



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE CENTRO
DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA – UAEQ
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**



**UTILIZAÇÃO DE VÁLVULA HOT-GAS BYPASS EM COLUNAS DE
DESTILAÇÃO: UMA REAVALIAÇÃO LITERÁRIA**

LUIZ HENRIQUE SOUZA SANTANA

CAMPINA GRANDE

2023.1

LUIZ HENRIQUE SOUZA SANTANA

**UTILIZAÇÃO DE VÁLVULA HOT-GAS BYPASS EM COLUNAS DE
DESTILAÇÃO: UMA REAVALIAÇÃO LITERÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande como requisito parcial para
a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química sob a orientação do
Prof. Dr. Heleno Bispo Da Silva Junior.

Campina Grande – PB 2023

Santana, Luiz Henrique Souza.
Utilização de válvula hot-gas bypass em colunas de destilação:
uma reavaliação literária / Luiz Henrique Souza Santana. –
Campina Grande, 2023.

31 f. : il.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Heleno Bispo da Silva

CDU

RESUMO

O método de controle por hot gas bypass é um dos métodos mais utilizados para controle em colunas de destilação de condensação total. Porém, sua utilização envolve riscos e caso o projeto de engenharia não contemple os devidos fenômenos que ocorrem no processo, sua utilização pode ocasionar um mal funcionamento da válvula. Muito se aborda sobre esse tema, entretanto, ainda é um uma implementação muito empírica. Portanto, nesse trabalho, será abordado diferentes configurações do uso da válvula, em diferentes processos da indústria química.

Palavras-chaves: Hot-gas bypass, controle de pressão, coluna de destilação.

ABSTRACT

The hot gas bypass control method is one of the most used methods for control in total condensation distillation columns. However, its use involves risks and if the engineering project do not contemplate all the phenomena that occurs in the process, your utilization could occasion a malfunction in the valve. Much has been discussed on this topic, however, it is still a very empirical implementation. Therefore, in this work, different configurations of the use of the valve will be approached, in different process in the chemical industry.

Keywords: Hot-gas bypass, pressure control, distillation column.

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus pais, Luiz Roberto e Carmita Luz e o meu irmão Renan Santana, por terem me apoiado em toda minha jornada, nesse grande desafio de mudar completamente de vida, mudar de estado, agradeço que mesmo estando a mais de mil quilômetros de distância, me dando suporte como se estivessem presencialmente.

Meu agradecimento em especial à Juan Douglas, Mateus Brito, Jonas Ariel e Jackson Souza. Agradeço por tudo que passamos nesses 5 anos, obrigado pelos incríveis debates filosóficos, vou lembrar de cada vez que nos reuníamos para estudar e saindo como se tudo tivesse piorado. Mesmo não sendo irmãos de sangue, vou levar vocês como se fossem 4 irmãos que a vida me deu, tenho certeza que sem vocês, a minha trajetória no curso de engenharia química não seria nem 10% do que foi, vocês tornaram tudo possível, a todos vocês projetistas, meus mais sinceros obrigado e desejo tudo de melhor para vocês. Um agradecimento especial a Carlos Eduardo, que mudou minha vida em muitos sentidos, abriu meus pensamentos para novas visões e um parceiro de negócios, que tornou toda o período de pandemia um pouco mais tranquila, irei lembrar de cada conversa que tivemos.

Ao meu orientador Heleno Bispo, orientador esse que desde o primeiro contato que tive, instigou a todo momento a buscar por conhecimento e melhorar não como aluno, mas também como pessoa.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Química, que ajudaram na construção dos meus conhecimentos e me inspiraram em seguir essa jornada.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO GERAL.....	9
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1. CONTROLE DA PRESSÃO	10
3.2. MÉTODO HOT GAS BYPASS	11
3.3. MODELAGEM ESTACIONÁRIA	12
3.4. MODELAGEM DINÂMICA.....	15
3.5. VASO DE TOPO	18
3.5.1 BALANÇO DE MASSA-FASE LÍQUIDA	18
3.5.2 BALANÇO DE MASSA-FASE VAPOR	18
3.5.3 BALANÇO DE ENERGIA	19
3.6 CONDENSADOR	19
3.6.1 BALANÇO DE MASSA-FASE LÍQUIDA	19
3.6.2 BALANÇO DE MASSA-FASE VAPOR	20
4. METODOLOGIA	21
4.1. ESTUDO UTILIZADO.....	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6. CONCLUSÃO	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

Colunas de destilação possuem uma grande importância dentro da indústria química, sendo responsável por processos fundamentais como o refino do petróleo. Dentro de sua operação, a destilação é um processo delicado, que envolve as diferentes temperaturas de ebulição dentre os componentes envolvidos na separação, sendo necessário um eficiente controle na sua operação.

Dentre as diferentes variáveis de controle de uma coluna, o controle pela pressão de operação da coluna é uma das variáveis mais importantes para se ter o controle, uma vez que, pela termodinâmica, pressões menores irão facilitar o processo de destilação.

Dentre as diferentes formas de se obter um controle de pressão, o controle por *hot-bypass* possui vantagens consideráveis frente aos outros modelos, como a não necessidade de ventilar ou queimar nenhum gás. Não somente, em sistemas controlados por *hot-bypass*, tem-se a facilidade de se realizar manutenções no condensador, uma vez que ele se localiza no solo.

A priori, no Capítulo 3, será realizada uma revisão nos modelos já existentes, fazendo análises acerca do desenvolvimento dos mesmos para assim, avaliar modelos que se adequem ao problema a ser tratado, além disso será abordado os principais balanços de forças, de energia e de massa, para assim construir uma abordagem sólida para validação do tema.

No Capítulo 4, será mostrado a metodologia utilizada de pesquisa, bem como o referencial utilizado.

Já no Capítulo 5, terá as devidas discussões referentes aos artigos mencionados, onde será possível analisar cada configuração utilizada bem como seus pontos fortes.

2. OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo referente as diferentes configurações implementadas do hot-gas bypass, para controle em colunas de destilação, avaliando os pontos que levaram aquela utilização a ser posta em prática, além de entender as possíveis implicações na implementação.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender como funciona um processo de controle por hot-gas bypass;
- Reunir e analisar diferentes configurações da válvula, com o intuito de entender possíveis cenários para cada utilização;
- Verificar a viabilidade da válvula através de processos implementados em estado dinâmico e estacionário.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será abordado os mecanismos de controle pela pressão, bem como um entendimento um pouco mais aprofundado sobre o sistema *hot gas bypass*, assim como a demonstração de modelos previamente estudados.

3.1. CONTROLE DA PRESSÃO

Dentro de uma coluna de destilação, existem várias variáveis de controle, como temperatura, composição, vazão de refluxo, pressão, entre outras. Entretanto, a maioria dos sistemas de controle da coluna assumem que a mesma opera a pressão constante, uma vez que pequenas flutuações no valor da pressão, resultam em uma maior dificuldade de controle e uma menor eficiência da planta. Porém, um controle efetivo de pressão, possibilita possíveis compensações do controle da temperatura e prevê inundação da coluna (STOLEY,2001).

O controle da pressão envolve etapas que acabam sendo bem sensíveis, como o ajuste do balanço de massa e de energia pela manipulação tanto do fluxo de massa quanto do fluxo de vapor de saída da torre. Os métodos de controle por fluxo de massa, normalmente, atuam através do ajuste na taxa de saída de vapor da torre, como também, pela manipulação da corrente de saída que evacua o gás do sistema. Já métodos que envolvem balanço de energia, controlam o fluxo de calor do condensador através da temperatura ou pela troca térmica na área da superfície.

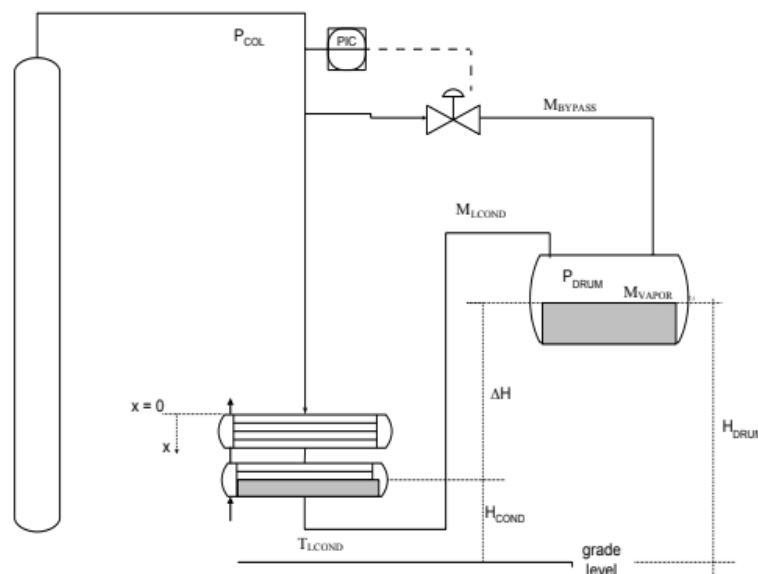
Para uma melhor eficiência de controle, o método a ser utilizado não poderá seguir certas suposições, a exemplo de composições constantes, pois tais suposições não irão produzir resultados condizentes com o esperado. Tal rigidez pode ser a causa de existir poucas análises matemáticas acerca do controle de pressão em colunas de destilação na literatura (MAURICIO-IGLESIAS *et al.*, 2014).

3.2. MÉTODO HOT GAS BYPASS

Dentre os vários métodos existentes de controle de pressão, o controle por hot gas bypass se mostrou o mais eficiente quando se trata de colunas que operam com condensação total (Teixeira,2010). Tal implementação é tão sensível que, mesmo em desenvolvimento por mais de 60 anos, ainda existe uma lacuna de informações quando se trata de uma implementação de fato.

No começo dos estudos sobre esse tipo de controle, Chin (1979) tratava o assunto como bem controverso, pois ao mesmo tempo em que colocar o condensador no solo traria benefícios como melhor quantificação do nível e de uma manutenção mais fácil e mais segura, também existe o fato que o método em si não é de fácil entendimento, pois não existem modelos que englobam todas as variáveis com rigidez. A figura 1 a seguir representa uma esquematização básica da implementação de um controle por *hot gas bypass*.

Figura 3.1- Arranjo básico da implementação do *hot gas by-pass*.



Fonte: Teixeira, 2010.

O sistema funciona da seguinte forma: O condensador, que se localiza no solo, opera abaixo do nível de líquido do vaso de refluxo. O líquido sub-resfriado que sai do condensador entra pela parte inferior ou superior, formando assim um sistema semelhante ao de vasos comunicantes.

O condensador em questão é submerso. Para Teixeira: “ Inundar o condensador torna possível manipular a taxa de transferência de calor, apesar do fato que irá ser necessário uma maior área do que um condensador acima do solo. O que torna o bypass mais caro”.

O sistema *hot gas bypass* opera inundado, ou seja, o controle será feito através do líquido até então acumulado no condensador. Caso haja um aumento inesperado da pressão da coluna, a válvula de controle é então fechada, reduzindo o vapor que é direcionado para o vaso de refluxo.

É importante ressaltar que, as duas fases, líquida e gasosa presente no vaso do topo não estão em equilíbrio, há apenas uma fina camada que separa as duas fases, camada essa em que ocorre a troca térmica. Condição essa que, se não estabilizada, provoca quedas bruscas de pressão, bem como haverá um resfriamento acelerado do líquido, condensando o vapor (LUYBEN,1992).

Como aborda Chin (1979), o método é muito controverso, tendo desvantagens, a exemplo do método ser bastante empírico, resultando em erros de controle. Para evitar problemas futuros, faz necessário um bom projeto de engenharia, para que assim, não ocorra erros de superdimensionamento ou subdimensionamento da válvula de controle.

Entretanto, na literatura existem informações que acabam se contradizendo. Para Stoley (2001), os melhores resultados se dão em arranjos em que a entrada do condensado no vaso de topo se localiza abaixo da superfície líquida. Já para Campos e Teixeira (2010), o melhor arranjo seria com a entrada feita por cima, com o objetivo de não variar o líquido na saída do condensador, evitando possíveis distúrbios entre o controle de nível do vaso e o controle de pressão.

3.3. MODELAGEM ESTACIONÁRIA

Para avaliar um modelo que produza resultados satisfatórios, é necessário primeiramente analisar os modelos já propostos na literatura, afim de evitar possíveis erros como suposições de variáveis constantes ou até mesmo arranjos que não obtiveram resultados desejados.

Um dos modelos mais utilizados na literatura é o proposto por Durand (1980), onde o mesmo propõe um modelo para estimar o tamanho da válvula *hot gas bypass*, ao estimar a quantidade de vapores a ser desviada pelo condensador.

Durand (1980) propõe um balanço de energia no vaso de topo, fazendo a seguinte suposição: A quantidade de vapor desviada deverá ser suficiente para aquecer o condensado até atingir a temperatura de saturação no vaso do topo. Com isso, ele objetivou a seguinte equação:

$$M_{BYPASS} = \frac{M_{LCOND} c_{PL} (T_{DRUM} - T_{LCOND})}{\lambda_c} \quad (3.1)$$

Onde:

M_{BYPASS} = Quantidade de vapor a ser desviada

M_{LCOND} = Quantidade do condensado sub-resfriado

T_{DRUM} = Temperatura do vaso do topo

T_{LCOND} = Temperatura do condensado sub-resfriado

λ_c = Calor latente de condensação

Essa análise mostra que o fator principal de controle na válvula do *hot gas bypass* é a perda de carga estática que ocorre entre o vaso do topo e o condensador no solo. Com isso, Durand propõe o seguinte modelo:

$$P_{COL} = P_{DRUM} + \rho_L \cdot g \cdot \Delta h + \Delta P_{COND} \quad (3.2)$$

Campos e Teixeira (2010) ressaltam que processos que atuam em condensação total possuem certa semelhança com a condensação de um filme turbulento. Isso ocorre devido ao fato da condensação ocorrer simultaneamente em uma superfície vertical, sendo essa coberta por uma fina camada que separa as duas fases, líquida e vapor, tal fenômeno foi conhecido como “filmwise”. Nusselt percebeu esse fenômeno e começou a trabalhar com sistemas com essas características, entretanto, foi somente Kirkbride (1951) que propôs um primeiro modelo empírico para esse processo. Sendo esse detalhado a seguir:

$$h_m \cdot \left(\frac{\mu_L^2}{k_L^2 \rho_L^2 g} \right)^{1/3} = 0.0077 \cdot Re^{0.4} \quad (3.3)$$

Onde:

h_m = Coeficiente médio de troca térmica para condensação de filme turbulento (W/m²C)

μ_L = Viscosidade do líquido (kg/m.s)

Re = Número de Reynolds

k_L = Condutividade Térmica do líquido (W/m.C)

ρ_L = Massa específica do líquido (W/m.C)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

Já o número de Reynolds para esse caso, pode ser descrito como:

$$Re = \frac{4 \cdot M_{vapor}}{\mu_L \cdot D} \quad (3.4)$$

Onde:

M_{vapor} = Vazão do vapor condensado (kg/s)

μ_L = Viscosidade do líquido (kg/ms)

D = Diâmetro do vaso onde ocorre a condensação (m)

É possível, portanto, chegar a uma equação em que se possa calcular a vazão mássica que está condensando na interface líquida-vapor do vaso:

$$Q = A_L h_m (T_{sat} - T_{drum}) \quad (3.5)$$

$$Q = M_{vapor} \lambda_c \quad (3.6)$$

Sendo λ_c o calor latente de condensação, expressa em (Joules/kg). Já A_L representa a área de troca térmica, medida em m². Ao reorganizar as equações (1), (2) (3) e (4), Tundidor (1996) chega a seguinte equação:

$$M_{vapor}^{0.6} = 0.0134 \cdot \left(\frac{k_L}{(\mu_L \cdot D)^{0.4}} \right) \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_L^2}{\mu_L^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{A_L \cdot (T_{SAT} - T_{DRUM})}{\lambda_c} \quad (3.7)$$

Com a área de troca térmica sendo:

$$A_L = L \cdot D \quad (3.8)$$

Portanto, ao analisar a equação (3.5), é possível concluir que há uma dependência do contato líquido-vapor com a área da interface, como também da temperatura do líquido no vaso e das propriedades físicas do condensado. Um ponto a ser analisado é que quando a temperatura do líquido no vaso se iguala com a de saturação, a válvula de desvio deverá estar fechada para manter a pressão constante (CAMPOS; TEIXEIRA,2010).

Tudidor (1996) conclui também que, o vaso do topo desempenha um papel importantíssimo na criação de um modelo *hot gas bypass*, pois ao ter diferentes tamanhos, diferentes quantidades de vapor irão ser necessários para a válvula controlar o sistema. Portanto, é possível dimensionar a válvula *hot gas bypass* com as equações (3.2) e (3.7).

3.4. MODELAGEM DINÂMICA

As equações obtidas no tópico anterior foram utilizadas para modelagem do sistema *hot gas bypass* em estado estacionário nas obras a serem referenciadas nesse trabalho. A visualização em estado dinâmico é de bastante interesse, uma vez que verificar o comportamento da pressão da coluna com o tempo fornece uma conclusão robusta sobre a implementação da válvula no processo.

Dentro do sistema *hot bypass*, é possível definir as pressões da coluna e do vaso através de balanços de massas. Na modelagem dinâmica, se a pressão varia com o tempo, logo, a vazão de líquido condensado também irá variar. Tal variação, é definida como balanço de forças. Campos e Teixeira (2010) levam em consideração a ação de quatro principais forças:

- A força da gravidade distribuída uniformemente em cima da coluna;
- A força devida à parede relacionada ao atrito da movimentação do líquido;
- As forças nos dois extremos da coluna devidas as pressões da coluna e do vaso;
- A massa efetiva do líquido em movimento.

Feito o balanço das forças atuantes, Campos e Teixeira propõem as seguintes equações:

$$(P_{COL} \cdot A_{COND} - P_{DRUM} \cdot A_{TUB} - \rho \cdot A_{TUB} \cdot (Z + \dot{x}_1) \cdot g - F_{ATRITO}) = M_{TOTAL} \cdot \ddot{x} \quad (3.9)$$

$$(P_{COL} \cdot A_{COND} - P_{DRUM} \cdot A_{TUB}) = (A_{TUB} \cdot \Delta P) \quad (3.10)$$

Com:

\dot{x}_1 = Derivada temporal de primeira ordem;

\ddot{x} = Derivada temporal de segunda ordem;

Onde:

$$\Delta P = P_{COL} - P_{DRUM} \quad (3.11)$$

$$F_{ATRITO} = (2\pi \cdot r) \cdot L_{TUB} \tau_0 \quad (3.12)$$

Com τ_0 sendo:

$$\tau_0 = \frac{0.0535 \cdot \rho_L^{0.75} \cdot \mu_L^{0.25} \cdot \dot{x}^{1.75}}{d^{0.25}} \quad (3.13)$$

Já o cálculo da massa de líquido total na tubulação, é dada por:

$$M_{TOTAL} = \rho \cdot (Volume_{COND} + A_{TUB} \cdot L_{TUB}) \approx \rho \cdot A_{TUB} \cdot L_{TUB} \quad (3.14)$$

Linearizando as equações (3.13) e (3.14):

$$\tau_0 \approx \frac{0.0535 \cdot \rho_L^{0.75} \cdot \mu_L^{0.25} \bar{x}^{1.75}}{d^{0.25}} + \frac{0.091 \cdot \rho_L^{0.75} \cdot \mu_L^{0.25} \bar{x}^{0.75} \cdot \dot{x}}{d^{0.25}} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta\tau_0 = \frac{0.091 \cdot \rho_L^{0.75} \cdot \mu_L^{0.25} \bar{x}^{0.75} \cdot \dot{x}}{d^{0.25}}$$

$$\tau_0 = \frac{0.091 \cdot \rho_L^{0.75} \cdot \mu_L^{0.25} \bar{x}^{-0.75} \cdot \dot{x}}{d^{0.25}} = f_t \cdot \dot{x} \quad (3.15)$$

$$\Delta P \cdot A_{TUB} - \rho \cdot A_{TUB} \cdot x \cdot g \cdot (-2\pi \cdot r) \cdot L_{TUB} \cdot f_t \cdot \dot{x} = \rho \cdot A_{TUB} \cdot L_{TUB} \cdot \ddot{x} \quad (3.16)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação acima:

$$\frac{X(s)}{\Delta P(s)} = \frac{\frac{1}{\rho} \cdot g}{\left[\frac{L_{TUB} s^2 + (2\pi \cdot r) L_{TUB} \cdot f_t}{g} \cdot s + 1 \right]} \quad (3.17)$$

Com isso, é possível observar que o sistema dinâmico do *hot gas bypass* representa uma função transferência de segunda ordem, relacionando a variação do nível no condensador para perturbações no diferencial de pressão entre a coluna e o vaso de topo.

Ademais, o coeficiente de amortecimento para esse tipo de situação será dado por:

$$\zeta = \sqrt{\frac{g}{L_{TUB}}} \cdot \frac{(2\pi \cdot r) L_{TUB}}{\rho \cdot g \cdot A_{TUB}} \cdot \frac{0.091 \cdot \rho_L^{0.75} \cdot \mu_L^{0.25} \bar{x}^{0.75}}{d^{0.25}} \quad (3.18)$$

Um ponto a ser observado na equação acima, é que o sistema *hot gas bypass* pode ser subamortecido, quando $\zeta < 1$. Para obter resultados mais satisfatórios, que possuem menos oscilações, é possível ajustar dois parâmetros da equação (3.17), o comprimento da tubulação entre o condensador e o vaso de topo (L_{TUB}) e a velocidade média do líquido que escoar entre o vaso e o condensador (\dot{x}).

Para conseguir uma dinâmica melhor do processo, os autores levaram alguns pontos em consideração:

- A pressão de vapor no condensador foi considerada aproximadamente a pressão de topo na coluna;
- Vapor sendo gás ideal;
- Temperatura do gás é constante;
- A entrada será feita por cima do vaso de topo.

Com isso, é possível ir para os balanços propriamente ditos.

Como mostrado por Campos e Teixeira (2010), a força de atrito será dada por:

$$F_{ATRITO} = (2\pi \cdot r) \cdot L_{TUB} \tau_0 \quad (3.19)$$

Onde:

L_{tub} = Comprimento da tubulação;

R = raio da tubulação;

τ_0 = tensão de cisalhamento que ocorre nas paredes da tubulação.

Para o cálculo da tensão de cisalhamento, Yamaguchi (2008) propõe a seguinte equação:

$$\tau_0 = \frac{f_d \rho \bar{U}^2}{8} \quad (3.20)$$

Sendo:

f_d = Coeficiente de Darcy;

\bar{U} = Velocidade média de escoamento.

Para o cálculo da velocidade, Yamaguchi também objetiva a seguinte equação:

$$\bar{U} = \frac{49}{60} u_{max} \quad (3.21)$$

Haaland (1983), analisou diversos modelos para calcular o fator de Darcy para sistemas de escoamento turbulento, para ele, a equação que melhor representa esse sistema é:

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -1,8 \log_{10} \left[\left(\frac{e}{3,7D_{tub}} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (3.22)$$

Com:

e = Rugosidade na parede do tubo;

D_{tub} = diâmetro da tubulação;

Re = Número de Reynolds.

Já o número de Reynolds, que representa o tipo de escoamento de um fluido, é calculado por:

$$Re = \frac{\rho \bar{U} D}{\mu} \quad (3.23)$$

Onde o μ é tido como a viscosidade dinâmica do fluido e D sendo o diâmetro da tubulação utilizada.

3.5. VASO DE TOPO

Para o vaso de topo terá que ser feito uma análise para cada fase dentro do equipamento, tanto a vapor como a líquida, pois ambas as fases acabam entrando em contato uma com a outra.

3.5.1 BALANÇO DE MASSA-FASE LÍQUIDA

Pelas entradas e saída do vaso de topo, o balanço de massa será dado por:

$$\frac{dV_{liq}}{dt} = \frac{\dot{m}}{\rho} + \frac{\dot{m}_{cond}}{\rho} - \frac{\dot{m}_3}{\rho} \quad (3.24)$$

Onde:

\dot{m}_{cond} = Vazão mássica que se condensa no vaso de topo;

V_{liq} = Volume do líquido no vaso de topo;

\dot{m} = Vazão massa que sai do condensador para o vaso de topo.

3.5.2 BALANÇO DE MASSA-FASE VAPOR

Analogamente ao tópico passado, o balanço molar da fase vapor é dado por:

$$\frac{dn_v}{dt} = \dot{n} - \dot{n}_{cond} = \frac{\dot{m}}{\bar{M}} - \frac{\dot{m}_{cond}}{\bar{M}} \quad (3.25)$$

Onde:

\dot{n} = Vazão molar que entra no vaso de topo;

\dot{n}_{cond} = Vazão molar que se condensa no vaso de topo;

n_v = Número de mols na fase vapor no vaso de topo.

Como abordado anteriormente, tratando de vapor ideal, pode-se então utilizar a equação dos gases ideais:

$$n_v = \frac{PV}{T_{sat}R} \quad (3.26)$$

Como o volume do sistema não será constante:

$$V = \frac{D_t^2 \pi}{4} \cdot L_t - V_{liq} \quad (3.27)$$

Com:

V = Volume da fase vapor;

L_t = diâmetro do tubo;

L_t = Comprimento do vaso de topo.

Aplicando a derivada com relação ao número de mols pelo tempo e substituindo as equações (3.26) e (3.27) na derivada, temos que:

$$\frac{d}{dt}(P) = \left(\frac{1}{\frac{D_{t\pi}^2}{4} \cdot L_t - V_{liq}} \right) \left[\frac{P}{\rho} (\dot{m} + \dot{m}_{cond} - \dot{m}_3) + \frac{RT_{sat}}{M} (\dot{m} - \dot{m}_{cond}) \right] \quad (3.28)$$

3.5.3 BALANÇO DE ENERGIA

Para o balanço de energia, Souza (2010) propôs uma correlação para calcular a troca térmica envolvida no processo, sendo essa:

$$\dot{m}_2 = \frac{h_{drum} A_{drum} (T_{sat} - T_1)}{\lambda} \quad (3.29)$$

Sendo:

h_{drum} = Coeficiente de troca térmica;

A_{drum} = Seção transversal do vaso de topo.

Souza (2010) também propôs uma equação, através do balanço global, para o cálculo do coeficiente de troca térmica nessas situações, sendo calculado por:

$$h_{drum} = 0.292 Re_{liq}^{0.286} \cdot Re_{gas}^{-0.017} \quad (3.30)$$

3.6 CONDENSADOR

Para o equacionamento do condensador, as tubulações onde o vapor escoia também será levada em consideração, pois assim será possível descrever mais corretamente o transporte.

3.6.1 BALANÇO DE MASSA-FASE LÍQUIDA

Como o nível ocupado no condensador é uma variável de suma importância, pode-se relacionar o mesmo com o deslocamento de líquido na tubulação, portanto:

$$\dot{x}_1 = \frac{\dot{m}_1}{A_{ef_{cond}} \rho} + \frac{A_{tub}}{A_{ef_{cond}}} \cdot \frac{dx_{tub}}{dt} \quad (3.31)$$

Com $A_{ef_{cond}}$ representando a área da seção efetiva do condensador, tal variável representa a quantidade de espaço disponível para ser ocupada pelo líquido, sendo calculada pela seguinte equação:

$$A_{ef_{cond}} = C_f A_{cond} \quad (3.32)$$

Onde:

C_f = Coeficiente de correção necessária;

A_{cond} = Seção transversal do condensador.

3.6.2 BALANÇO DE MASSA-FASE VAPOR

Já para a fase vapor, como a vazão mássica que sai do topo da coluna, será dividida entre a corrente que vai para o condensador e a que passará pelo by-pass, temos que:

$$\frac{dP_1}{dt} = (\dot{m}_1 - \dot{m}_{1,cond}) \frac{RT_{sat}}{\bar{M}V_{1,vapor}} \quad (3.33)$$

Sendo:

$\dot{m}_{1,cond}$ = taxa mássica de condensação do vapor [kg/s];

T_{sat} = temperatura de saturação [K];

\bar{M} = massa molar[kg/mol];

$V_{1,vapor}$ = volume ocupado[m³];

R = constante dos gases ideais [Pa.m³/(mol. K)]

4. METODOLOGIA

Os estudos desse trabalho partem de uma reavaliação literária. De acordo com Gil (2002), por pesquisa literária entende-se a leitura, a análise e a interpretação do material em questão.

4.1. ESTUDO UTILIZADO

1ª Etapa - Fontes

Para as análises do tema abordado, foram definidos alguns critérios de busca e de estudo.

Dentro da literatura, foi filtrado somente artigos e estudos que abordassem análises referente a modelagem e comentários acerca de modelagem e simulação de válvulas por *hot gas bypass* em uma coluna de destilação. As buscas eram feitas por palavras chaves, como “Válvula hot gas bypass em colunas de destilação” e “Controle de válvula hot gas bypass em colunas de destilação”. Além disso, as buscas foram feitas através da ferramenta Google Acadêmico, onde foi possível utilizar as palavras chaves citadas e obter uma busca mais assertiva.

Com as palavras chaves e os filtros definidos, foi possível adicionar mais um critério de busca, para tornar o estudo mais preciso. Dentre os estudos aqui utilizados, foi verificada as fontes do mesmo, afim de procurar por possíveis fontes comuns entre os artigos, tendo assim, uma fonte amplamente estudada e comprovada.

Entretanto, durante as pesquisas, ainda assim era possível observar artigos em que não se encaixavam nos filtros previamente estabelecidos, sendo assim necessário, criar critérios de exclusão para evitar possíveis erros de dados. Dentre os critérios de exclusão, foi definido que qualquer artigo em que a válvula em questão, não era especificamente para uma coluna de destilação, estaria fora do estudo, pois fugiria do tema estudado.

2ª Etapa - Coleta de Dados

Para a coleta das informações, foi utilizada as premissas abordadas por Gil (2002):

Pesquisa Exploratória de todo o material filtrado, que objetiva conferir realmente se a obra consultada é interessante para o trabalho;

Pesquisa Descritiva, onde tem-se um estudo mais aprofundado da obra;

Pesquisas Explicativas, onde é possível registrar as informações em instrumento específico (autores, resultados e conclusões).

3ª Etapa - Análise e Intepretação dos Resultados

Durante essa etapa, tem-se uma leitura análise em prol de sumariar as informações obtidas de todas as fontes analisadas, de forma que seja possível obter respostas ao problema analisado.

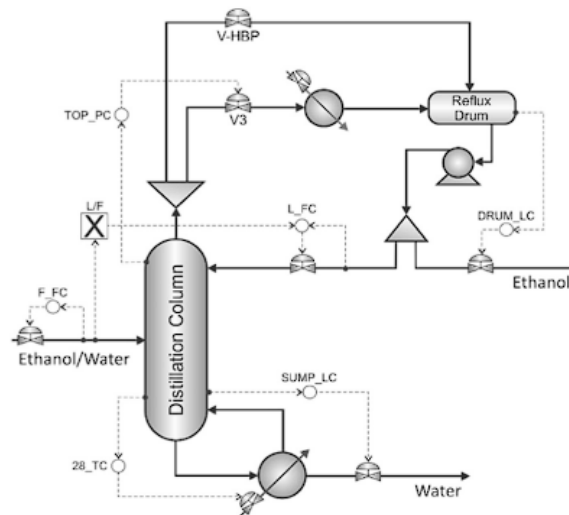
4ª Etapa - Discussão dos Resultados

Pontos que surgiram na etapa anterior foram analisadas e discutidas conforme a problemática abordada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para CIANNELLA et al. (2018), uma das melhores configurações básicas (sem integração energética e reciclo) em que o uso da válvula de hot-gas bypass pode ser aplicado, é mostrado na figura a seguir:

Figura 5.1 Estrutura sugerida



Fonte: Ciannella *et al* (2018).

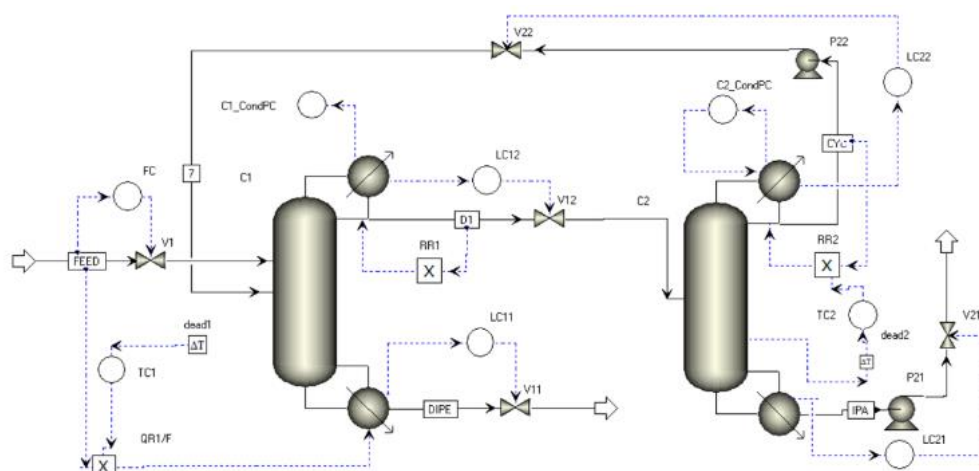
A manipulação da válvula nessa estrutura, envolve a vazão de vapor direcionada para o condensador. Como justificativa, o autor apresenta que essa configuração possui um controle mais simples, pois caso o controle seja feito através da válvula V-HBP, o sistema se tornará muito complexo para ser controlado, uma vez que esse controle iria passar por um sistema multivariável, no qual existem interações entre cada malha de controle proposta, dificultando o controle.

Nesse contexto Li et al., (2016) estudou um processo de destilação projetado para separar um azeótropo de ebulição máxima de EDA/água usando PSD (Pressure Swing Distillation). Foram conduzidas simulações rigorosas em estado estacionário e dinâmico. A simulação em estado estacionário foi realizada para determinar as condições ótimas em estado estacionário. Com essas condições, a concentração de água no fundo do LPC é fixada em 3 mol% acima da composição do azeótropo em sua pressão. Os resultados mostraram que o processo com integração térmica parcial é economicamente mais vantajoso, com economia de energia de 19,79% e redução de custos de 15,30%.

Diferentes estruturas de controle, tanto básicas quanto aprimoradas, foram comparadas para o sistema de destilação por variação de pressão parcialmente integrado ao calor. A estrutura de controle aprimorada mostrou um desempenho superior em termos de eficácia de controle. Adicionar um bloco de controle de proporção ajudou a reduzir as flutuações de pureza no produto HPC e o controle dinâmico permaneceu dentro de limites aceitáveis.

Nesse sentido, Luo *et al.*, (2015) em seu estudo, investigou dois métodos para a separação de misturas azeotrópicas de éter di-isopropílico e álcool isopropílico que foram: destilação extrativa e destilação por variação de pressão totalmente integrada ao calor. O sistema de destilação por variação de pressão totalmente integrada ao calor foi explorado e foi revelada uma redução de custos anual e total e o consumo de energia em relação à destilação extrativa em 5,75% e 7,97%, respectivamente. Foram propostas duas estruturas de controle para as configurações ótimas de destilação extrativa e destilação por variação de pressão totalmente integrada ao calor, respectivamente. O processo de destilação extrativa demonstra um melhor controle na manutenção da pureza dos dois produtos em caso de perturbações na taxa de alimentação, enquanto o processo de destilação por variação de pressão totalmente integrada ao calor mostra um melhor controle na manutenção da pureza dos dois produtos em caso de perturbações na composição da alimentação. A figura 6 apresenta o fluxograma obtido pelo autor para simulação do sistema de destilação com recuperação de calor no programa Aspen Plus.

Figura 5.2- PFD para o sistema com recuperação de calor.



Fonte: Luo *et al.*, (2015)

A partir da figura 5.2, é possível observar o sistema de encanamento e os tamanhos dos principais equipamentos são especificados de acordo com os critérios mencionados no artigo. Assim como o ponto adequado de controle de temperatura para as duas colunas. Os controladores proporcional-integral foram ajustados por meio de um teste de feedback de relé usando as configurações de Tyreus-Luyben. Devido ao fato de que as duas colunas estão completamente integradas termicamente, a função "equações de folha de cálculo" foi usada para alcançar a integração completa de calor no Aspen Dynamics. As duas variáveis que devem ser alteradas de "Fixo" para "Livre" são o calor no condensador da coluna de alta pressão e o calor no reboiler da coluna de baixa pressão. Por fim foi visto que ambos os processos podem ser aplicados à separação do ponto de vista da estabilidade de controle dinâmico (LUO *et al.*, 2015)

Nessa conjuntura, Patrascu (2017) o autor discute o desenvolvimento de uma estrutura de controle eficiente para um processo de desidratação de bioetanol assistido por bomba de calor e destilação com parede divisória. A segurança do processo é alcançada através do controle de níveis de líquido e pressões, com modificações na simulação dinâmica para lidar com desafios de estabilidade. A necessidade de controle adequado é destacada, incluindo a adição de um dever na última etapa da coluna PDC para equilibrar o fluxo de vapor. O refinamento da estrutura de controle visa melhorar a estabilidade do sistema e a qualidade dos produtos, superando desafios práticos na medição do fluxo de vapor e no aquecimento/resfriamento dos trocadores de calor.

Em seu estudo, Patrascu (2017) demonstrou tanto os benefícios econômicos que são possíveis ao se utilizar um sistema de destilação altamente integrado e apresenta os desafios relacionados à dinâmica do processo e ao controle desse sistema.

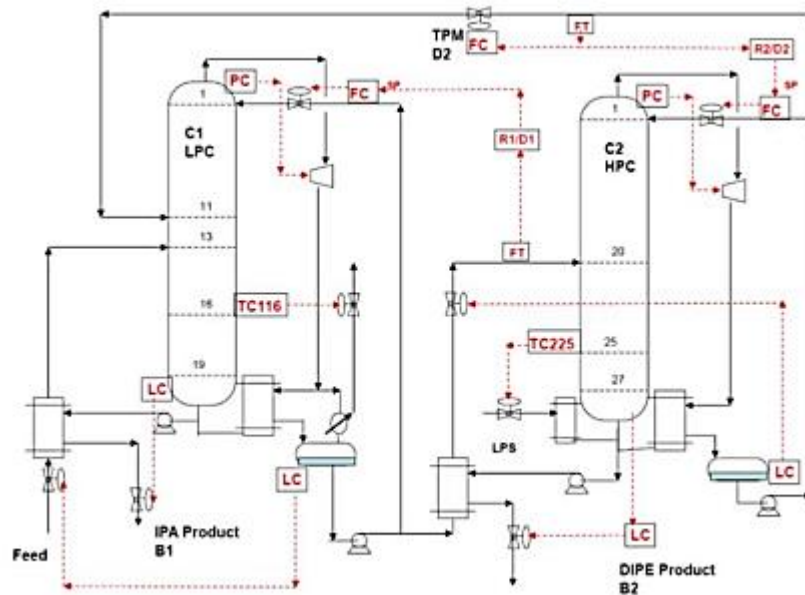
Após mostrar as dificuldades de controle associadas ao design original devido ao desequilíbrio térmico, uma estrutura de controle eficiente foi proposta, que introduziu um desvio e uma corrente adicional de carga externa para o reboiler lateral. A faixa de carga externa é relativamente pequena, cerca de 5% da carga combinada dos reboilers, mas foi suficiente para estabilizar o sistema controlando a temperatura no lado de pré-concentração da coluna.

Dois loops de controle de qualidade garantem a pureza do produto quando o sistema é afetado por perturbações na taxa de alimentação e na composição. Os processos integrados que combinam recompressão de vapor com a tecnologia de coluna de parede divisória têm mais interações de variáveis e menos graus de liberdade em comparação com sistemas DWC clássicos. Por fim foi comprovada a viabilidade do controle da coluna da parede divisória extrativa assistida por recompressão de vapor.

Com relação a isso, Luyben (2017) realizou um estudo acerca da destilação por variação de pressão utilizada para separar azeótropos de ebulição mínima quando a composição do azeótropo tem uma dependência significativa da pressão. O exemplo numérico estudado por envolve a separação de éter diisopropílico (DIPE) e álcool isopropílico (IPA), como a composição desses azeótropos varia com a pressão é possível o uso econômico da destilação de variação de pressão para obter produtos de alta pureza. O estudo utiliza simulações estáticas e dinâmicas com propriedades físicas do modelo NRTL. O processo de destilação de variação de pressão com recompressão de vapor é representado por um diagrama de fluxo, onde as colunas são alimentadas com composições de DIPE e IPA, e os produtos de alta pureza são obtidos. A energia necessária para o processo é fornecida por compressores e trocadores de calor, resultando em uma redução significativa no consumo de energia em comparação com um processo anterior.

Para obtenção dos resultados as simulações foram feitas no programa *Aspen plus* e *Aspen Dynamics*, das duas colunas que operam em diferentes pressões, com correntes de destilado tendo composições próximas aos seus respectivos azeótropos. A integração de calor foi utilizada, uma vez que as temperaturas das colunas são suficientemente diferentes para permitir a transferência de calor. A inovação para o processo foi a utilização da recompressão de vapor em ambas as colunas. O estudo desenvolveu uma rede complexa de trocadores de calor juntamente com o projeto das duas colunas (LUYBEN 2017). A figura 5.3 apresenta o PFD obtido em seu trabalho.

Figura 5.3- PFD para o sistema de destilação.



Fonte: Luyben (2017)

O autor também aborda a questão da sensibilidade de sistemas de processos com reciclagens a pequenas alterações na vazão que podem causar grandes mudanças nas taxas de reciclagem, conhecido como o fenômeno de "efeito bola de neve". O controle de sistemas de destilação de variação de pressão, com ou sem integração de calor, é discutido, mencionando a necessidade de uma estrutura de controle apropriada para evitar o efeito bola de neve. A estrutura de controle proposta envolve o controle de vazão de reciclagem e utiliza a vazão de alimentação fresca para controlar o nível no tambor de refluxo da primeira coluna. Várias variáveis de processo são controladas, incluindo níveis, pressões e temperaturas. Os resultados de simulações mostram que essa estrutura de controle proporciona um controle robusto, mesmo diante de grandes perturbações na vazão e na composição da alimentação. O texto também explora as respostas do sistema a alterações na vazão e na composição da alimentação (LUYBEN 2017).

Por fim Xia *et al.*, (2017) o autor descreve a aplicação de um processo de destilação para separar uma mistura de IPA (isopropanol) e DIPE (diisopropil éter), que é amplamente usado como intermediário químico e solvente na indústria farmacêutica. É destaca que a produção de IPA geralmente envolve a hidratação do propileno, com DIPE como coproduto, mas há um desafio devido à formação de um azeótropo homogêneo mínimo de ebulição binário entre IPA e DIPE. Para superar esse desafio, eles propõem o uso do processo de destilação por sequência de pressão variável (PSD) com tecnologia de recuperação de calor (SHRT) para economizar energia.

O autor utiliza simulador para simular o processo PSD de separação da mistura de IPA e DIPE. Eles selecionam o modelo de propriedade NRTL para descrever a não idealidade do equilíbrio vapor-líquido neste sistema. O ponto-chave do processo PSD é determinar uma pressão de operação razoável para as duas colunas de destilação. Para permitir o uso de água de resfriamento no condensador, eles fixam a pressão de operação do condensador de baixa pressão (LPC) em 1 atm., no entanto, para a coluna de alta pressão (HPC), a pressão de operação deve variar de forma significativa para alcançar uma composição de azeótropo desejada. Com base nessa mudança significativa, o autor define as pressões de operação do LPC e HPC em 1 atm e 4 atm, respectivamente. Essas escolhas visam otimizar o processo de separação e economizar energia (XIA *et al.*, 2017).

Comparado ao processo PSD convencional, o SHR-PSD economiza significativamente a energia, reduzindo o consumo em 72,39%. Em comparação com o processo FHIPSD, a economia de energia ainda é substancial, com uma redução de 53,06%. O SHR-PSD também oferece economias notáveis no Custo Anual de Operação (AOC), sendo 70% menor que o PSD e 48,66% menor que o FHIPSD. Destacando-se não apenas pela economia de energia, mas também pelo desempenho ambiental aprimorado (XIA *et al.*, 2017).

6. CONCLUSÃO

Ao final do trabalho foi possível observar que os autores estudados conseguiram desenvolver expressões que explicam e permitem resolver os balanços de massa e energia dentro do tambor de refluxo, suposições foram feitas na análise, incluindo o uso de fórmulas de estado estacionário em uma situação transiente, o uso de equações turbulentas na análise e o reconhecimento de que a equação diferencial não linear não tem uma solução analítica. Para a otimização das condições de operação das torres de destilação usadas para diferentes misturas e utilizando o método de *hot gas-bypass*, a maioria dos autores utilizaram simuladores para avaliação dinâmica do processo. Para avaliarem o controle do processo foram realizadas simulações com diferentes distúrbios e diferentes variáveis resposta.

Para os autores, também foi possível com base em dados de planta extensivos disponíveis para as torres prever o coeficiente de transferência de calor dentro do tambor de refluxo como uma função do número de Reynolds das fases líquida e gasosa. Foi demonstrado que a taxa de fluxo de gás de alimentação calculada pela equação é muito conservadora, levando a um superdimensionamento excessivo do sistema de gás, uma vez que o vaso é projetado como um equipamento hidráulico e não como um equipamento de transferência de calor. Por fim, é importante observar que o resfriamento excessivo pode causar sérios problemas de estabilidade de pressão na torre.

Nesse contexto, alguns pontos importantes podem ser tiradas da avaliação do método de *hot gas-bypass* incluindo a importância do tamanho e da temperatura sub-resfriada do líquido no tambor superior, a não equilíbrio dos líquidos no tambor superior e na saída do condensador com o vapor, a importância da queda de pressão ao longo do tubo e da carcaça do condensador como parâmetro importante e a necessidade de examinar o sistema de desvio de vapor quente em sua capacidade mínima requerida, bem como na capacidade nominal, devido à diferença de resposta subamortecida. Essas observações destacam as complexidades do processo de desvio de vapor quente e enfatizam a importância de considerar várias variáveis e parâmetros ao projetar e operar esse tipo de sistema.

Ao avaliar os trabalhos que utilizaram esse método para simulação de seus dados, foi visto que ao valer-se do método estudado foi notória a economia energética em todos os trabalhos e também a consistência com que os autores conseguiram controlar e manter operando a coluna com a aplicação desse método de otimização principalmente de energia, visto que as composições de saída conseguem se manter próximas ao estado estacionário que seria o ideal para o processo.

O trabalho revela a importância e a versatilidade desse processo no campo da engenharia de refrigeração e climatização. O *hot gas-bypass* desempenha um papel fundamental na otimização do desempenho dos sistemas de refrigeração, melhorando a eficiência energética, a capacidade de resfriamento e a confiabilidade operacional. Esta técnica oferece uma solução eficaz para lidar com uma variedade de desafios, como picos de carga, flutuações de temperatura e requisitos de controle precisos.

A revisão demonstra que o *hot gas-bypass* não é apenas uma solução temporária, mas uma estratégia de longo prazo para melhorar o funcionamento de sistemas. Em resumo, destaca-se a importância dessa técnica como uma ferramenta valiosa na busca por sistemas de refrigeração mais eficientes, econômicos e sustentáveis. À medida que a indústria continua a inovar e aprimorar o *hot gas-bypass*, podemos esperar que essa abordagem continue desempenhando um papel central na melhoria dos sistemas de refrigeração e climatização em todo o mundo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LI, L. et al. Comparison of different extractive distillation processes for 2-methoxyethanol/toluene separation: design and control of computers and Chemical Engineering (2017).
- HUI, X., et al. A novel energy-saving pressure swing distillation process based on self-heat recuperation technology, Energy (2017).
- HAOTAO, L. et al. Comparison of Pressure-Swing Distillation and Extractive Distillation Methods for Isopropyl Alcohol/Diisopropyl Ether Separation (2014).
- CIANNELLA, S. et al. Using hot-vapor bypass for pressure control in distillation columns. **The Chemical Industry and Engineering Society of China, and Chemical Industry Press.**, Chinese Journal of Chemical Engineering, p. 144-151, 2017
- DURAND, A. Sizing hot-vapors bypass valve. New York, p.111-112, 1980.
- TEIXEIRA, H.C.G. The hot-vapor bypass pressure control of distillation column: a design review. *Projetos de Refino, Gás e Energia (PRGE)*, 2010.
- KISTER, H. DISTILLATION: Diagnosing Instabilities In the Column Overhead. AICHE, 2003.
- RUI, L. et al. Heat-Integrated Pressure-Swing Distillation Process for Separation of a Maximum-Boiling Azeotrope Ethylenediamine/Water. *The Institution of Chemical Engineers*, p. 1-15, 2015.
- PATRASCU, L. et al. Dynamics and control of a heat pump assisted extractive dividing-wall column for bioethanol dehydration. *Chemical Engineering Research and Design*. University "Politehnica" of Bucharest, p. 1-7, 2016.

STOLEY, A. Effectively control column pressure. The distillation group. 2001.

LUYBEN, W. Design and Control of a Pressure-Swing Distillation Process with Vapor Recompression. Chemical Engineering and Processing, 2017.

LUTBEN, W. Comparison of a conventional two-column demethanizer/deethanizer configuration requiring refrigerated condensers with a nonconventional column/rectifier configuration. J Chem Technol Biotechnol, p. 1688–1696, 2015.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa, 4ª edição. Editora atlas S.A, São Paulo, 2002.

TUNDIDOR, M.A. Modelo para cálculo do “hot bypass”. Unpublished report. Revisão 0. Petrobrás/CENPES, 1996.

CHIN, T. G. Guide to distillation pressure control methods. Hydrocarbon Processing, p. 145-153, 1979.

SOUZA, L. L. G. Model devised for plant hot-gas bypass systems. Oil & Gas Journal, v. 108, n. 33, 2010.

MAURICIO-IGLESIAS, M. et al. Pressure Control in Distillation Columns: A Model-Based Analysis. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 53, n. 38, p. 14776–14787, 24 set. 2014.

KIRKBRIDE, C. G.: Heat Transfer by Condensing Vapors, 1951.