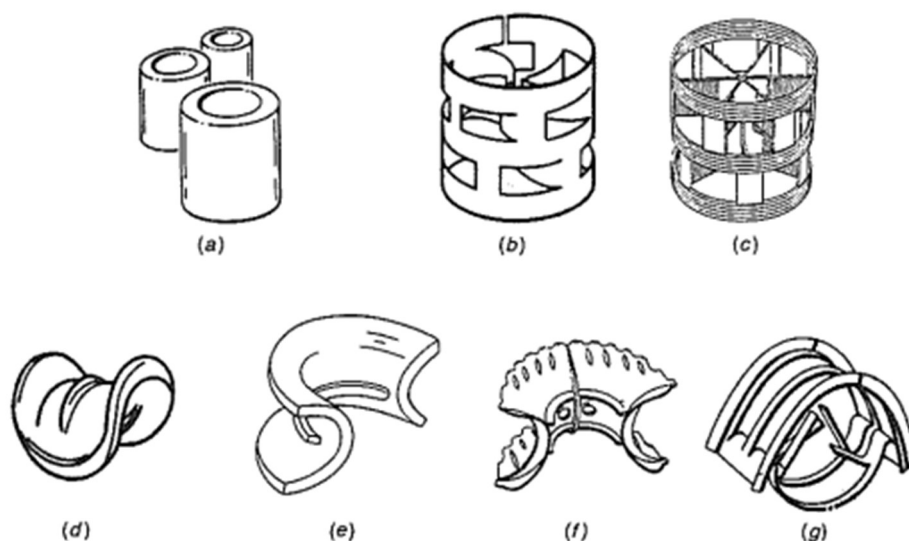
**Figura 2.3:** Gráfico ilustrando a perda de carga em função da vazão dos gases de entrada (extraído de Billet, 1995).

Destas relações surgem os principais problemas operacionais das colunas absorvedoras. A inundação (*flooding*) ocorre quando a vazão de gás de entrada é tão elevada que não permite que o solvente percorra todo o comprimento da coluna, prejudicando a absorção e arrastando o solvente para a corrente gasosa. Já o gotejamento (*weeping*) ocorre quando a vazão de gás é tão reduzida que os gases não conseguem segurar os líquidos no recheio da coluna assim diminuindo a transferência de massa (Billet, 1995).

### 2.1.3.1 Recheios

Uma série de recheios para processos de separação encontram-se disponíveis no mercado. Estes são encontrados em diversos materiais, formatos e tamanhos. Podendo eles serem aleatórios ou estruturados em padrões regulares, os quais são então empilhados. Os recheios têm por função aumentar a área de contato entre a fase gasosa e líquida, devendo garantir uma distribuição uniforme (Billet, 1995).

Recheios aleatórios podem ser feitos aço, alumínio ou materiais baratos e inertes como, argila, porcelana e plástico. Grande fração de espaço vazio e área de passagem são atingidos ao se fazer as unidades do recheio em formato irregular e/ou oco, de forma que elas se entrelacem em estruturas com porosidade ou fração vazia de 60 a 90 por cento. Na Figura 2.4 pode-se ver a ilustração de diversos tipos de recheios aleatórios (Warren L. McCabe et al., 1993).



**Figura 2.4:** recheios aleatórios comumente usados: (a) Anel de Raschig; (b) Anéis metálicos de Pall; (c) Anéis plásticos de Pall; (d) Cella de Berl; (e) Cella de Intalox em cerâmica; (f) Cella Super Intalox em plástico; (g) Cella Intalox em metal. (retirado de Warren L. McCabe et al., 1993)


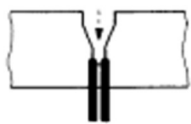
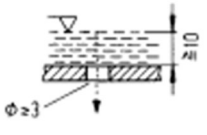
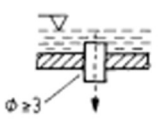
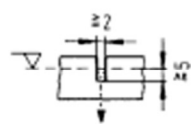
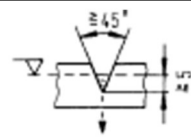
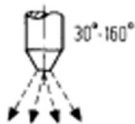
### 2.1.3.2 Solvente

A escolha do solvente a ser utilizado na operação de uma torre dependerá de uma série de fatores. Custo é de extrema importância visto que moldará parte do nosso processo. Caso nosso solvente seja barato e não apresente risco ambiental, água por exemplo, pode-se negligenciar em parte a recuperação dele pós processo de absorção. Porém caso nosso solvente tenha mais valor agregado deve-se nos preocupar com a recuperação do mesmo para que venha a ser reutilizado. O fator econômico também pode influenciar na vazão de solvente sendo injetada na torre (Strigle, 1994).

Além disso outros fatores devem ser levados em consideração tais como semelhança química. Quanto maior a semelhança entre o solvente e o composto a ser absorvido, maior será a solubilidade. Além disso deve-se optar por um solvente estável, não corrosivo, não tóxico, com baixo impacto ambiental e baixa volatilidade (Strigle, 1994).

### 2.1.3.3 Distribuidores

Tão importante quanto a escolha do solvente a ser usado no processo é o design dos distribuidores usados na coluna. Segundo Kister (1990) todos os tipos de distribuidores apresentaram algum grau de má distribuição. Isso se deve ao fato de, para razões práticas, o líquido só pode ser dividido em um número limitado de correntes. Sendo assim quando escolhendo um distribuidor deve-se levar em consideração a compatibilidade com o processo e evitar a má distribuição em larga escala. A Figura 2.5 apresenta alguns dos tipos de distribuidores.

Distribuidor	Princípio		Design
Capilar		Transporte de líquido por forças de capilaridade	Em grandes colunas, principalmente como distribuidores do tipo passagem com pré distribuição do líquido
Fenda perfilada		Passagem como jatos líquidos	
Peneira ou tubo		Descarga do líquido como jatos	
			
Fenda		Transbordamento como jatos líquidos	
			
Bocal		Líquido distribuído como gotas	Perfurado

**Figura 2.5:** Tipos de distribuidores líquidos (adaptado de Billet, 1995)

Para os distribuidores dos gases enfrenta-se um problema. Como uma placa de suporte de recheio está localizada imediatamente acima da entrada do gás, esta placa deve ser usada para controlar a distribuição de vapor. Obviamente, a má distribuição de vapor pode reduzir a eficiência da coluna da mesma forma que má distribuição de líquidos; embora devido à turbulência do vapor, sua taxa de mistura é pelo menos três vezes maior que a da fase líquida. O potencial para má distribuição de vapor aumenta à medida que a coluna diâmetros ou pressões operacionais aumentam.

#### 2.1.3.4 Perda de Carga

A presença de recheio em uma torre de destilação oferece uma resistência ao escoamento dos fluidos maior que no caso de uma torre sem recheio algum. No caso do escoamento do líquido, esta resistência não é de grande importância, visto que, ele se encontra sobre a ação da gravidade. Já no caso do gás que flui para o topo da coluna, a resistência oferecida pelo recheio é de grande importância.

Kozeny em 1927 modelou o recheio de uma coluna como uma série de pequenos tubos de mesmo comprimento e diâmetro. Em 1938, Carman aplicou o trabalho de Kozeny para experimentalmente determinar a perda de carga de um escoamento através do recheio. Este trabalho produziu a equação de Carman e Kozeny (equação 2.7).

$$\Delta P = \psi \frac{Vu'}{\varepsilon^3} \left[ \frac{1-\varepsilon}{D_p} \right]^2 \quad (2.7)$$

onde  $\Delta P$  é a diferença de pressão,  $\psi$  é a constante de proporcionalidade,  $V$  e  $u'$  são respectivamente a velocidade e a viscosidade do fluido,  $\varepsilon$  é a fração de vazio do recheio e  $D_p$  é o diâmetro da partícula esférica equivalente.

A equação 2.7 considera que o gás escoar de forma laminar através do recheio. Contudo isso não é o que se observa. Na grande maioria das aplicações o gás tem escoamento turbulento, sendo assim Burke e Plummer, em 1928, usaram modelo similar ao de Kozeny e derivaram a equação 2.8 que calcula a perda de carga de um escoamento turbulento através do recheio da torre.

$$\Delta P = \psi \frac{V^2 \rho_G}{D_p} \left[ \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right] \quad (2.8)$$

Na equação 2.8 a perda de carga por unidade de comprimento do recheio é uma função da velocidade de escoamento do gás ( $V$ ), fração de espaço vazio ( $\varepsilon$ ), massa específica do gás ( $\rho_G$ ) e diâmetro da partícula esférica equivalente ( $D_p$ ). Além disso tem-se uma constante de proporcionalidade ( $\psi$ ). Por fim Ergun, em 1952, combinou a equação de perda por arraste e a equação de perda de energia cinética para produzir a equação de perda de carga para escoamento através de um recheio (equação 2.9).

$$\Delta P = \psi_1 \frac{Vu'}{\varepsilon^3} \left[ \frac{1-\varepsilon}{D_p} \right]^2 + \psi_2 \frac{V^2 \rho_G}{D_p} \left[ \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right] \quad (2.9)$$

A equação 2.9 foi aplicada com sucesso a leitos compactados onde a queda de pressão é pequena em comparação com a pressão operacional da coluna. A tabela 2.1 apresenta as características de alguns tipos de recheio metálicos.

**Tabela 2.1:** características recheio metálicos (retirado de Strigle, 1994).

Recheio	Fração de vazio	Massa específica da peça (lb/ft <sup>3</sup> )	Perda de carga para uma fase (in H <sub>2</sub> O/ft)	
			G* = 1500	G* = 2700
Recheio IMTP® #25	0,962	18,8	0,38	1,24
Recheio IMTP® #40	0,971	14,5	0,24	0,79
Recheio IMTP® #50	0,977	11,3	0,15	0,50
Recheio IMTP® #70	0,982	9,0	0,079	0,24
Anéis de Pall 1'	0,942	29,0	0,46	1,49
Anéis de Pall 1 1/2'	0,956	22,0	0,32	1,03
Anéis de Pall 2'	0,965	17,5	0,22	0,72

G\* é a velocidade mássica do gás em lb/ft<sup>2</sup>h

## 2.2 Curvas de performance

Segundo Turton (2008), a forma como um processo opera irá variar significativamente ao longo de sua vida. Isso pode ocorrer por uma série de motivos.

- Design inicial: frequentemente equipamentos são superdimensionados. Isso reduz os riscos resultantes de imprecisões nas correlações de projeto e incertezas nas propriedades dos materiais.
- Efeitos externos: a especificação da matéria prima ou a vazão dos produtos podem variar conforme o tempo.
- Substituição de equipamentos: equipamentos novos e mais eficientes podem ser instalados em outros pontos do processo alterando as condições de operação.

Mudanças na performance de equipamentos: a eficiência nas operações de equipamentos diminui com o tempo, assim alterando as condições de operação.

Com isso em mente (Turton, 2008) aponta que um bom design é aquele o qual condições de operação e performance do equipamento podem ser ajustados ao longo dos anos de operação da planta. Esse modo de operação permite ao processo permanecer competitivo em um mercado cada vez mais competitivo. Contudo isso exige que se tenha conhecimento da performance do equipamento em ampla faixa de condições.

Uma das soluções mais úteis para esse tipo de problema é uma curva ou uma família de curvas que representa a forma como um equipamento responde a mudanças nas variáveis de entrada. Referidas como curvas de performance. As quais apresentam uma gama de soluções possíveis e não apenas uma única resposta. Isso também pode ser alcançado com uma equação, contudo o método gráfico prove um entendimento mais intuitivo do processo (Turton, 2008).

Curvas de performances são construídas ao se plotar a as variáveis de resposta em função das variáveis de entrada. Ao se fazer isso a sensibilidade de uma para a outra torna-se imediatamente clara. Sendo essa relação impossível de ser inferida a partir de uma única solução (numérica) (Turton, 2008).

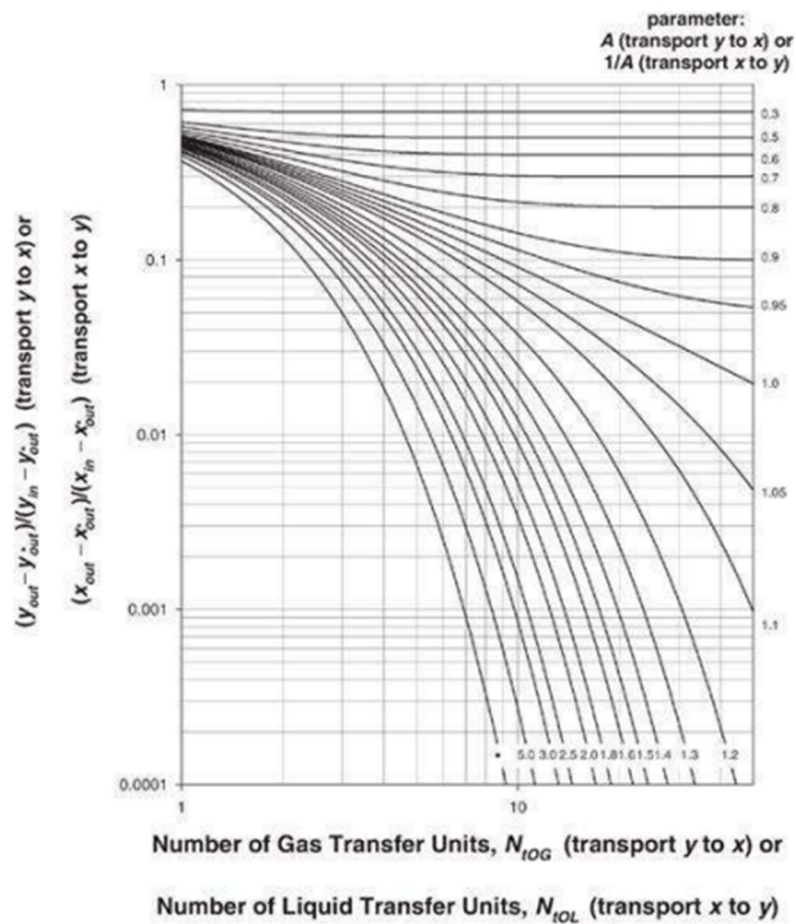
Para construir curvas de desempenho, equações de balanço de massa e energia devem ser utilizadas juntamente com as equações (de projeto) relacionadas aos parâmetros do equipamento. No entanto, outras restrições também devem ser consideradas, como a temperatura e pressão máxima permitida para o equipamento. No caso de torres absorvedoras é muito importante levar em conta a velocidade máxima e mínima para evitar inundações (Turton, 2008).

### 2.2.1 Curvas de performance aplicadas a torres absorvedoras

A separação de componentes em uma coluna de múltiplos estágios envolve a resolução simultânea das equações de balanço de massa e equilíbrio de fases para cada um dos estágios. Assim torna-se complicado a obtenção de uma simples relação que descreva esses sistemas. Algumas relações podem, no entanto, ser obtidas (Turton, 2008). Uma melhor separação dos componentes pode ser obtida ao se aumentar o número de estágios ou a vazão de solvente, o que é evidenciado na equação 2.10.

$$\frac{y_{A,out} - y_{A,out}^*}{y_{A,in} - y_{A,in}^*} = \frac{e^{N_{tOG} \left[ 1 - \left( \frac{1}{A} \right) \right] - \left( \frac{1}{A} \right)}}{1 - \left( \frac{1}{A} \right)} \quad (2.10)$$

A equação 2.10 é denominada equação de Colburn, e assume soluções diluídas e relações de equilíbrio lineares. Nela  $y_A$  é a fração molar de soluto na fase gás,  $A$  é o fator de absorção,  $A = (L/mG)$ ,  $L$  e  $G$  são as vazões molar de líquido e gás, respectivamente, e  $m$  é a relação de equilíbrio ( $y = mx$ ) (Turton, 2008). A Figura 2.6 plota a equação de Colburn para uma série de valores.



**Figura 2.6:** curva da equação de Colburn, número de unidades de transferência considerando operação em contracorrente, equilíbrio seguindo a lei de Henry e constante  $A$  ou  $1/A$  (extraído de Turton, 2008)

Ainda que muito útil nos mostrando que ao aumentar-se  $N_{tOG}$ , ou seja, a altura da coluna, ou o parâmetro  $A$  melhora-se a separação do componente. O gráfico acima não descreve o comportamento de inundação, problema particular de colunas recheadas.

### **3 Materiais e Métodos**

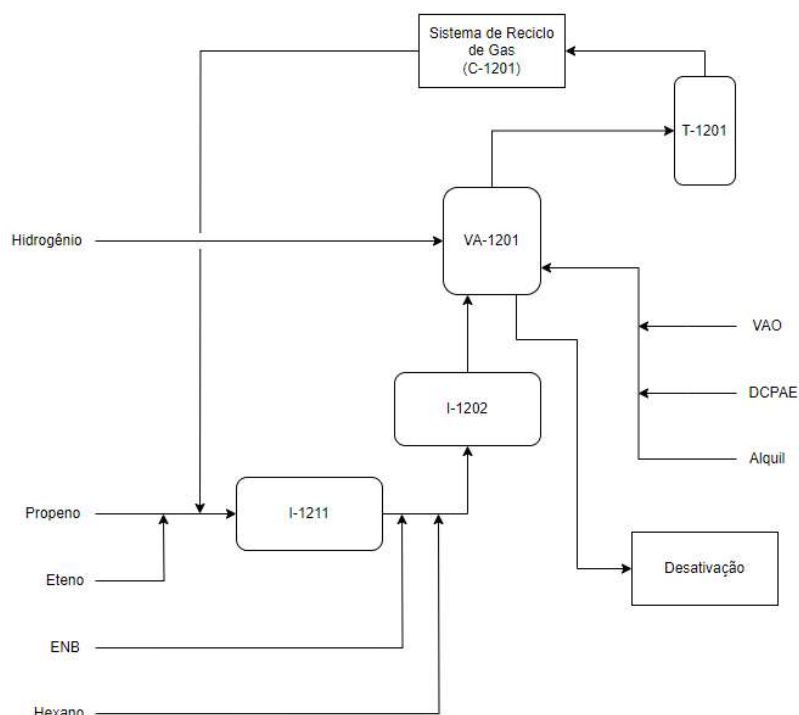
#### **3.1 Estudo de Caso**

##### *3.1.1 Processo da planta*

O trabalho tem por foco propor melhorias na operação de uma torre de recuperação de propeno (C3) de uma planta de borracha EPDM. O processo de polimerização ocorre em solução de hexano, utilizando um reator constantemente agitado (VA-1201) e uma mistura de catalisadores conhecidos por catalisadores Ziegler-Natta, Alquil e Vanox. Pode ser usado em alguns grades um promoter, Diclorofenil Etiléster (DCPAE), com o objetivo de elevar a atividade do catalizador. O Promoter também tem por objetivo melhorar a distribuição randômica dos monômeros na cadeia polimérica, reduzindo assim a cristalinidade. As matérias-primas eteno (C2), propeno (C3) e 5-etilideno-2-norborneno (ENB) são misturadas com hexano e com monômero de reciclo que são parcialmente liquefeitas em dois trocadores (I-1211 e I-1202) e introduzidos no Reator (corrente de fundo), onde são polimerizadas sob pressão e temperaturas constantes. O calor produzido pela reação é removido pela evaporação do propeno. Hidrogênio é utilizado como modificador da viscosidade da borracha.

O gás vaporizado é reciclado para o reator através do C-1201 (compressor de gás de reciclo). Como uma pequena quantidade de polímero é arrastada pela corrente de gás de topo, é necessária sua remoção para evitar incrustações no sistema de gás de reciclo, o que é feito pela torre lavadora de gás de reciclo (T-1201). A Figura 3.1 apresenta fluxograma ilustrando a reação da planta de EPDM.





**Figura 3.1:** fluxograma do processo de produção de EPDM.

A solução polimérica descarregada do reator é introduzida em misturador com uma solução de emulsificante e água, responsáveis pelo término da reação, transformando-se numa solução emulsificada com fase aquosa e fase orgânica. A solução emulsificada é transferida para o vaso de desativação do catalisador (VA-1202) que tem a função de assegurar que o catalisador tenha tempo necessário para migrar para a fase aquosa e seja dissolvido. Após a migração do catalisador a solução é introduzida em outro misturador, onde são adicionados antioxidante e água quente com o objetivo de tornar a solução uma emulsão líquida.

O vaso de expansão (VA-1203) recebe a emulsão líquida descarregada do misturador, sua temperatura deve ser mantida na faixa de 25 a 45°C, para facilitar a remoção do propeno e facilitar a separação do polímero da água no decantador (V-1215). Esta recebe a solução emulsificada onde a separa em solução polimérica e água. A água separada no V-1215 é enviada para a área de tratamento de efluente. A solução polimérica é então transferida para o decantador de polímero (V-1216) e posteriormente vai para a área de mistura (A-13: Blending) onde a borracha é especificada de acordo com o grade sendo produzido.

O polímero especificado na A-13 é então enviado a área de estripagem (A-14) onde através da injeção de vapor o hexano é evaporado nos deixando ao final do processo o polímero em solução de água. Esta solução é então enviada a área de acabamento (A-15) onde é secada e então empacotada na forma de fardos que então são enviadas ao consumidor.

### 3.1.2 Torre absorvedora de propeno (T-1606)

O trabalho tratará sobre uma torre já existente, sendo assim, uma série de características, dimensões, tipo de recheio, pressão de entrada vazão limite de solvente, já estão pré-estabelecidos.

Antes de falar-se da torre, uma breve descrição do caminho seguido pelo gás que irá ser introduzido na torre será feita. Como já comentado anteriormente o VA-1203 permite a expansão do propeno restante em solução após a terminação da reação no VA-1202. Assim todos os gases expandidos no VA-1203 bem como os gases despreendidos em outras partes do processo são enviados ao V-1217 (acumulador de gás de expansão). A temperatura do vaso deve ser mantida acima dos 5°C, para evitar congelamento de água que possa vir a ser arrastada com o gás. Motivo pelo qual o vaso possui uma bota para evitar o envio dessa água aos compressores de propeno (C-1601, C-1603, C-1604 e C-1605).

Os compressores de propeno recebem o gás residual do V-1217 e promovem a liquefação do propeno através da compressão deste. Posteriormente o propeno comprimido passa pelo trocador I-1602 e então é enviado ao V-1602. Os gases do topo do V-1602 são então enviados à T-1606, objeto de estudo do trabalho, onde o propeno deve ser absorvido deixando os demais gases, "leves", saírem pelo topo e serem queimados no *flare*. A Figura 3.2 apresenta um fluxograma representativo da torre.

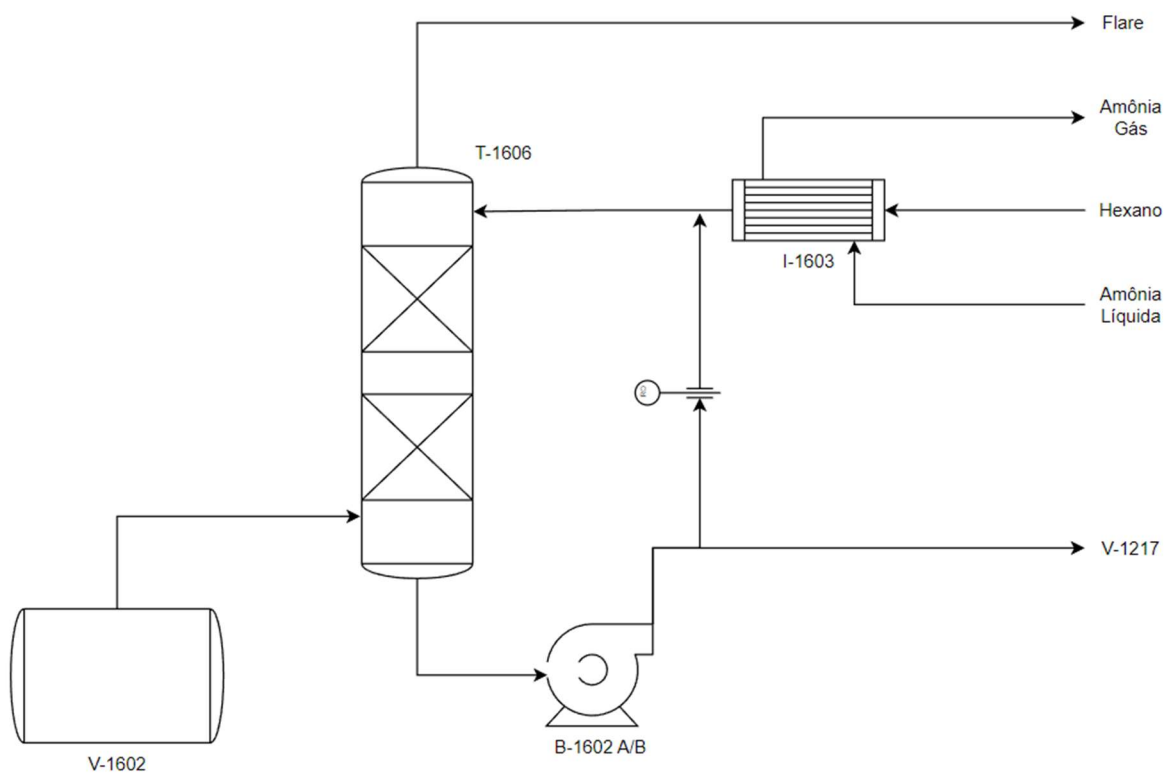


Figura 3.2: fluxograma torre de absorvedora.

Para controle da corrente de entrada consta um medidor de pressão e um medidor de temperatura no V-1602. A torre possui um medidor de pressão no estágio de topo, um medidor de nível e um medidor de temperatura para o acúmulo de solvente no fundo da torre. A alimentação de solvente na torre é controlada por um medidor de vazão sendo sua temperatura variada através do nível de amônia no trocador I-1603, contudo a planta não possui um medidor de temperatura para a alimentação de solvente. Para as correntes de saída da torre o único instrumento encontra-se na linha que direciona os gases para o flare, onde encontra-se um medidor de vazão na linha. A tabela 3.1 apresenta os valores típicos dos instrumentos.

**Tabela 3.1:** Valores típicos dos instrumentos de controle da torre absorvedora

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura V-1602	9,9	°C
Pressão V-1602	15,5	kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão T-1606	9,5	kgf/cm <sup>2</sup>
Nível T-1606	55	%
Temperatura T-1606	15	°C
Vazão Solvente	1,7	m <sup>3</sup> /h
Vazão Flare	14,5	m <sup>3</sup> /h

## 3.2 Metodologia computacional

As análises foram feitas no software computacional Aspen Plus V12.1, amplamente usado para simulações de processos químicos de engenharia.

### 3.2.1 Construção do modelo

Para a modelar-se a torre absorvedora no simulador fez-se o uso de um bloco RADFRAC, recomendado para a simulação de sistema de duas ou três fases. Assim sendo é ideal para a representação de destilações simples, sistemas de esgotamento e o objeto de estudo do trabalho, uma torre absorvedora. Determinou-se então o método baseado em taxas (*rate based*) para os cálculos.

Esta coluna foi construída com 45 estágios teóricos. Uma vez que não era possível determinar o tempo de residência para cálculo do número de estágios reais, usou-se a recomendação do próprio software para a determinação do número de estágios: 3 estágios teóricos para cada pé (0,305 m) de recheio. Uma vez que a coluna possui 4,5m de recheio necessita-se de 45 estágios para uma boa caracterização da coluna. Tal estimativa se provou acertada o que irá ser discutido mais à frente na validação do modelo.

Especificou-se então a inexistência de condensador e refeedor e manteve-se o método de convergência padrão mudando-se nas configurações avançadas dos parâmetros de convergência a opção de absorvedor para sim. Posteriormente se adicionou a pressão de topo, estágio 1, parâmetro conhecido do processo (9,5 kgf/cm<sup>2</sup>) e conectou-se as correntes do processo. Duas entradas: gases vindos do V-1602, no fundo da torre (estágio 45); e isohexano (solvente), no topo da coluna. E

duas saídas: Saída do hexano com o propeno absorvido, fundo da torre; e gases de alívio, *flare*, topo da torre. A Figura 3.3 apresenta a configuração das correntes.

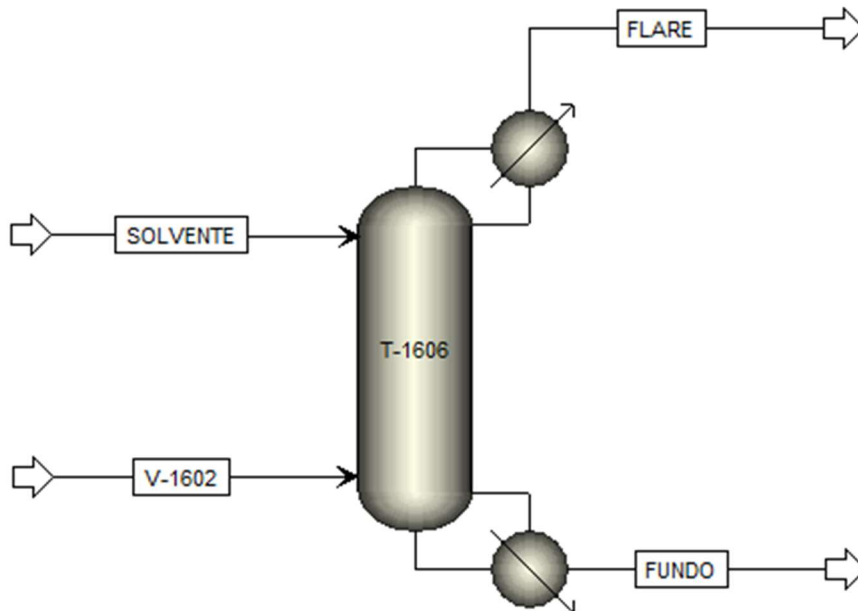


Figura 3.3: representação da torre absorvedora no Aspen.

Posteriormente a conexão de todas as correntes especificou-se o recheio da coluna: Norton Intalox Metal Tower Packing (IMTP) de 25mm em um leito de 4,5 m de altura e 0,4 m de diâmetro. Também se selecionou a opção para atualizar a perda de carga da torre através do estágio do fundo.

Com isso a coluna está especificada, restando agora descrever as duas correntes de entrada. Para a corrente dos gases era conhecido apenas sua pressão e temperatura. Sendo assim era necessário determinar a composição e vazão dela. Para a composição amostras foram colhidas e enviadas para análise em cromatografia gasosa. Os resultado da análise encontra-se na tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** composição da corrente de entrada da torre absorvedora.

Componente	Fração molar (%)
<b>Eteno</b>	<b>35,91</b>
<b>Propeno</b>	<b>35,36</b>
<b>Hidrogênio</b>	<b>15,61</b>
<b>Propano</b>	<b>4,43</b>
<b>Nitrogênio</b>	<b>4,30</b>
<b>Etano</b>	<b>3,64</b>

Vale -se notar que a planta produz múltiplos grades. Sendo assim a composição dos gases que entram na torre varia. Contudo para o estudo optou-se por selecionar apenas um grade apontado como o de mais difícil controle pelos operadores.

A vazão de entrada foi determinada através de processo de tentativa e erro. Uma vez que não se tinha medidor de vazão na entrada, contudo a vazão da corrente de topo era conhecida. Sendo assim variou-se a vazão de entrada até que a vazão de topo atingisse o valor conhecido. Após o processo obteve-se o valor de 18 m<sup>3</sup>/h para a vazão de entrada da torre.

Para atender as necessidades do modelo optou-se pelo uso do pacote termodinâmico RKS-BM, que usa as equações de estado de Redlich-Kwong-Soave com as modificações de Boston Mathias. As equações de RKS descrevem bem o comportamento de fluidos reais e de mistura de hidrocarbonetos.

O valor de comparação do trabalho será a porcentagem de perdas de propeno para o flare, indicador de performance chave, KPI (*key performance indicator*), já usado pela planta e calculado pela equação 3.1.

$$Perdas (\%) = \frac{Q_{C3,flare}}{Q_e * C_{e,C3}} \quad (3.1)$$

Onde  $Q_e$  é a vazão mássica de entrada na torre,  $C_{e,C3}$  é a fração mássica de propeno na entrada e  $Q_{C3,flare}$  é a vazão mássica de propeno para a torre.

Este calcula o desempenho das operações com base nas perdas de matéria prima para o flare. Assim se aplicou a mesma definição a torre absorvedora. O projeto da planta previa um percentual de perdas de 5% de matéria prima. Ao longo dos anos, através de diversos projetos da planta esse parâmetro foi sendo reduzido, estando hoje em 2,5% de perdas. Sendo esse o target quando desenhando as curvas de operação.

Para a obtenção dos valores de  $Q_{C3,flare}$  em diferentes parâmetros de operação usou-se a ferramenta *Sensitivity*, ou sensibilidade em português, do Aspen Plus. Nesta ferramenta o usuário especifica uma variável do processo, temperatura do solvente por exemplo, os limites até os quais deseja que esta seja variada, os degraus da variação e qual a variável de resposta que deseja ser analisada, neste caso a vazão de propeno para o flare. Com isso os resultados foram exportados para o *Excel* onde se fez a construção das curvas.

## 4 Resultados

### 4.1 Validação do modelo

Para fim de validação do modelo, compararam-se as composições em fração molar dos gases de saída da torre. Os resultados de composição foram obtidos por meio de cromatografia, sendo a amostragem feita no mesmo dia que amostragem da entrada da torre. A Tabela 4.1 apresenta os resultados.

**Tabela 4.1:** comparação da composição molar do gás de saída da torre

<i>Componente</i>	<i>Simulação</i>	<i>Amostras</i>
<i>Eteno</i>	53,42%	67,25%
<i>Propano</i>	0,00%	0,01%
<i>Propeno</i>	0,01%	0,03%
<i>Etano</i>	4,46%	5,77%
<i>Hidrogênio</i>	32,12%	19,10%
<i>Nitrogênio</i>	8,73%	6,06%
<i>Isohexano</i>	1,26%	1,23%
<b>Vazão</b>	13 m <sup>3</sup> /h	13,54 m <sup>3</sup> /h

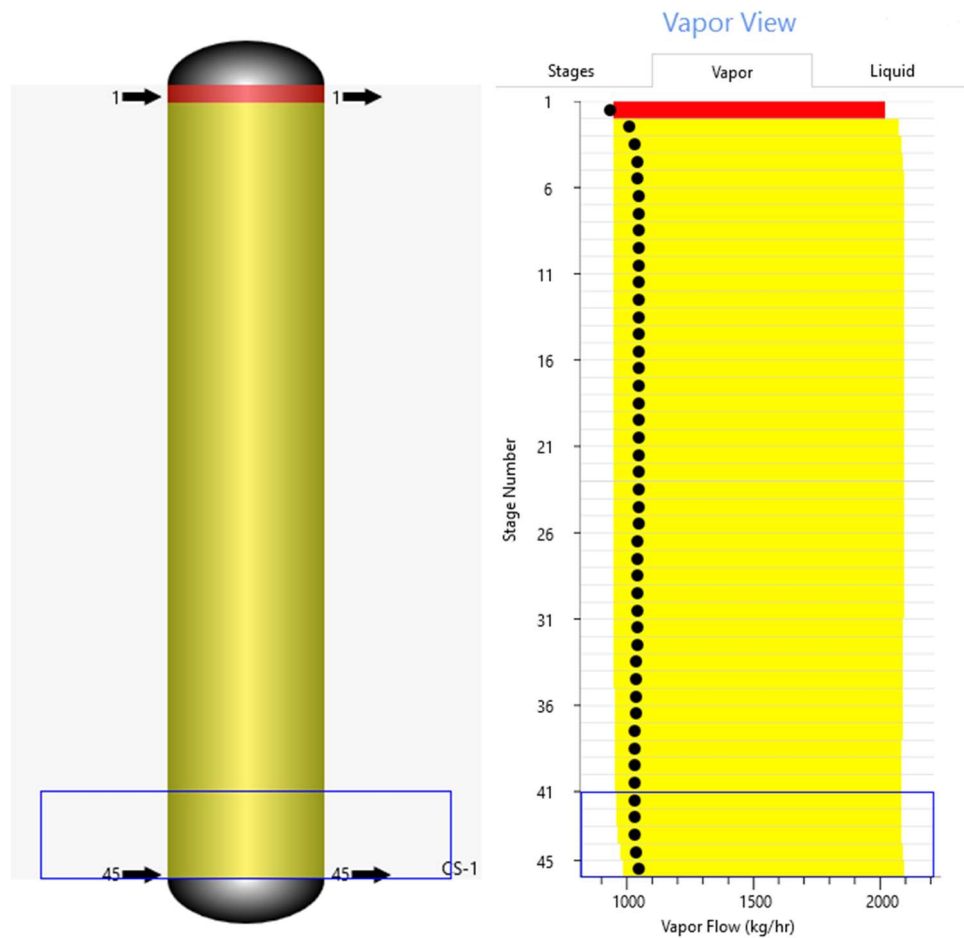
Pode-se ver um desvio significativo dos valores de hidrogênio e eteno. Contudo para o componente em estudo, propeno, e os demais a simulação apresentou resultado muito próximo a realidade.

Além da composição de saída outro parâmetro que pode ser analisado a fim de determinar a confiabilidade do modelo foi a temperatura da corrente de recuperação. O resultado obtido na simulação foi de 28,60°C e analisando a temperatura da corrente no software de controle da planta no dia da coleta das amostras obtém-se resultados que variaram de 27,72 até 29,58 °C.

Assim ambos os parâmetros apresentados mostram que a simulação se encontra em linha com os resultados do equipamento, sendo então capaz de produzir resultados aplicáveis em um cenário real.

### 4.2 Análise Hidráulica

Ao se analisar a condição hidráulica da coluna para as parâmetros padrões de operação (Tabela 3.1) obtém-se os resultados ilustrados na Figura 4.1.

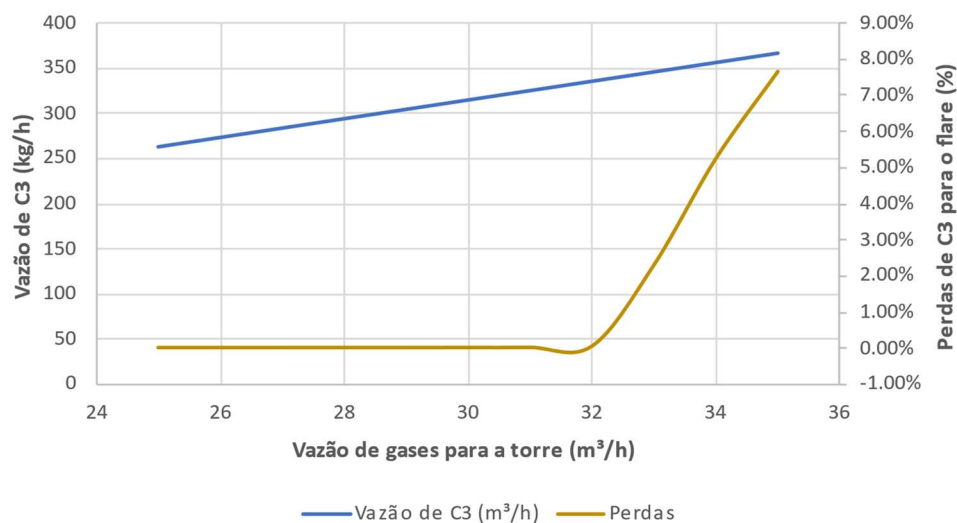


**Figura 4.1:** Indicação da vazão de gás para cada um dos estágios da torre.

A Figura 4.1 mostra que o diferencial de pressão da coluna encontra-se dentro dos valores permitidos para todos os estágios com exceção do estágio de topo. Contudo eles encontram-se próximos aos limites de gotejamento o que é evidenciado a esquerda da Figura 4.1 que demonstra que a vazão de gases na entrada da torre encontra-se próxima ao ponto de carregamento. Sendo assim flutuações na alimentação da torre podem incorrer na ocorrência de gotejamento especialmente caso a torre apresente uma má distribuição do solvente.

### 4.3 Curvas de operação

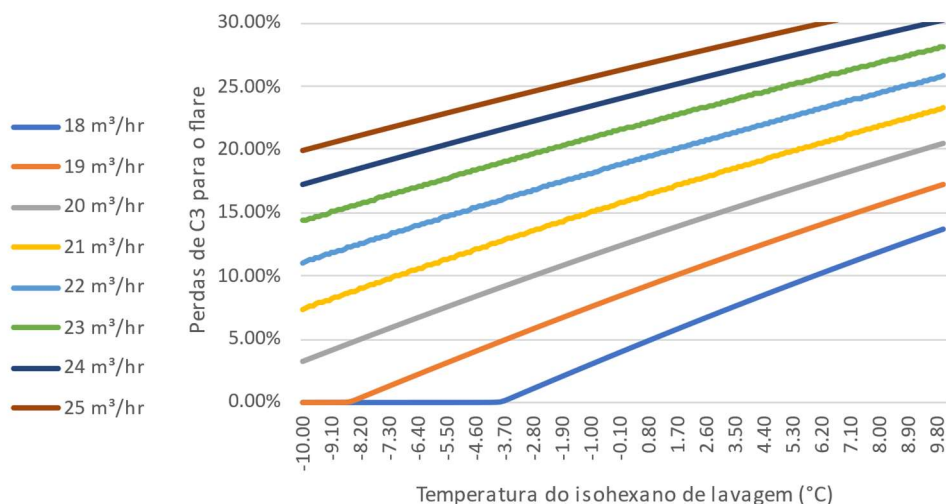
Começou-se analisando qual seria o ponto máximo de operação da torre, máxima vazão de entrada para a qual a torre ainda possui perda menor que os padrões estabelecidos (2,5%). Para isso fixou-se a vazão de hexano no máximo permitido pela bomba (3 m<sup>3</sup>/h), bem como a temperatura da corrente (-5°C) e variou-se a vazão de entrada na torre. Os resultados são ilustrados na Figura 4.2.



**Figura 4.2:** Porcentagem de perdas para o flare mantendo a vazão de hexano de lavagem no máximo e variando a vazão de entrada da torre.

Pode-se ver que uma vez atingidos os 32 m<sup>3</sup>/h de vazão de gases para torre, as perdas de propeno têm um aumento repentino atingindo o máximo permitido em 33 m<sup>3</sup>/h.

Visto esse comportamento repentino decidiu-se analisar qual a influência da temperatura do solvente na absorção de propeno. A Figura 4.3 mostra a condição padrão de operação da torre alterando a temperatura do hexano de lavagem para diversas vazões de entrada na torre.

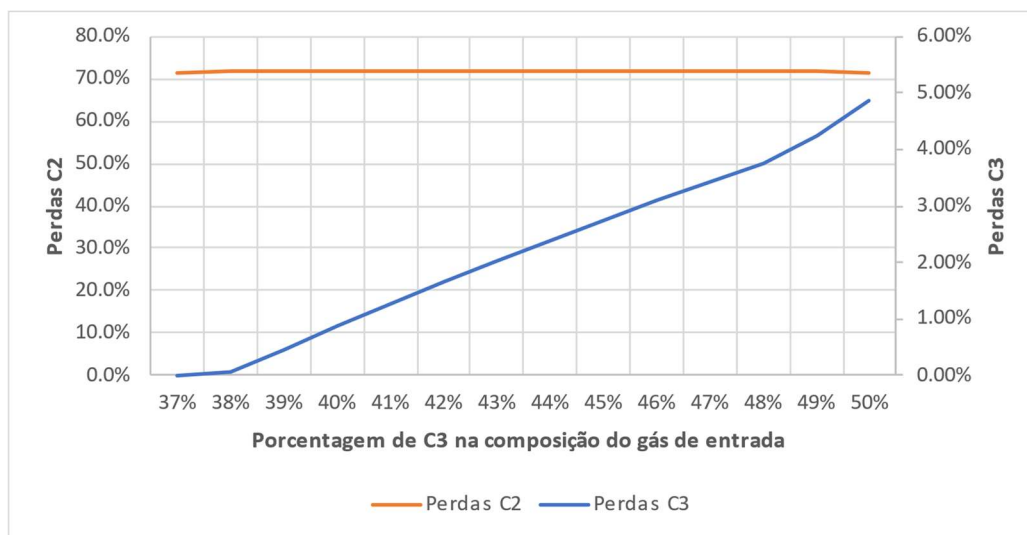


**Figura 4.3:** Porcentagem de propeno perdido variando a temperatura do hexano de lavagem para diversas vazões de entrada.

Esta figura mostra que mesmo para pequena variação na vazão de entrada da torre os resultados de recuperação de propeno podem variar drasticamente. Para uma temperatura de solvente fixada, -3,7°C por exemplo, uma vazão de 18m<sup>3</sup>/h



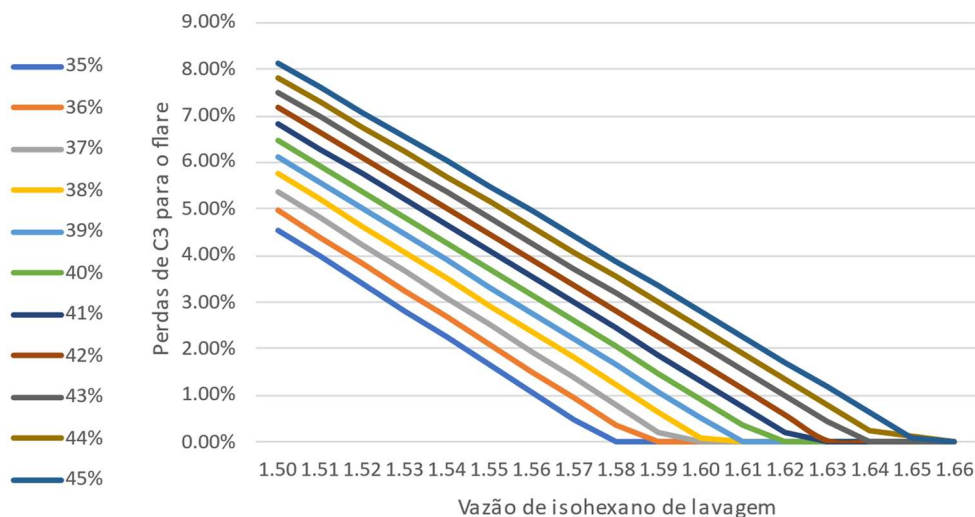
produz perdas próximas do 0% já para 19m<sup>3</sup>/h temos perdas que passam dos 5%. Visto esse comportamento brusco decidiu-se analisar o impacto da composição do gás de entrada. Para tal variou-se apenas a composição de eteno e propeno, parâmetros variados no reator para a obtenção de diferentes grades. Assim a soma das composições de eteno e propeno sempre somam 72% do total da composição do gás de entrada.



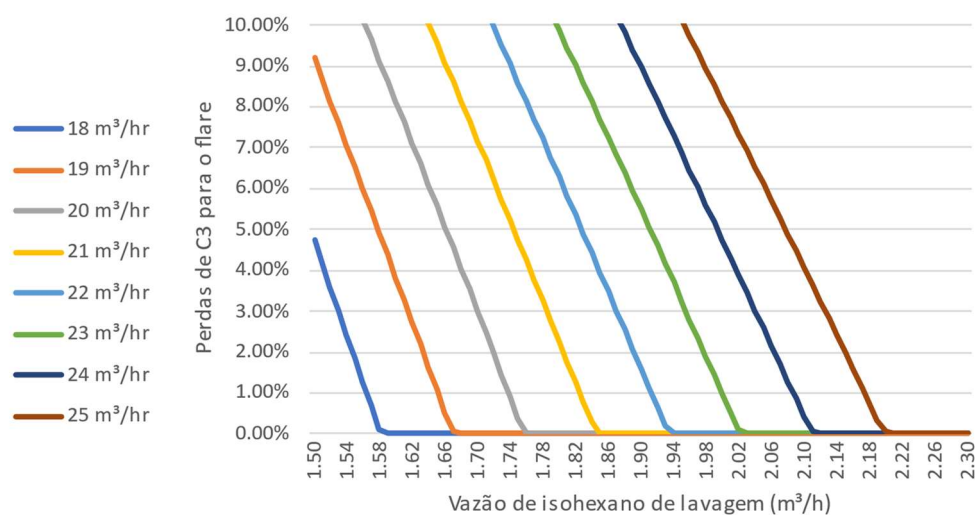
**Figura 4.4:** Perdas de C2 e C3 variando a composição do gás de entrada.

A Figura 4.4 mostra que a composição de eteno na corrente de entrada não interfere na quantidade perdida para o flare, ficando essa em 71,5% ao longo de todo intervalo de composições. Já o propeno é fortemente impactado pelo aumento na composição de entrada. Isso mostra que o isohexano é um ótimo solvente para a recuperação de propeno, contudo não seria uma boa opção para recuperar o eteno.

Assim partiu-se para análise do impacto da vazão de isohexano, parâmetro mais fácil de ser alterado, na porcentagem de perdas de propeno para o flare. Primeiramente variou-se a composição do gás de entrada, Figura 4.5, e posteriormente variou-se a vazão de entrada na coluna, Figura 4.6.



**Figura 4.5:** Perdas para diferentes composições do gás de entrada variando a vazão de isohexano de lavagem



**Figura 4.6:** Perdas para diferentes vazões de entrada variando a vazão de hexano de lavagem.

A comparação das Figuras 4.5 e 4.6 mostra que a percentagem de perdas de propeno para o flare é mais sensível a vazão da corrente de entrada do que sua composição. O que já havia sido observado na análise da sensibilidade da temperatura do solvente, pequenas variações na vazão de entrada da torre podem levar as perdas de propeno de valores próximos a 0% até os patamares de 4-5%.

Sendo assim a falta de um controle das vazões de entrada pode representar uma perda significativa de matéria prima que poderia ser recuperada. Mesmo pequenas flutuações na vazão de entrada podem fazer o percentual de perdas de propeno aumentar de níveis próximos a zero até 5 ou 10%. O que pode representar

um grande desperdício de matéria prima que poderia ser recuperada, caso se fizesse um controle mais eficiente da torre.

Em termos financeiros para uma vazão de 18m<sup>3</sup>/h na corrente de entrada, ou seja, 130kg/h de propeno, teríamos uma economia de 285mil reais. Já para uma vazão de 32m<sup>3</sup>/h, ou 230kg/h de propeno, teríamos uma economia de 505 mil reais.

Estes valores foram obtidos usando a Equação 4.1

$$Economia (R\$) = Q_{Propeno,ent} * 365 * 24 * Preço_{Propeno} * 5\% \quad (4.1)$$

Esta equação considera a diferença entre uma operação sem perdas e uma operação com 5% de perdas contínua. Onde  $Q_{Propeno,ent}$  é a vazão mássica de propeno que é processado pela torre, 365 é o número de dias no ano, 24 é o número de horas no dia e  $Preço_{Propeno}$  é o preço do propeno, neste caso 5R\$/kg.

## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

As metodologias aplicadas neste trabalho cumpriram os objetivos de analisar operacionalmente a coluna de absorção de propeno. As curvas de operação se mostraram uma forma didática e eficaz de apresentação dos resultados a serem analisados.

As simulações mostraram a sensibilidade das perdas de propeno a vazão de hexano de lavagem. Sendo assim uma correta operação da torre representa uma maior recuperação de propeno que por sua vez representa uma grande economia para a planta.

Ainda que a composição da corrente de entrada possa mudar para outros grades. A tendência é de que o grade estudado tenha a maior composição de propeno na corrente. Sendo assim é o grade que impõe maior estresse a torre. Ainda assim recomenda-se novos estudos para os outros grades, pois, ainda que não se esteja perdendo propeno perde-se energia na refrigeração do hexano de lavagem.

Como sugestão, visto a sensibilidade da torre aos parâmetros de vazão, recomenda-se a instalação de um medidor de vazão na entrada da torre e o desenvolvimento de um analisador virtual, para esta corrente. Isso permitirá não apenas um melhor controle da torre de absorção no *grade* estudado. Como o desenvolvimento de malha de controle que relacione a vazão de hexano de lavagem à vazão de propeno indicada pelo analisador.

Como limitação do trabalho, as simulações foram aplicadas com os parâmetros apenas no cenário de referência, o que não acontece em uma planta petroquímica, já que temperaturas e vazões do processo sofrem variações a todo momento.

## REFERÊNCIAS

RICHARDSON, J. F., et al, **Chemical Engineering: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer**. 6ª edição. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

BACKHURST, J. R., et al, **Chemical Engineering: Particle Technology and Separation Processes**. 5ª edição. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

O CASO da Indústria Petroquímica. São Paulo: USP. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3318388/mod\\_resource/content/1/07.MGS\\_CASO\\_IND\\_PETROQUIMICA.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3318388/mod_resource/content/1/07.MGS_CASO_IND_PETROQUIMICA.pdf)>. Acesso em: 2 jan 2024.

CLAESSENS, Stijn; KOSE, M. Ayhan. Recession when bad times prevail. International Monetary Fund. Disponível em: <<https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/Series/Back-to-Basics/Recession>>. Acesso em: 2 jan. 2024.

GOMES, Gabriel; DVORSAK, Peter; HEIL, Tatiana. **Indústria petroquímica brasileira: situação atual e perspectivas**. Rio de Janeiro: BNDS, 2005. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2485/1/BS%2021%20Ind%C3%B3ustria%20petroqu%C3%ADmica%20brasileira\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2485/1/BS%2021%20Ind%C3%B3ustria%20petroqu%C3%ADmica%20brasileira_P.pdf)>. Acesso em: 2 jan. 2024.

MARKET Research Report on EPDM Rubber. Market Research Experts, 2023. Disponível em: <<https://www.market-research-experts.com/wp/transportation/market-research-report-on-epdm-rubber/>>. Acesso em: 2 jan. 2024.

FÁBRICAS da Volkswagen e GM iniciam período de férias coletivas nesta segunda (27). CNN Brasil, São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/fabricas-da-volkswagen-e-gm-iniciam-periodo-de-ferias-coletivas-nesta-segunda-27/>>. Acesso em: 2 jan. 2024.

TURTON, Richard, et al. **Analysis, synthesis, and design of chemical processes**. 3ª edição. Boston: Pearson Education, 2008.

FOUST, A. S., et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982

TOWLER, Gavin; SINNOTT, Ray. **Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design**. London: Butterworth-Heinemann, 2008.

STRIGLE, Ralph. **Random Packings and Packed Towers: Design and Applications**. 2ª edição. Houston: Gulf Publishing Company, 1994.

BILLET, Reinhard. **Packed towers in processing and environmental technology**. 1ª edição. Nova York: VCH Publishers, Inc., 1995.

MCCABE, Warren L., et al. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5ª edição. Nova York: McGraw-Hill, 1993.

SOVIJL, Milan N., et al. **Packed bed absorption column: hydrodynamics and mass transfer**. Acta Periodica Technologica, n. 50: p. 260-267, 2019.

PÉREZ SÁNCHEZ E. J., et al. **Design of a packed-bed absorption column considering four packing types and applying MATLAB**. Nexa Revista Científica, v. 29, n. 2, p. 83-104, 2016.

LEWIS, W. K.; WHITMAN, W. G. **Absorption symposium**. Ind. Eng. Chem., n. 16, p. 1215-1220, 1924.

LIMA, João et al. **Inundação e carga em colunas de absorção recheada**. Research, Society and Development, v. 10 n. 3.