

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Unidades processuais

Colunas de Absorção



Projeto FEUP 2024/25 - Licenciatura em Engenharia Química

Coordenação

Geral: Manuel Firmino e Sara Ferreira

De curso: Fernão Magalhães

Equipa: L.EQ01_PF_T03

Supervisor: Vera Homem

Monitor: Rafael Carneiro

Estudantes & Autores

Marta Barbosa up202404644@up.pt

Inês Laranjeira up202407601@up.pt

Daniela Soares up202406449@up.pt

André Gomes up202407067@up.pt

Gonçalo Vales up202406525@up.pt

Gabriel Fioroto up202406170@up.pt

Pedro Magalhães up202406177@up.pt

9 de Dezembro de 2024

Resumo

Este relatório foi realizado no âmbito da Unidade Curricular Projeto FEUP, focando-se na Unidade Processual de colunas de absorção.

Inicialmente, é possível compreender que as colunas funcionam com o objetivo da remoção de um gás de uma corrente gasosa por absorção do mesmo para um solvente (no caso, uma corrente líquida) e isto é possível dado a diversos processos físico-químicos que serão abordados no trabalho.

As colunas são amplamente utilizadas para processos industriais, como pode ser verificado por exemplo na remoção de poluentes atmosféricos, ou até mesmo a produção de misturas. Além disso, diferentes usos requerem diferentes estruturas, havendo então diferentes tipologias de colunas, como a de pratos, enchimento, bolhas e spray. Cada uma possui vantagens e desvantagens resultantes dos seus diferentes modos de operação.

Após análise, concluiu-se que as colunas de pratos eram as mais indicadas, tendo havido um estudo mais aprofundado das suas características, propriedades e condições de funcionamento. Com este estudo tornou-se possível apresentar a purificação de biogás, como um exemplo da aplicação das colunas de pratos (no caso particular da absorção) na indústria.

Por fim, foi integrado o tópico dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), nomeadamente para as questões ambientais nas quais as colunas de absorção podem ser úteis.

Palavras-Chave: Coluna, Absorção, Fluxo, Solubilidade

Agradecimentos

Agradecemos aos palestrantes do projeto FEUP que nos ajudaram a solidificar as nossas bases sobre os métodos de apresentação, de preparação de relatórios e de citação e referências, o que ajudou na formulação de todo o nosso trabalho. Além disso, agradecemos ao nosso monitor Rafael Carneiro e à nossa professora Vera Homem por nos auxiliarem, esclarecendo as nossas dúvidas e acompanhando o nosso processo.

Índice

Lista de Figuras.....	I
1. Introdução.....	1
2. Colunas de absorção.....	2
2.1 Como funcionam?.....	2
2.2 Fatores a ter em consideração para uma absorção eficiente.....	2
2.2.1 Solubilidade do soluto.....	3
3. Processos físico-químicos envolvidos.....	4
4. Exemplos industriais.....	5
4.1. Produção de misturas.....	5
4.2. Absorção de NO _x na produção de HNO ₃	5
4.3. Minimizar os poluentes atmosféricos.....	5
4.4. Recuperação de compostos.....	6
5. Diferentes tipologias de colunas de absorção: vantagens e desvantagens.....	6
5.1. Colunas de Pratos.....	6
Sieve Plate/Placa Perfurada:.....	7
Valve-Plates (de tampa amovível):.....	8
Valve-Plates (de tampa fixa):.....	8
Bubble-Cap Plates:.....	9
Dualflow trays:.....	9
5.5.1 Vantagens e desvantagens:.....	9
5.2. Colunas de Enchimento.....	10
Tipos de Enchimento:.....	11
Disposição Aleatória:.....	11
Disposição Organizada:.....	11
5.2.1. Vantagens e Desvantagens:.....	12
5.3. Colunas de Bolhas.....	12
5.3.1. Vantagens e Desvantagens:.....	13
5.4. Coluna de Spray.....	13
5.4.1 Desvantagens:.....	13
6. Fatores que influenciam a eficiência da coluna de absorção de pratos.....	14
6.1. Características da estrutura da coluna.....	14
6.2. Propriedades das fases envolvidas.....	14
6.3. Condições operacionais.....	15
7. Aplicação prática da coluna de pratos na indústria.....	16
7.1. Purificação de biogás.....	16
8. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	17
9. Conclusões.....	18
10. Referências bibliográficas.....	19

Lista de Figuras

Figura 1: Figura Ilustrativa de uma coluna de absorção de fluxo contracorrente (De Haan e Hans, 2013).

Figura 2: Figura indicadora dos solventes mais adequados de acordo com o soluto, e do tipo de absorção (Assis, 2021).

Figura 3: Desenho ilustrativo do funcionamento de uma coluna de pratos (Haan e Hans, 2013).

Figura 4: Desenho ilustrativo do fluxo das correntes (Haan e Hans, 2013).

Figura 5: (a) Fotografia de uma *Sieve Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de uma *sieve plate* em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Figura 6: (a) Fotografia de uma *Valve-Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de uma tampa amovível em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Figura 7: (a) Fotografia de uma *Valve-Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de uma tampa fixa em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Figura 8: (a) Fotografia de uma *Bubble-Cap Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de um *bubble cap* em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Figura 9: Figura de um modelo de *Dualflow trays* (Kleiber, 2016).

Figura 10: Desenho esquemático da coluna de enchimento (Haan e Hans, 2013).

Figura 11: Alguns modelos de enchimento aleatório (aneis de *Raschig*, aneis de *Pall* e *ENVIPAC*) (Kleiber, 2016).

Figura 12: (a) Modelo de um enchimento estruturado (*Super Mellapack*) (Kleiber, 2016); (b) Desenho ilustrativo de um modelo de enchimento estruturado (Sinnott, Towler, 2020).

Figura 13: Desenho esquemático de coluna de bolhas (Haan e Hans, 2013).

Figura 14: Desenho esquemático de coluna de *spray* (Haan e Hans, 2013).

Figura 15: Desenho exemplar coluna utilizada na purificação do biogás (Iago Santos, 2019).

1. Introdução

Este projeto foi realizado no âmbito da Unidade Curricular de Projeto FEUP, tendo sido desenvolvido por 7 alunos pertencentes à equipa 1 da turma 3, do primeiro ano de licenciatura em Engenharia Química, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Foi proposto realizar uma pesquisa no tópico de Unidades Processuais, mais concretamente sobre Colunas de Absorção.

Inicia-se com uma breve explicação do funcionamento base de uma coluna de absorção, elucidando também sobre os fatores que influenciam a operação. Posteriormente, analisam-se os processos físico-químicos por detrás do processo.

Como complemento, foram fornecidos exemplos industriais, com a finalidade de trazer para a realidade quotidiana esta unidade, vendo assim a relevância e utilidade da mesma.

Numa abordagem mais aprofundada, foram referidas diferentes tipologias, o seu funcionamento base e possíveis vantagens e desvantagens de cada uma. Tendo em conta os prós e contras das diferentes tipologias, foi selecionada a coluna de pratos. Sobre este modelo, estudou-se os custos associados e os fatores que influenciam a sua eficiência.

Este relatório torna possível a compreensão geral deste tipo de processo de separação para qualquer indivíduo interessado nos diferentes tópicos relacionados com a Engenharia Química.

2. Colunas de absorção

Nas colunas de absorção, ocorre a remoção por absorção de um gás existente numa corrente gasosa para uma líquida (Felippe 2020; Bastos s.d.).

Para compreender o processo base do funcionamento desta coluna, é necessário saber que a absorção do gás ocorre quando a mistura gasosa entra em contacto com um líquido pobre nesse componente, promovendo a sua dissolução da fase gasosa para a fase líquida. Deste modo, também se pode afirmar que existe transferência de massa no mesmo sentido (Marczewski, 2013; Pires, 2021; Breslyn, 2021)

2.1 Como funcionam?

A entrada da componente gasosa ocorre na base da coluna, enquanto a da componente líquida é no topo (Figura 1). Ao entrar, as duas fases estarão em contacto na zona intermédia da coluna, permitindo que o vapor a remover sofra absorção para a fase líquida, que tem uma concentração muito baixa do mesmo. Cada extremidade da coluna tem dois locais de contacto com o exterior: na base, a zona de entrada do gás e saída do líquido; e no topo, a zona de entrada do líquido e de saída do gás (Felippe, 2020; Bastos, s.d.).

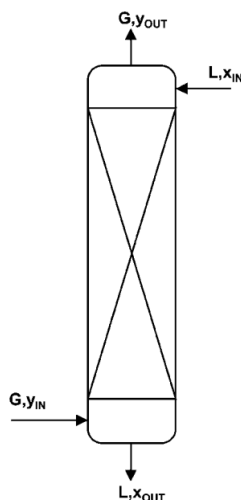


Figura 1: Figura Ilustrativa de uma coluna de absorção de fluxo contracorrente (De Haan e Hans, 2013).

2.2 Fatores a ter em consideração para uma absorção eficiente

Na explicação do funcionamento da coluna, foi mencionado que a zona de entrada era oposta à zona de saída. Uma vez que os líquidos, que são de maior densidade, têm tendência natural para terem movimentos descendentes, e os gases, que são de menor densidade, têm uma tendência para terem movimentos ascendentes, as zonas de entrada serem opostas, e assim específicas, permite aproveitar os movimentos naturais das fases, de modo a que não seja necessário gastar energia para provocar a movimentação das mesmas. Não só, o movimento contracorrente das fases

permite que haja um gradiente de concentração mais considerativo e prolongado do que se veria num movimento concorrente (a concentração do gás a remover há de ser sempre maior na fase gasosa do que na líquida) entre os componentes (favorecendo a absorção deste gás na corrente líquida de forma contínua) (Felippe, 2020).

A zona intermédia tem como objetivo proporcionar a maior área de contacto possível entre as duas fases. Deste modo, existem diferentes tipos de colunas, dependendo de que processo as mesmas usam para maximizar esta área. Também se verifica o mesmo objetivo na maneira de inserção do líquido, que irá influenciar a quantidade do mesmo que entra em contacto com o gás e a corrente gasosa (Bastos, s.d.).

A altura e o diâmetro da coluna têm influência no tempo de contacto entre as fases e também na velocidade de movimentação das mesmas. A coluna deve possuir um diâmetro suficientemente grande para que a velocidade das fases não seja maior que a velocidade de absorção das partículas gasosas (Ferreira, Silva e Bites, 2021).

A escolha do líquido nestes processos está dependente do gás a remover. Isto é, nem todos os líquidos vão ter afinidade para o mesmo componente a separar da corrente gasosa, sendo necessário escolher o mais adequado, o qual tornará o processo de absorção mais eficiente, com mínimo gasto de energia e custos, mas, no entanto, máxima remoção do gás condensável.

Então, algumas características que o solvente deve ter são (Andrade e Lopes, 2024/2025):

- Alta solubilidade do soluto;
- Baixa pressão de vapor: o gás precisa de ter grande tendência a se condensar para ser absorvido pelo solvente; no entanto, este deve ter dificuldade a passar para o estado gasoso, uma vez que isso impediria a ocorrência do processo;
- Baixa viscosidade: para permitir uma fácil limpeza;
- Não deve ser tóxico, inflamável ou corrosivo, e barato: permite um processo mais seguro e fácil.

Outros fatores a ter em atenção nestas colunas são o tipo de material que as constituem. Como observado abaixo, às vezes o solvente utilizado é a água, o que pode promover a corrosão da coluna, ou também poderá ser necessário trabalhar a pressões/temperaturas mais elevadas. Assim, é necessário utilizar materiais que sejam resistentes, como metal, ligas metálicas, cerâmica, vidro ou plástico (Felippe, 2020).

2.2.1 Solubilidade do soluto

Se a fase gasosa contiver acetona, o líquido indicado a usar é a água. Isto porque, o soluto, a acetona, dissolve-se com maior facilidade quando o solvente é a água. Já se o gás a remover for o dióxido de carbono, o solvente mais adequado é uma solução aquosa de hidróxido de sódio, uma vez que o CO_2 condensa-se com maior facilidade nesta solução (Assis, 2021). (Figura 2)

EXTRAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO E ABSORÇÃO GASOSA		
Table 6.1 Representative Commercial Applications of Absorption		
Solute	Absorbent	Type of Absorption
Acetone	Water	Physical
Acrylonitrile	Water	Physical
Ammonia	Water	Physical
Ethanol	Water	Physical
Formaldehyde	Water	Physical
Hydrochloric acid	Water	Physical
Hydrofluoric acid	Water	Physical
Sulfur dioxide	Water	Physical
Sulfur trioxide	Water	Physical
Benzene and toluene	Hydrocarbon oil	Physical
Butadiene	Hydrocarbon oil	Physical
Butanes and propane	Hydrocarbon oil	Physical
Naphthalene	Hydrocarbon oil	Physical
Carbon dioxide	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrochloric acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrocyanic acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrofluoric acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrogen sulfide	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Chlorine	Water	Reversible chemical
Carbon monoxide	Aq. cuprous ammonium salts	Reversible chemical
CO ₂ and H ₂ S	Aq. monoethanolamine (MEA) or diethanolamine (DEA)	Reversible chemical
CO ₂ and H ₂ S	Diethyleneglycol (DEG) or triethyleneglycol (TEG)	Reversible chemical
Nitrogen oxides	Water	Reversible chemical

Figura 2: Figura indicadora dos solvente mais adequados de acordo com o soluto, e do tipo de absorção (Assis, 2021).

3. Processos físico-químicos envolvidos

Nas colunas de absorção, tanto a entrada como a saída das correntes gasosas e líquidas dá-se de maneira contínua. O fluxo entre elas é denominado contracorrente, uma vez que as correntes movimentam-se em sentidos opostos (ascendente para a corrente gasosa, e descendente para a corrente líquida). Este sentido de fluxo mostra-se como sendo extremamente relevante: os movimentos em sentido oposto permitem que haja constantemente um gradiente de concentração entre as duas fases, o que significa que haverá sempre absorção do gás a remover para a fase líquida ao longo da coluna (Mendes, Almeida e Magalhães, 2007).

Assim, podem ser observadas diferentes operações unitárias:

- Absorção: Verifica-se quando o gás a remover entra em contacto com a fase líquida, sendo nela dissolvido (Assis, 2021);
- Transferência de massa: Verifica-se no processo de dissolução do gás no líquido. É considerada bastante eficaz uma vez que permite uma maior e mais fácil recuperação de soluto (Felippe, 2020);
- Reação química: Ocorre quando se está perante a necessidade de ocorrência de uma reação química entre o soluto (gás a remover) e solvente (corrente líquida) para que o mesmo seja absorvido. Este processo só é considerado rentável quando existem outros objetivos para além da recuperação de soluto (Felippe, 2020);
- Fluxo de fluidos: Analisado no próprio movimento das correntes presentes na coluna, e como este é realizado (neste caso, por força da gravidade e pela diferença de densidades) (Mendes, Almeida e Magalhães, 2007).

4. Exemplos industriais

Os processos de absorção muito utilizados na indústria, tendo como objetivo: separar ou purificar as misturas gasosas e concentrar gases. Além disso, também são frequentes nas plantas industriais, tanto na preparação da matéria prima como para a transformação em produtos finais (Leite et al., 2004; Leite, 2005; Mendes, Almeida e Magalhães, 2007).

É possível verificar a utilização das colunas de absorção nas refinarias, petroquímicas, indústrias de alimentos, indústria de biocombustíveis, entre outras (Tequaly, 2021; Leite, 2005).

4.1. Produção de misturas

Na indústria química, durante a produção de ácidos clorídrico e sulfúrico há absorção dos gases numa fase final, enquanto que em outros processos a absorção atua em etapas intermediárias (Leite et al., 2004; Leite, 2005). Por exemplo, a coluna de absorção realiza a função de recuperar os produtos gasosos das misturas diluídas, como no caso da lavagem do gás de coque para absorção de amônia (NH_3), e o de absorção de dióxido de enxofre (SO_2) em solventes como mono e dietanolamina (ICTR, 2004). Por outro lado, na indústria petrolífera a absorção opera nos componentes mais pesados do que o metano, ou seja, é feita em óleos leves na produção do gás natural (Leite et al., 2004).

4.2. Absorção de NO_x na produção de HNO_3

As emissões de NO_x em instalações industriais de produção de ácido nítrico durante períodos de operação transitórios, especificamente, no caso da inicialização e encerramento da produção, são um problema, pois mesmo havendo reatores que reduzem a concentração quase a zero do NO_x , esses sistemas são impossibilitados de serem utilizados durante esses períodos, pois subprodutos explosivos podem ser formados, fazendo com que as colunas de absorção sejam necessárias para atuar na absorção desse NO_x (Vilarinho, 2019). Embora estas emissões transitórias não violem as regulamentações ambientais atuais, elas têm um impacto visual perceptível e podem levar a reclamações das populações vizinhas. Além disso, regulamentações mais rigorosas são esperadas em um futuro próximo, impactando os períodos transitórios e exigindo medidas operacionais adicionais (Vilarinho, 2019). Torna-se assim relevante a absorção NO_x na produção do HNO_3 que posteriormente será utilizado na fabricação de fertilizantes inorgânicos, como por exemplo o nitrato de amônia (Leite, 2005).

4.3. Minimizar os poluentes atmosféricos

A separação do SO_2 de uma corrente gasosa tem tido grande interesse, devido à procura de mitigar a poluição ambiental e os seus efeitos no meio ambiente (Ramos et al., 2010).

As indústrias de transformação e os automóveis lançam, no meio ambiente, poluentes derivados da queima do petróleo, diesel e carvão mineral, sendo estas as principais fontes emissoras de SO_2 . Uma das principais consequências da poluição do ar é a chuva ácida, que tem efeito negativo à saúde humana, causando principalmente, problemas no trato respiratório (Ramos et al., 2010). O tratamento do SO_2 , um gás que em caso de exposição a uma elevada concentração poderá causar efeitos prejudiciais a nossa saúde, com as colunas evita a libertação desse poluente para a atmosfera, pois a sua remoção das correntes gasosas, através da absorção em um líquido, é um método prático para reduzir a poluição do ar e os riscos ambientais, minimizando assim a ocorrência das chuvas ácidas (Ramos et al., 2010).

4.4. Recuperação de compostos

O acetato de celulose tem diversas utilizações têxteis, porém a sua produção também acaba por originar um colódio, que é extremamente viscoso, que é obtido devido a elevada concentração de sólidos de acetona na solução homogênea. Portanto, as colunas de absorção atuam com o objetivo de recuperar a acetona tanto para fins económicos como ambientais (Nasser Junior, 2009).

Este método é mais económico do que o anteriormente utilizado, que era a adsorção em leitos de carvão ativado (Nasser Junior, 2009).

5. Diferentes tipologias de colunas de absorção: vantagens e desvantagens

Existem várias tipologias de colunas onde ocorre o processo de absorção, diferindo do que é utilizado para fazer essa separação, tendo mais ou menos eficiência. As tipologias mais utilizadas são as colunas de pratos, as colunas de enchimento, as colunas de bolhas e as colunas de *spray*.

5.1. Colunas de Pratos

As colunas de pratos são colunas cilíndricas que podem assumir até 10 metros de diâmetro e 50 metros de altura e estas colunas que possuem vários andares de pratos (Haan e Hans, 2013). Em cada andar encontra-se um prato poroso que se encontra limitado, de um lado, pelo líquido do andar acima (que desceu por um fosso) e limitado, do outro lado, por uma pequena barreira limitadora de caudal, o que permite somente a passagem da quantidade de líquido que transponha a barreira superiormente, permitindo a acumulação de líquido suficiente no prato para se efetuar o processo de absorção e a sua subsequente renovação, não havendo acumulação excessiva ou insuficiente, seguida por um fosso onde o líquido descerá para o andar mais abaixo (Figura 3) (Haan e Hans, 2013).

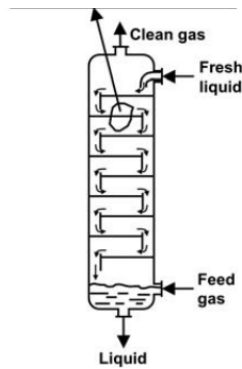


Figura 3: Desenho ilustrativo do funcionamento de uma coluna de pratos (Haan e Hans, 2013).

A distância entre pratos normalmente é de 0,2 metros a 0,6 metros e depende fundamentalmente do diâmetro da coluna e a carga líquida. Assim, quanto maior o diâmetro, maior a distância entre andares e quanto maior a carga, maior deve ser a distância entre pratos para evitar acumulação (Kleiber, 2016 e Haan e Hans, 2013). Por sua vez, a altura da coluna depende diretamente da distância entre andares e do número de andares (Haan e Hans, 2013). Ainda, o diâmetro das aberturas nos pratos deve ser pequeno (Kleiber, 2016). Além disso, o fosso deve ser largo o suficiente para que o líquido descendente possa perder o gás que ainda esteja presente, desça corretamente e não fique acumulado no fosso, passando ao andar abaixo (Kleiber, 2016).

Nesta unidade, o líquido entra no topo e desce de prato em prato, em cascata, e o gás entra por baixo e sobe de andar em andar entrando através de aberturas nos pratos por entre o líquido sobrejacente, sendo dividido em pequenas bolhas que se irão distribuir por todo líquido (Figura 4), havendo assim uma grande superfície de transferência de massa, ocorrendo entre o gás e o líquido um fluxo cruzado onde ocorre uma intensa transferência de massa (Haan e Hans, 2013).

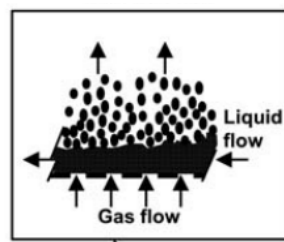


Figura 4: Desenho ilustrativo do fluxo das correntes (Haan e Hans, 2013).

Existem vários modelos onde se distinguem o tipo de prato e o tipo de abertura nos pratos.

Sieve Plate/Placa Perfurada:

Neste modelo, o vapor passa pelas perfurações na placa e o líquido passa por cima da placa e é acumulado em cima da placa devido à força do gás ascendente (Figura 5). Quando a carga de vapor é baixa, o líquido passa pelos furos, reduzindo a eficiência do processo. Trata-se do tipo mais simples, mais barato e a que menos ganha incrustações (Kleiber, 2016).

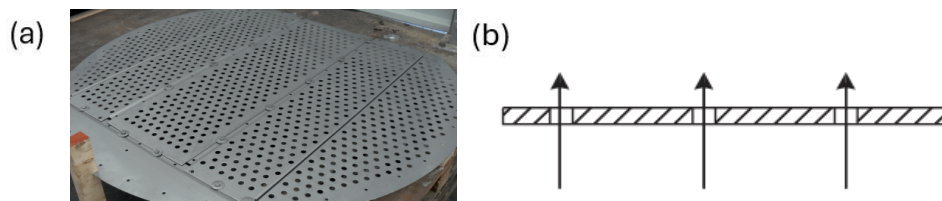


Figura 5: (a) Fotografia de uma *Sieve Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de uma *sieve plate* em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Valve-Plates (de tampa amovível):

Este tipo de placa (Figura 6 (a)) trata-se de uma variação das *sieve plates*, tendo um funcionamento similar, sendo placas perfuradas com tampas amovíveis que consoante a intensidade da carga de vapor levantam-se e deixam passar o gás para o líquido no prato (Figura (b)), apresentando uma grande flexibilidade de operação (a nível da carga de vapor e líquido) dos modelos (Kleiber, 2016).

Conclui-se que este modelo funciona melhor a baixas cargas de vapor, pois quando a carga é baixa, visto a pouca força para levantar a tampa, esta permanece fechada, evitando a queda de líquido pelos furos. Este modelo é mais dispendioso que *sieve plates*, mas menos que *bubble-cap plates* (Kleiber, 2016).q

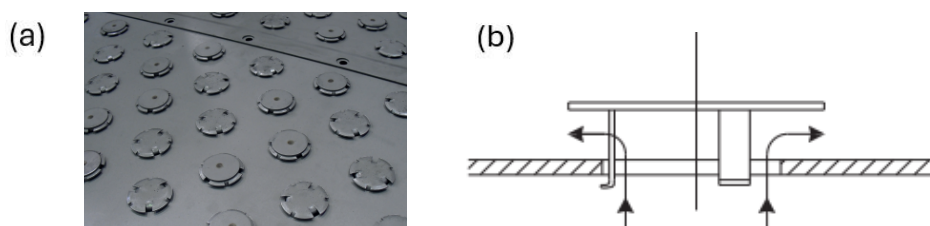


Figura 6: (a) Fotografia de uma *Valve-Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de uma tampa amovível em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Valve-Plates (de tampa fixa):

Este tipo de *valve-plate* é a mais parecida com as *sieve plates*, tendo a diferença que têm uma ondulação por cima dos perfurações, fazendo com estes fiquem parcialmente tapados (Figura 7). Este modelo é mais eficiente que as *sieve plates*, estando na mesma margem de preço (Kleiber, 2016).

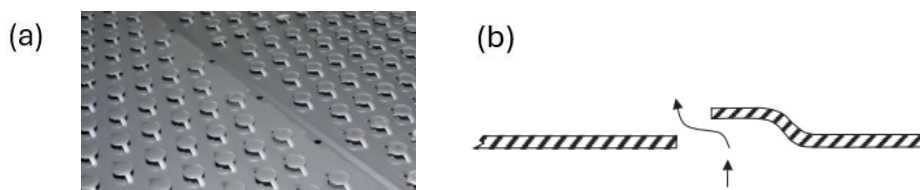


Figura 7: (a) Fotografia de uma *Valve-Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de uma tampa fixa em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Bubble-Cap Plates:

Nesta placa (Figura 8 (a)), vapor passa por uns tubos pequenos com uma tampa aberta fixa em cima que permite a saída de vapor para o líquido no prato, enquanto evita a entrada de líquido pelos tubos e subsequente saída para o andar abaixo (Figura 8 (b)), seja qual for a carga de vapor (grande ou pequena). Assim, devido à sua grande flexibilidade de operação (a nível de carga de vapor e líquida que são possíveis possuir em funcionamento eficientemente), este tipo é mais apropriado para baixas cargas de vapor do que as *sieve plates*. Contudo, são mais caras que os três modelos anteriores e precisam de mais manutenção devido à maior corrosão e entupimento, logo não são mais usadas em sistemas recentes a menos que seja estritamente necessário cargas baixas de vapor (Sinnott, Towler, 2020).

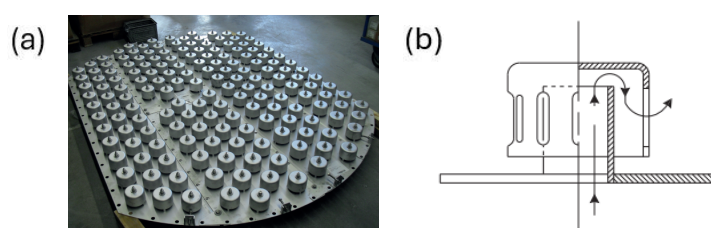


Figura 8: (a) Fotografia de uma *Bubble-Cap Plate* (Kleiber, 2016); (b) Desenho de um *bubble cap* em corte transversal (Sinnott, Towler, 2020).

Dualflow trays:

Ainda, existe este modelo, menos eficiente e mais barato e que normalmente é utilizado em processos que necessitem de uma maior quantidade de material na unidade processual. Basicamente, trata-se de uma coluna de pratos sem fossos ou barreiras, possuindo, apenas, os pratos perfurados (Figura 9). Neste tipo, o líquido desce de prato em prato pelas perfurações e o gás sobe de prato em prato pelas perfurações, tendo um fluxo em contracorrente. Devido à grande quantidade de líquido e gás na coluna, a pressão é elevada o que leva ao aumento da temperatura e à ocorrência de reações indesejadas de decomposição (Kleiber, 2016).



Figura 9: Fotografia de um modelo de *Dualflow trays* (Kleiber, 2016).

5.5.1 Vantagens e desvantagens:

As colunas de pratos são mais indicadas em casos em que é necessário trabalhar com baixas cargas de gás ou líquido e são flexíveis, pois podem operar com várias cargas de gás e de

líquido (Karayiannis, N.C e Laso M, 2024). Este tipo de colunas são as mais indicadas para grandes instalações (Haan e Hans, 2013). Quando são necessárias colunas altas também são as mais indicadas (Karayiannis, N.C e Laso M, 2024). Além disso, consegue-se construir as colunas de pratos tendo maior exatidão da sua eficiência e condições de operação, prevendo melhor o que lá acontece (Haan e Hans, 2013). Também, caso haja entupimento, é mais fácil limpar ou trocar os pratos (Karayiannis, N.C e Laso M, 2024). Por fim, se na absorção houver calor resultante do processo, que o afete, pode-se instalar serpentinas para arrefecer o sistema (Karayiannis, N.C e Laso M., 2024). Por outro lado, se a carga de líquido for muito elevada esta tipologia não irá funcionar, visto haver muita acumulação de líquido entre andares (Haan e Hans, 2013).

5.2. Colunas de Enchimento

As colunas de enchimento tratam-se de colunas cilíndricas com cerca de 10 metros de altura, mas com pequeno diâmetro que possuem um enchimento poroso (Figura 10), que pode ser de disposição aleatória ou de disposição estruturada. Esse enchimento é colocado sobre um suporte, que pode ser uma rede, o que permite o suporte do enchimento e, ao mesmo tempo, que é assegurada a porosidade que permita a passagem dos líquidos e dos vapores (Haan e Hans, 2013). Estas peças possuem poros ou canais que distribuem o líquido por todo o interior da estrutura (Figura 10). Assim, obtém-se uma maior superfície de contacto entre o líquido e o vapor e, conseqüentemente, aumenta-se, a área de transferência de massa entre a fase líquida descendente e a fase gasosa ascendente. Ainda, o contacto entre fases é contínuo, unicamente em contracorrente e para funcionar corretamente é necessário poder assegurar-se as condições corretas de distribuição do líquido e do gás (Kleiber, 2016).

Neste tipo de tipologia deve-se ter alguns aspetos em consideração, como o valor máximo de carga de vapor e o valor mínimo de carga líquida, que, se forem excedidos ou não atingidos, respetivamente, não irá se formar um fluxo em contracorrente, obrigatório ao funcionamento deste processo. Se houver demasiado vapor a entrar na parte de baixo da coluna, formar-se-á uma camada de espuma e o líquido ascendente irá ser empurrado para o topo da coluna, ficando aí acumulado. Por sua vez, se entrar pouco líquido, não haverá líquido distribuído por toda a coluna (Kleiber, 2016).

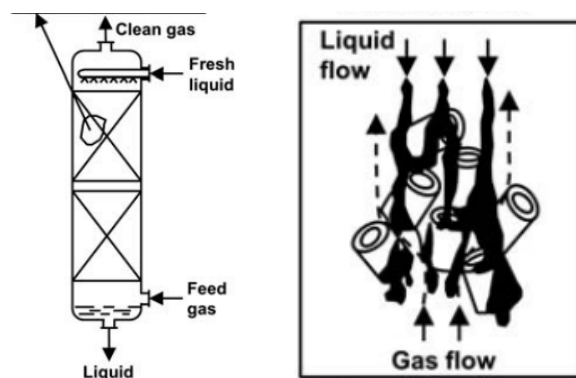


Figura 10: Desenho esquemático da coluna de enchimento (Haan e Hans, 2013).

Tipos de Enchimento:

O enchimento deve permitir uma grande área de contacto entre fases, distribuindo bem o líquido e permitindo o fluir do gás.

Existem vários tipos de modelos que satisfazem estas condições e podem ter uma estrutura e disposição regular ou podem ser de disposição aleatória e a eficiência do processo depende da escolha do modelo e do material que se utiliza no modelo.

Disposição Aleatória:

O enchimento de disposição aleatória é o mais simples e caracteriza-se por uma grande quantidade de peças separadas sobrepostas sob um arranjo aleatório e é o mais apropriado para situações de maior carga líquida. As estruturas podem assumir vários tamanhos (contudo não devem ser maiores que 10% do diâmetro da coluna, pois quanto maior o tamanho do enchimento menor a eficiência da separação, devido à maior propensão à existência de volumes vazios) ou formas como por exemplo: anéis de Raschig ou as selas; outros derivam desses primeiros dois tipos e têm poros na sua estrutura exterior, como os anéis de Pall; outros modelos mais avançados surgiram com uma estrutura mais aberta, que suportam maiores cargas de vapor (Figura 11) (Sinnott, Towler, 2020).

As peças podem ser de diversos materiais como cerâmica, porcelana, plástico, metal e grafite. A escolha do material tem em conta a natureza dos fluidos que circulam e a temperatura ao qual ocorre o processo: sendo a cerâmica apropriada para líquidos corrosivos, mas não deve ser utilizada com bases fortes, nem em ambientes de grande instabilidade, pois parte; o plástico não deve ser usado com alguns solventes orgânico nem em altas temperaturas; o metal é o mais apropriado para operações agitadas devido à sua resistência (Sinnott, Towler, 2020).

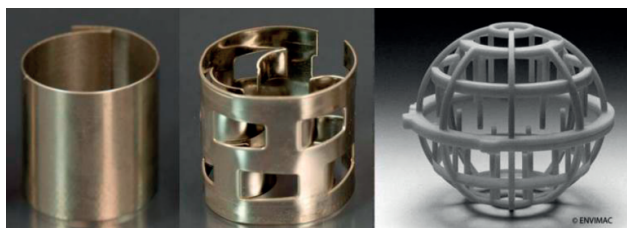


Figura 11: Alguns modelos de enchimento aleatório (aneis de *Raschig*, anéis de *Pall* e *ENVIPAC*) (Kleiber, 2016).

Disposição Organizada:

O enchimento de disposição organizada é caracterizado como estruturas como malhas de arame ou placas cheias de canais perfuradas com um arranjo geométrico que podem ser feitas em metal, plástico ou até em rocha (Figura 12). Este tipo possibilita uma maior área de transferência de massa e mais constante ao longo da coluna e funciona melhor do que o outro tipo em situações de maior carga de vapor e menor carga líquida, porém é mais caro também (Kleiber, 2016).

(a)

(b)

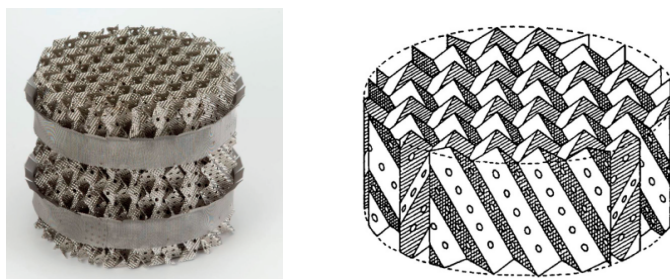


Figura 12: (a) Modelo de um enchimento estruturado (*Super Mellapak*; Kleiber, 2016); (b) Desenho ilustrativo de um modelo de enchimento estruturado (Sinnott, Towler, 2020).

5.2.1. Vantagens e Desvantagens:

As colunas de enchimento são significativamente mais baratas para manusear materiais corrosivos devido à opção de utilização de enchimento resistente feito de cerâmica, por exemplo (Karayiannis, N.C e Laso M., 2024). Além disso, a retenção de líquido dentro da unidade processual é menor, o que é importante ter em conta quando estão envolvidos materiais que terão reações secundárias, sendo bem mais seguro a utilização deste tipo de coluna nestes casos (Haan e Hans, 2013). Ainda, quando se pretende instalar colunas de pequeno diâmetro este tipo de coluna é a escolha mais adequada pelo seu baixo custo e fácil instalação (neste caso específico) (Haan e Hans, 2013). Também, é de realçar que este tipo de colunas possibilita uma utilização sob baixas pressões, levando a que seja possível alcançar o fim da absorção com menores temperaturas. Este aspeto torna-se decisivo na escolha deste modelo fundamentalmente quando no processo estão envolvidas substâncias que se decomponham com temperaturas elevadas (Haan e Hans, 2013). Em comparação com outras tipologias, este modelo é o mais indicado para grandes cargas de líquido e é menos dispendioso que a coluna de pratos. Além disso, colunas de enchimento podem ter o seu tipo de enchimento alterado com facilidade para alterar propriedades do processo (Karayiannis, N.C e Laso M., 2024). Por outro lado, não se consegue prever com exatidão a eficiência da coluna, sendo mais difícil de controlar as variáveis, o que, para uma empresa, não é benéfico, pois não se consegue prever o lucro obtido com o processo. Também não se consegue obter colunas de enchimento eficientes de grandes dimensões, particularmente, de grande altura, pois dá-se uma má distribuição dos fluidos, o que prejudica o funcionamento (Karayiannis, N.C e Laso M., 2024).

5.3. Colunas de Bolhas

Neste modelo, o interior da coluna encontra-se cheio de líquido solvente que flui de modo contínuo, enquanto bolhas de gás fluem por entre o líquido (Figura 13). Este modelo pode assumir um padrão de fluxo entre as fases líquida e gasosa em concorrente ou em contracorrente. Este modelo também pode ter enchimento, a fim de melhorar a eficiência (Figura 13) (Haan e Hans, 2013).

Este tipo de coluna é utilizado quando na unidade processual de absorção também ocorrem reações químicas (Haan e Hans, 2013).

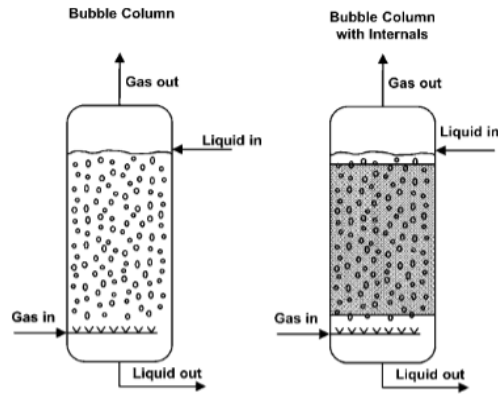


Figura 13: Desenho esquemático de coluna de bolhas (Haan e Hans, 2013).

5.3.1. Vantagens e Desvantagens:

Este tipo de coluna apresenta um baixo custo e também neste processo consegue-se uma grande área de transferência de massa (Haan e Hans, 2013). Ainda, consegue-se uma grande permanência ou acumulação de líquido, no caso de ser necessário para o processo a ser executado (Karayiannis, N.C e Laso M, 2024). Por outro lado, neste modelo, o gás a absorver pode voltar a incorporar na fase gasosa (o que pode ser evitado/amenizado pelo uso de enchimento inerte que leve a fase líquida a ter um caminho contínuo, não se misturando com outras partes líquidas, o que pode aumentar também a área de transferência de massa) (Haan e Hans, 2013).

5.4. Coluna de *Spray*

Neste tipo de coluna de absorção o líquido é disperso em pequenas gotas que entram em contacto com um gás ascendente (Figura 14). Este contacto entre fluxos pode ser de modo concorrente ou de modo contracorrente (Haan e Hans, 2013).

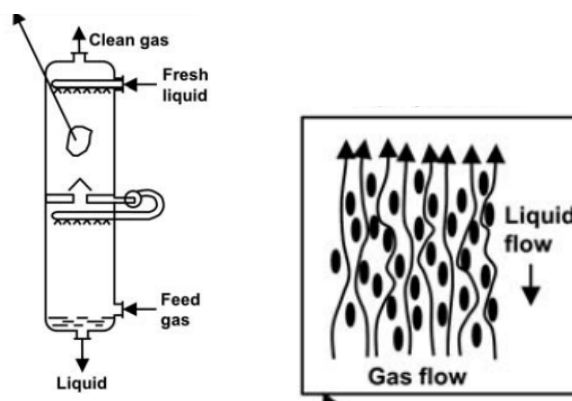


Figura 14: Desenho esquemático de coluna de *spray* (Haan e Hans, 2013).

5.4.1 Desvantagens:

Caracteriza-se por um modelo pouco eficiente para o intuito de absorção devido ao fenómeno em que o vapor arrasta as gotas líquidas (*entrainment*), levando a que se suceda o processo inverso

do desejado (o gás a dissolver voltar a misturar-se na fase gasosa). Além disso, possui um elevado dispêndio energético a fim de atomizar o líquido (dispersar em pequenas gotículas) (Haan e Hans, 2013).

Tendo em vista todas as tipologias, escolheu-se a tipologia da coluna de pratos para aprofundar o seu estudo, nomeadamente, estudando-se os seus custos de operação, os fatores que influenciam a sua eficiência e uma aplicação prática do seu uso na indústria.

6. Fatores que influenciam a eficiência da coluna de absorção de pratos

A eficiência da coluna de absorção de pratos é fundamental para o sucesso do processo de separação e é influenciada por vários fatores, podendo ser classificados em características da estrutura da coluna, propriedades das fases e condições operacionais (Green e Southard, 2019).

6.1. Características da estrutura da coluna

Em termos de características de estrutura, existem vários componentes que influenciam a eficiência da coluna, como por exemplo a quantidade de pratos. Este é um fator importantíssimo, pois cada prato representa uma fase de interação entre a fase líquida e a fase gasosa, onde acontece a transferência de massa. Quanto mais pratos na coluna, maior é a área de interação entre as fases, o que eleva a eficácia da absorção; mas, por outro lado, a quantidade excessiva de pratos pode aumentar os custos de operação e manutenção. Outro fator significativo é o tipo de prato: neste ramo, pode-se optar por pratos perfurados, pratos de válvula e pratos em forma de campânula, sendo que cada tipo tem as suas características particulares que influenciam o padrão de fluxo do gás e do líquido. A distância entre pratos é outro componente, onde alturas elevadas podem prevenir o deslocamento de gotas de líquido para os pratos superiores, resultando em menos perdas e maior eficiência; por outro lado, espaços elevados entre pratos reduzem a eficácia de absorção, pois a quantidade de pratos ao longo da coluna é menor. Por fim, tem-se o diâmetro da coluna, em que este afeta o volume total e a duração das fases líquida e gasosa, podendo averiguar que colunas mais amplas possibilitam um fluxo mais homogêneo e uma distribuição aprimorada do gás, resultando numa transferência de massa mais eficaz (Towler e Sinnot, 2008; Green e Southard, 2019).

6.2. Propriedades das fases envolvidas

No ramo das propriedades das fases envolvidas, tem-se a solubilidade do gás em um líquido, que é um fator crucial que afeta diretamente a eficiência da coluna, pois gases que têm um elevado valor de solubilidade no líquido de absorção são eliminados de forma mais eficiente da fase gasosa, dando como resultado um processo de absorção mais eficiente. Outro fator importante dentro das

propriedades é a escolha do líquido absorvente ideal, isto é, que possui grande afinidade pelo gás a ser removido.

A densidade e viscosidade das fases é outro aspeto com elevado valor, devido ao facto de influenciarem o comportamento do fluxo na coluna e a resistência à transferência de massa. Deste modo, fluidos com baixa viscosidade tendem a mostrar uma melhor distribuição e formar camadas mais finas nos pratos, favorecendo a transferência de massa, sendo que se ocorrer uma discrepância considerável entre a densidade do líquido e do gás, irá resultar a criação de bolhas, o que é vantajoso para o processo uma vez que aumenta a área de contacto.

Por último, a tensão superficial do líquido também influencia a criação de gotas e bolhas, fundamentais para a eficácia da transferência de massa. Deste modo, líquidos com baixa tensão superficial tendem a dispersar-se com mais facilidade, aumentando assim a área de contacto. Algumas vezes, até podem ser incorporados agentes tensoativos para diminuir a tensão superficial do líquido e aumentar a eficácia do processo (King, 1980).

6.3. Condições operacionais

Por último e não menos importante, tem-se as condições operacionais que estão subdivididas em quatro aspetos importantíssimos que influenciam a eficiência da coluna.

Primeiramente, o fluxo do gás e do líquido, onde a correlação entre eles é essencial, pois se o fluxo de gás é excessivamente elevado pode resultar num fenómeno denominado por *flooding* (ou afogamento), que consiste no transporte de líquido para as áreas superiores da coluna. Este fenómeno diminui drasticamente a eficácia e pode até parar o processo de absorção. Por outro lado, um fluxo do líquido muito reduzido pode não garantir uma área de contacto adequada, colocando assim em causa a eficácia da absorção.

Segundamente, a temperatura e pressão no processo, uma vez que têm influência na solubilidade do gás no líquido e na velocidade da transferência de massa. Dito num modo geral, a solubilidade de um gás aumenta com o aumento de pressão e diminui com a subida de temperatura. Podendo-se concluir que, a operação sob elevada pressão e baixa temperatura pode ser vantajosa para melhorar a eficácia da absorção em colunas nas quais os gases se dissolvem em líquidos frios e densos.

A composição da fase gasosa é outro aspeto que influencia a eficiência da coluna à custa de, se as concentrações a absorver forem elevadas, esta irá favorecer a absorção, uma vez que a força que impulsiona a transferência de massa é superior. No entanto, se a coluna for tratada em um ponto próximo ao ponto de saturação, a eficiência pode reduzir, porque o líquido pode não ter capacidade para absorver mais do componente gasoso.

O último aspeto significativo é o tempo de contacto, onde este é influenciado pelas taxas de fluxo e pelo tipo de prato. Quando existe um período prolongado de contacto, a transferência de

massa torna-se mais eficaz, o que resulta de uma maior quantidade de gás absorvido. Contudo é necessário estabelecer um equilíbrio, uma vez que longos períodos de contacto remetem a uma diminuição do gradiente de concentração entre as fases líquido-gasoso, resultando numa menor taxa de transferência de massa. (Green e Southard, 2019; King, 1980).

7. Aplicação prática da coluna de pratos na indústria

7.1. Purificação de biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível, produzido através da decomposição de matéria orgânica na ausência de oxigénio. Este combustível apresenta um grande poder calorífico, o que, em conjunto com o fato de ser uma energia renovável, faz dele um grande substituto para outras fontes de energia. A sua composição consiste em metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e pequenas quantidades de gás sulfídrico (H_2S), nitrogénio (N_2), entre outros (Mesquita, 2019; Dalcolle, et al., 2015).

Este vetor de energia apresenta um maior poder calorífico quanto maior a percentagem de metano que o constitui, logo, o maior objetivo de realizar a sua purificação é conseguir remover os constituintes extras, especialmente o dióxido de carbono, que apresenta uma maior percentagem dentro do biogás (Mesquita, 2019; Dalcolle, et al., 2015).

Um dos métodos para atingir este objetivo é a utilização de uma coluna de absorção para remover o dióxido de carbono do biogás. Este processo consiste na utilização de água como absorvente com o fim de dissolver o dióxido de carbono dentro da coluna, purificando o biogás e aumentando o seu poder calorífico. Apesar da solubilidade do CO_2 em água ser significativamente maior que a solubilidade do CH_4 , esta (solubilidade do CO_2 em água) continua a ser muito baixa, sendo necessário operar a coluna sob altas pressões. A água é inserida no topo da coluna, enquanto que o biogás bruto entra pelo fundo da coluna. Passando um pelo outro, a água dissolve o CO_2 presente no biogás. (Mesquita, 2019; Dalcolle, et al., 2015). (Figura 15)

Os produtos que saem da coluna no final são biogás altamente rico em metano, também chamado de biometano, e água gaseificada rica em dióxido de carbono. Após o processo, o CO_2 é retirado da água, restaurando o absorvente (Mesquita, 2019; Dalcolle, et al., 2015).

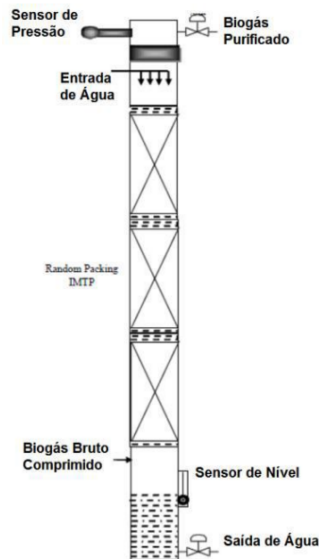


Figura 15: Desenho exemplar coluna utilizada na purificação do biogás (Mesquita, 2019).

8. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

No âmbito dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), neste trabalho abordou-se a otimização da coluna de pratos, que se relaciona com o objetivo 9 (“Indústria, Inovação e Infraestruturas”), pois ao melhorar as capacidades tecnológicas (eficiência) da coluna evita-se o desperdício e consumo desnecessário.

Por sua vez, relacionado ao objetivo 12 (“Produção e Consumo Sustentáveis”), encontramos a purificação do biogás como um exemplo de gestão ambientalmente correta dos produtos químicos e de todos os seus resíduos, uma vez que neste caso pretende-se retirar o CO_2 a fim de aumentar o poder calorífico do combustível.

Por último, associado ao objetivo 13 (“Ação Climática”) encontra-se a separação do SO_2 de uma corrente gasosa, utilizando a absorção, tendo como intuito a diminuição da libertação de poluentes tóxicos e causadores de chuvas ácidas para a atmosfera.

9. Conclusões

Durante a elaboração deste trabalho, consolidou-se e aprofundou-se o estudo das unidades processuais, das operações processuais e das operações unitárias envolvidas no processo de absorção, assuntos também abordados no âmbito da disciplina de Introdução à Engenharia Química, auxiliando assim o estudo da disciplina. Ainda, trouxe esse estudo teórico para a realidade com a pesquisa e estudo dos exemplos de aplicação na indústria, dando a conhecer aplicações que não eram do conhecimento do grupo. Assim, criando, também, uma reflexão sobre o impacto na eficiência do processo da escolha da tipologia, da dimensão, do material utilizado, dos solventes a utilizar e das condições de operação, sendo que a eficiência influencia diretamente o lucro de uma empresa, o que é um aspeto de extrema relevância na profissão de engenheiro químico, o que exige um grande espírito crítico para analisar todos os fatores que constituem um projeto.

10. Referências bibliográficas

Felippe, Monica. 2020. "Absorção Aula 1 Parte 1." Youtube. 02 de 06. Acedido em 30 de 09 de 2024. https://www.youtube.com/watch?v=Hd_YyahPvpc.

Bastos, João. "Elementos de Engenharia Química I." Faculdade de Engenharia do Porto, s.d.

Marczewski, Adam M. 2013. "Adsorption GLOSSARY." A Practical Guide to Isotherms of ADSORPTION on Heterogeneous Surfaces. 02 de 02. Acedido em 30 de 09 de 2024. <https://adsorption.org/awm/guide/>.

Pires, Lorena Oliveira. 2021. "OP3 _19_ Absorção." Youtube. 20 de 02. Acedido em 30 de 09 de 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=NZmWTpP4PAM>.

Breslyn, Wayne 2021. "Adsorption vs Absorption." Youtube. 13 de 05. Acedido em 30 de 09 de 2024. <https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=absorption&mid=6B47B36EC3B9C90A7ACA6B47B36EC3B9C90A7ACA&FORM=VIRE>.

De Haan, André, e Bosch Hans. 2013. "Industrial Separation Processes- Fundamentals.". Capítulo 3. De Gruyter. Retrieved from: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpISPF0002/industrial-separation/industrial-separation>

Ferreira, Pedro Henrique, Gabriel Nunes Silva, e Victor de Oliveira Bites. 2021. "Coluna de Absorção." Científico, Brasília.

Andrade, Luísa, e Tânia Lopes. 2024/2025. "Introdução à Engenharia Química." Introdução aos processos químicos. Faculdade de Engenharia do Porto.

Assis, Adilson Jose. 2021. "Coluna de absorção gasosa: conceitos básicos e configuração no COCO." Youtube. 23 de 09. Acedido em 29 de 09 de 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=psXxT2C2g2I>.

Mendes, Adélio, Ana Sofia Almeida, e Fernão Magalhães. 2007. "Portal laboratórios virtuais de processos químicos." Acedido em 2024 de 10 de 8. http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=246&Itemid=2

Leite, A. B., S. L. Bertoli, e S. L. Barros. 2004. "Tratamento de gases residuais utilizando o processo de absorção com reação química." Florianópolis. Acedido em 10 de 10 de 2024. Retrieved from: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ict/2004/ARQUIVOS%20PDF/10/10-004.pdf>

Leite, André Búrgio Santa Catarina. 2005. "Absorção química de dióxido de nitrogênio (NO₂). Acedido em 10 do 10 de 2024. Retrieved from: <https://www.scielo.br/j/esa/a/VST8jBkcwMFLwmN7jZXNfrp/>

Tequaly Curitiba/Paraná. 2021. Brasil "Colunas de processo para indústrias químicas e petroquímicas". Acedido em 14 do 10 de 2024. <https://www.tequaly.com/colunas-de-processo-para-industrias-quimicas-e-petroquimicas/>

Vilarinho, Inês Lousada. 2019. "Abatement of NO_x emissions in nitric acid plants during transient regimes." Tese de Doutoramento, Coimbra. Acedido em 24 de 10 de 2024. Retrieved from: <https://hdl.handle.net/10316/87549>

Ramos S. Leite, A.B. Barros, A.A.C. 2010. "Avaliação dos parâmetros físicos de uma coluna de absorção", Bento Gonçalves – RS, Brasil. Acedido em 24 do 10 de 2024. Retrieved from:

https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=96&ano=_segundo

Nasser Junior, Roberto. 2009. "Otimização das colunas de absorção da recuperação de acetona na produção de Filter Tow por meio de estudos fenomenológicos e análise estatística." São Paulo, Brasil.

Acedido em 24 do 10 de 2024.

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-18122009-141222/pt-br.php>

Sinnott, Ray e Towler, Gavin. 2020. "Chemical Engineering Design (6th Edition)", Elsevier. Retrieved

from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCEDE0001/chemical-engineering/chemical-engineering>

Kleiber, Michael. 2016. Process Engineering - Addressing the Gap between Studies and Chemical Industry. De Gruyter. Retrieved from

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEAGSCIM/process-engineering-addressing/process-engineering-addressing>

Karayianis, N.C e Laso M.. 2024. "Absorption." In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, editado por Kirk-Othmer, Página 1 a 5. John Wiley & Sons. Retrieved from:

<https://doi.org/10.1002/0471238961.0102191519201503.a01.pub3>

Green, Don, e Marylee Southard. 2019. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill

Education. Retrieved from: [Perry's Chemical Engineers' Handbook \(9780071834094\)](#)

King, Judson. 1980. Separation Process. Estados Unidos da América: McGraw-Hill Education.

Retrieved from: [Separation Processes, Second Edition](#)

Mesquita, Iago Santos. 2019. "Modelagem e Dinâmica de uma Coluna de Absorção de CO₂ para Purificação de Biogás." Projeto final de curso, Rio de Janeiro. Acedido em 14 do 10 de 2024.

Retrieved from: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12684/1/ISMesquita.pdf>

Dalcolle, J. C., R. L. Pires, M. P. Crispim, D. C. Maia, L. M. Frare, M. L. Gimenes, e N. C Pereira. 2015. "Absorção de H₂S e CO₂ na purificação de biogás para fins energéticos." Maringá, Paraná.

Acedido em 24 do 10 de 2024. Retrieved from:

<https://pdf.blucher.com.br/chemicalengineeringproceedings/cobegic2015/206-32815-249964.pdf>

Thiago Reboredo. 2024. "GasNet O Site Do Gás Natural E GNV - Tereos Brasil Começa a Produzir Energia a Partir Do Biogás Obtido de Resíduos de Canal." Gasnet.com.br. 2024.

<https://www.gasnet.com.br/Conteudo/22580/Tereos-Brasil-come%C3%A7a-a-produzir-energia-a-partir-do-biog%C3%A1s-obtido-de-res%C3%ADduos-de-canal>.

"Objetivos do Desenvolvimento Sustentável". Acedido a 10 de 11 de 2024. <https://ods.pt>