

Simulação e otimização da absorção do CO₂ com água no tratamento do biogás

Simulation and optimization of CO₂ absorption with water in biogas treatment

Simulación y optimización de la absorción de CO₂ con agua en el tratamiento del biogás

Recebido: 02/08/2022 | Revisado: 14/08/2022 | Aceito: 16/08/2022 | Publicado: 24/08/2022

Mitsuo Watanabe Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9555-9357>

Universidade Salvador, Brasil

E-mail: mw-neto@hotmail.com

Luiz Mário Nelson de Góis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8536-8936>

Universidade Salvador, Brasil

E-mail: Luiz.gois@unifacs.br

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo simular uma absorvedora de CO₂ utilizando, a partir da tecnologia HPWS, água como solvente e anéis de Pall como recheio, e analisar a influência das variáveis operacionais na planta de refino do biogás. No estudo são testados diversos valores, no software ASPEN PLUS[®] V8.8., para a vazão de solvente alimentado, pressão e temperatura da torre, de forma a estabelecer grandezas ótimas para essas variáveis. Os resultados obtidos se mostraram mais eficazes para a pureza do biogás tratado e a remoção do CO₂, e apresentou um menor custo operacional.

Palavras-chave: Absorção física; Água; AspenPlus; Biogás; Simulação.

Abstract

The present work aims to simulate a CO₂ absorber using, from HPWS technology, water as solvent and bed-packed with Pall rings and analyze the influence of operational variables in the biogas refining plant. In the study, several values are tested, in the ASPEN PLUS[®] V8.8 software, for the flow of solvent fed, pressure, and temperature of the tower, to establish optimal values for these variables. The results obtained proved to be more effective for the purity of the treated biogas and the CO₂ removal and presented a lower operating cost.

Keywords: Physical absorption; Water; AspenPlus; Biogas; Simulation.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo simular un absorbedor de CO₂ utilizando, a partir de la tecnología HPWS, agua como solvente y anillos de Pall como relleno, y analizar la influencia de las variables operativas en la planta de refino de biogás. En el estudio se ensayan varios valores, en el software ASPEN PLUS[®] V8.8, para el flujo de solvente alimentado, presión y temperatura de la torre, con el fin de establecer valores óptimos para estas variables. Los resultados obtenidos demostraron ser más efectivos para la pureza del biogás tratado y la remoción de CO₂, y presentaron un menor costo operativo.

Palabras clave: Absorción física; Agua; AspenPlus; Biogás; Simulación.

1. Introdução

A grande dependência mundial de combustíveis fósseis vem preocupando o setor econômico devido a seu eventual esgotamento, por se tratar de recursos finitos além dos impactos causados pela liberação de gases causadores do efeito estufa. Com isso, a demanda por fontes renováveis que consumam menos recursos e sejam menos poluentes vem ganhando espaço como alternativas para os problemas relacionados ao alto custo associado a esses combustíveis, devido à sua escassez que aumenta gradualmente, além das implicações ambientais (Gasparovic, 2014).

Diante disso, pelo fato de ser produzido a partir da digestão anaeróbica de matérias orgânicas, o biogás é apropriado nesse cenário por ser uma fonte sustentável, sendo este gás composto em sua maioria por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), além de conter menores quantidades de sulfeto de hidrogênio (H₂S), oxigênio (O₂) e nitrogênio (N₂). Porém, de forma a aumentar a eficiência energética, o biogás deve passar por um processo de purificação para remover ou diminuir a

concentração destes contaminantes presentes (principalmente o CO₂ e H₂S), esses que possuem propriedades corrosivas, o que pode causar danos aos equipamentos veiculares e impactos ambientais (Chew *et al.*, 2021; Patuzzo, 2019).

O propósito de absorver o dióxido de carbono é benéfico tanto do ponto de vista ambiental como torná-lo útil em outros processos, já que pode ser utilizado na indústria química (produção de ureia), na indústria farmacêutica (deslocamento de substâncias a baixa temperatura e fornecimento de um ambiente inerte para sínteses químicas) e na indústria alimentícia (fluido criogênico para resfriamento e carbonatação de bebidas). As principais fontes de emissão do CO₂ provêm da produção de cimento, de refinarias, biomassas, das fábricas de ferro e aço, da indústria petroquímica e do processamento de óleo e gás natural (IPCC, 2005).

Vale ressaltar que a absorção do dióxido do carbono é muito mais viável no biogás bruto do que no gás natural bruto, tendo em vista deste conter, geralmente, expressiva quantidade de hidrocarbonetos e pouco CO₂ (1%-5% volumétrica), além de ser uma fonte não renovável quando comparado ao biogás (Faramawy *et al.*, 2016).

Para realizar a purificação desse biocombustível, o biogás bruto é alimentado no fundo da torre absorvedora ao mesmo tempo que o solvente líquido é alimentado pelo topo, absorvendo o componente solúvel presente na fase gasosa, de modo que seja liberado o biogás desprovido de contaminantes (Vilela, 2014).

Vale enfatizar que a absorção gasosa pode ser classificada em física ou química. A absorção química é quando o soluto presente no seio da fase gasosa é solubilizado para o seio da fase líquida por meio de uma reação química. Já a absorção física, o mecanismo de difusão ocorre de maneira similar, porém sem reação química, onde a escolha do solvente, a pressão e a temperatura de operação controlam vigorosamente a transferência de massa. Ao comparar os dois tipos de absorção, é estabelecido que geralmente a absorção química é mais eficiente que a física, pois apresenta uma maior força motriz na transferência de massa da interface gás-líquido devido à reação química presente (Martins, 2011; Shibata, 2017).

A escolha do solvente é de extrema importância no processo da absorção, tanto do ponto de vista técnico como econômico, já que se deve optar pelo solvente que apresente: maior pureza, que não seja inflamável, possua menor volatilidade e corrosividade, um menor custo e que o soluto apresente maior solubilidade. No caso da absorção do CO₂, o solvente tradicional mais utilizado é o grupo das aminas, sendo que estas apresentam alguns problemas que outros solventes, como a água, podem suprir. Vale ressaltar que na absorvedora, além da escolha dos solventes, outros quesitos são importantes como, a tecnologia de separação, o tipo de recheio, dados geométricos e as variáveis operacionais (Maddox, 1980 apud Magalhães *et al.*, 2004; Vilela, 2014).

Para a análise desses quesitos citados, é importante se atingir o estado de otimização, o qual é originado do estudo da relação entre as variáveis envolvidas, visando assim, estabelecer valores ótimos para um melhor desempenho operacional e econômico do processo. Os dados envolvidos são manifestados através das variáveis, estas que são denominadas em dois tipos: as variáveis independentes, que são as que interferem no processo, e as variáveis dependentes ou respostas, que são as afetadas no processo e dependem das variáveis de entrada. O estudo da otimização é feito sobre as variáveis independentes, no qual é descrito como um grupo total de componentes que possuem propriedades similares, sendo que os valores e a abrangência da população variam de acordo com cada processo (Rodrigues; Iemma, 2014).

No caso da absorção do CO₂ presente no biogás, Gasparovic (2014) testou valores para as variáveis independentes, verificando como a influência das respostas poderia ser favorável ou desfavorável. Assim, neste trabalho foram consideradas como variáveis independentes a vazão de água alimentada, a pressão e temperatura da coluna, e como respostas: a pureza do biometano (% molar) e a quantidade de CO₂ removida (% molar).

Para almejar a melhoria no projeto de otimização e acompanhamento, a simulação computacional de processos químicos realizada no Aspen Plus[®] é empregada na maioria das plantas industriais do mundo, na qual visa, através de equações de engenharia, reproduzir o funcionamento de uma planta real. Assim, o programa gera resultados, onde através destes é

possível analisar o impacto das variáveis operacionais em todo o processo e a relação com o aspecto temporal, técnico, econômico e de segurança da planta (Aspen Plus, 1999).

Para executar a simulação, é necessário preencher uma série de informações do processo como: os componentes envolvidos, modelo de cálculo das propriedades, dados das correntes de entrada e o sistema de equipamentos de operações unitárias presente (Mello, 2013; Shibata, 2017).

1.1 Análise da literatura

Determinados trabalhos publicados na literatura têm dedicado atenção, principalmente, ao estudo da tecnologia e seleção do solvente na operação de separação do biogás nas absorvedoras.

Dentre as tecnologias existentes para o refino do biogás, Angelidaki *et al.* (2018) afirmaram que as principais são: a adsorção por oscilação de pressão, absorção química (geralmente com aminas), absorção física utilizando água pressurizada (“*High Pressure Water Scrubbing*” - HPWS), separação criogênica e separação por membranas. Em vista disso, Ahmed *et al.* (2021) e Angelidaki *et al.* (2019) compararam a eficiência dessas principais tecnologias, em que foi determinado que até o ano de 2019 o método HPWS correspondeu a 41% do mercado global de tratamento do biogás, apresentando: maior solubilidade física do CO₂ na água do que o metano, baixo consumo energético, baixa perda de metano e a remoção simultânea do CO₂ e H₂S.

Assim, foi escolhida para o presente estudo a tecnologia da pressurização de água HPWS, em que a absorção é baseada no efeito físico de solubilização para dissolver os gases no líquido, com intuito de aprofundar o efeito das variáveis na eficiência da absorção. Segundo Struk *et al.* (2020), sabe-se que este também é um dos métodos mais simples e mais econômico, já que não necessita de pré tratamento e é de fácil manutenção. Além disso, o processo possui um impacto ambiental favorável e apresenta boa eficiência de separação (baixa perda de metano) quando comparado ao de absorção química. Entretanto, uma desvantagem dessa tecnologia, de modo geral, é a necessidade de circular grande quantidade de água (Cozma *et al.*, 2012; Cozma *et al.*, 2013; Rasi *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2015).

Segundo Dorf (2004), a escolha do solvente no processo de absorção é extremamente importante. Este deve ser de forma que possua maior solubilidade com o soluto (seletividade) do que com os outros gases presentes na mistura alimentada, já que ele será responsável por dissolver o contaminante presente no gás.

Assim, segundo Vilela (2014), para capturar o CO₂ do gás, tanto solventes químicos como físicos podem ser utilizados. De acordo com suas propriedades, o solvente físico apresenta baixo calor de absorção, sua capacidade depende da pressão parcial do dióxido de carbono e não necessita de calor para dessorção. Porém, mesmo o solvente químico possuindo o oposto dessas propriedades, este é mais adequado para o processo por ter facilidade em remover altos teores de CO₂ das correntes gasosas, já que necessita de pequenas quantidades de solvente. Vale ressaltar que apesar dos solventes químicos serem mais eficazes nesse processo de separação, eles ainda são mais caros que os solventes físicos.

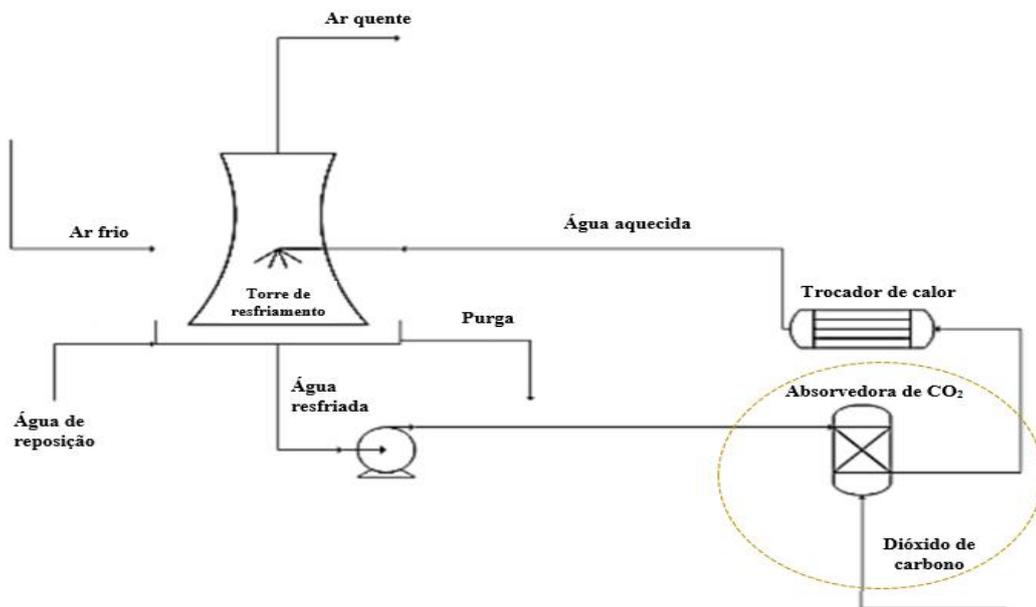
Essencialmente, no setor de fertilizante e alimentício, as aminas são utilizadas como solventes químicos na remoção do CO₂, como exemplo, pode-se citar a monoetanolamina (MEA) e a dietanolamina (DEA), além de soluções de carbonato de potássio e amônia. Entretanto, segundo Ahmed *et al.* (2021), Kim *et al.* (2011) e Mumford *et al.* (2012), esses solventes apresentam problemas cruciais para o processo, já que: necessitam de altas temperaturas, causam estragos à tubulação e utensílios da planta por possuírem propriedades corrosivas, possuem alto custo e apresentam dificuldade de regeneração no processo. É de referir que no caso das aminas, devido à sua toxicidade, elas também podem poluir a corrente gasosa com o absorvente disperso (Vilela, 2014).

Segundo Wall *et al.* (2018), a água quando comparada com outros solventes, vem sendo bastante utilizada como solvente físico, tornando-se um absorvente bastante promissor. Wall *et al.* (2018) também retrataram que cerca de 30% das plantas mundiais de tratamento do biogás vem estudando e utilizando este líquido como solvente nos últimos anos.

Além disso, trabalhos publicados por Hoyer *et al.* (2016), Lizarazu (2016) e Vilela (2014) abordaram, diante da carência de recursos energéticos e hídricos, a vantagem de empregar a água nesse processo diante da perspectiva econômica, já que pode ser recuperado do próprio processo evitando gastos com reposição. Além disso, do ponto de vista ambiental, esta evita o desperdício e apresenta baixa toxicidade, e do viés técnico, pode apresentar uma boa eficiência na separação do CO₂, desde que seja pressurizada.

Volkers (2016) também retratou a possibilidade de recuperação da água em um sistema de resfriamento, conforme mostra a Figura 1. Portanto, o uso da água como solvente atrai a atenção como uma alternativa diante aos outros solventes para o refino do biogás, por efeito de apresentar benefícios no processo de remoção do dióxido de carbono.

Figura 1 – Torre absorvedora de CO₂ com água oriunda do sistema de resfriamento.



Fonte: Adaptado de Volkers (2016).

De acordo com Volkers (2016), a Figura 1 acima aponta um sistema em que inicialmente, na torre de resfriamento, a água quente é resfriada a partir do contato com o ar. Posteriormente, este fluido é bombeado para a coluna de absorção de CO₂ para que seja utilizado como absorvente, e assim remova o dióxido de carbono. Após esta coluna, a água passa pelo trocador de calor para resfriar determinado fluido de processo e então é devolvida para a torre de resfriamento. Vale ressaltar que a utilização da água efluente da torre de resfriamento como alimentação da torre absorvedora também tem outros estudos como, o controle de pH e corrosividade da água a partir do contato com CO₂, já que está relacionado à solubilidade e a formação do ácido carbônico.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi o de simular no *software* Aspen Plus® e o de analisar a influência das variáveis de processo (vazão de solvente alimentado, pressão e temperatura da coluna) de uma coluna recheada para absorção do CO₂ em unidades de refino do biogás. Além disso, serão propostas melhorias na operação da coluna, de forma a maximizar a eficiência da remoção do dióxido de carbono, potencializar a pureza do biogás tratado e reduzir os custos operacionais. Deve-

que o modelo NRTL era o mais adequado para pressões de até 10 bar, já que a maioria dos componentes envolvidos são polares. Por isso a escolha do modelo NRTL para as simulações utilizadas no presente trabalho.

O intuito do presente trabalho foi o de analisar as influências das variáveis operacionais como, a vazão de solvente alimentado, a pressão e temperatura da torre, e seus respectivos impactos sobre a remoção do CO₂ e a pureza do biometano que deixa a torre. Então, para realizar as simulações, inicialmente a composição do biogás alimentado e os dados operacionais de entrada coletados foram os mesmos utilizados por Seman e Harun (2019), e são descritos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Composição de entrada do biogás no processo.

Composição do biogás de entrada	Fração molar (%)
CH ₄	60
CO ₂	38,9
O ₂	0,5
N ₂	0,5
H ₂ S	300 ppm

Fonte: Seman e Harun (2019).

Tabela 2 - Dados operacionais simulados no trabalho base.

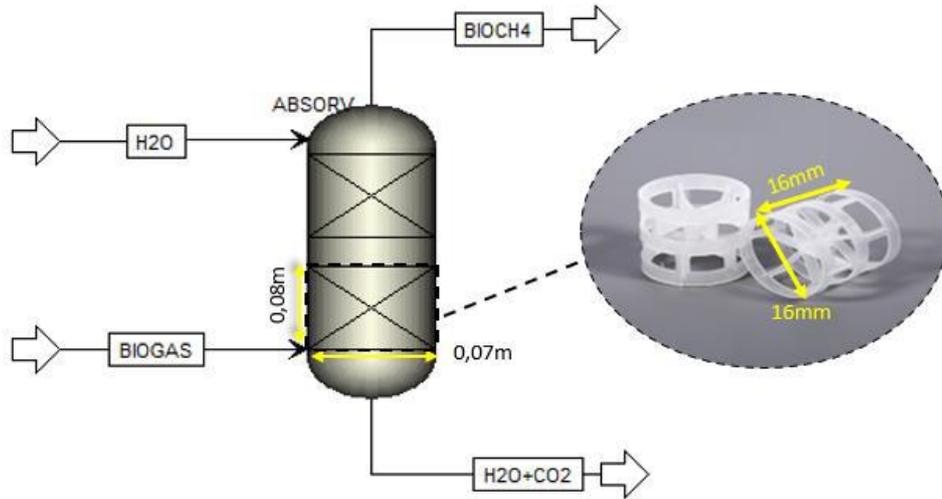
Parâmetros operacionais	Valores
Pressão da absorvedora (bar)	10
Temperatura da absorvedora (°C)	20
Número de estágios teóricos da torre	18
Vazão total de entrada do biogás (Kg/h)	604,6
Vazão total de entrada da água (Kg/h)	5000

Fonte: Seman e Harun (2019).

Deve-se salientar que tanto o trabalho de Cozma *et al.* (2014) como de Seman e Harun (2019) abordaram o uso de uma torre absorvedora empacotada, porém em nenhum deles foram apresentadas as dimensões da coluna e nem as características do tipo e dimensões do recheio utilizado, o que dificultou o andamento das simulações realizadas.

Assim, com base em dados da literatura e nas dimensões da torre absorvedora empregada no trabalho de Lima *et al.* (2021), as simulações das variáveis no presente trabalho foram consideradas para uma coluna vertical cujo diâmetro da seção recheio e da torre é de 0,07m e a altura da seção de recheio é 0,08m, como pode ser ilustrado na Figura 3. Além do mais, para aumentar a transferência de massa do contato gás-líquido visando uma menor perda de carga e menor custo do recheio, a torre foi simulada com o recheio randômico de anéis de Pall com dimensões de 16mm de altura e 16mm de diâmetro, para valores fixos no banco de dados do simulador, já que, segundo Norton (1977), para diâmetros da coluna menores que 0,3m é recomendado recheios menores que 25mm.

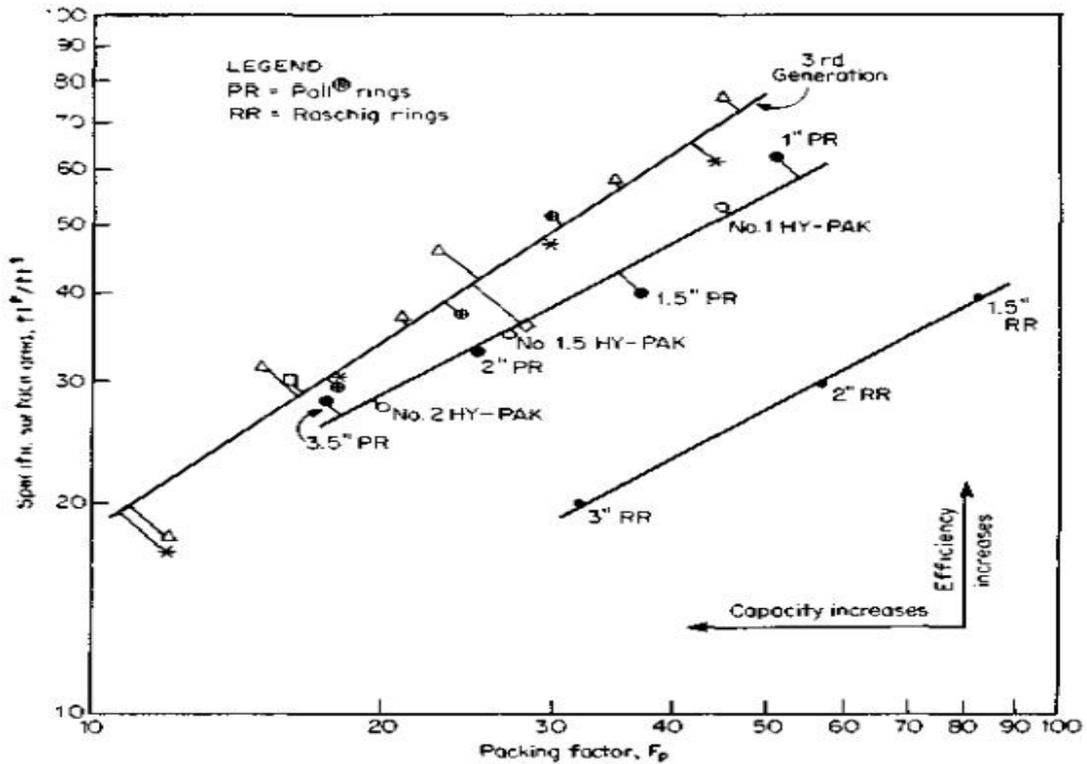
Figura 3 – Ilustração de uma torre absorvedora utilizada nas simulações e as dimensões do recheio de Pall.



Fonte: Adaptado de Nanxiang Chemical Packing (2022).

Como nas simulações realizadas as temperaturas não foram elevadas, foi utilizado o recheio de anéis de Pall sendo este feito do material plástico por: tratar-se de um sistema com componentes corrosivos, apresentar um impacto ambiental mais favorável, possuir um menor custo e ser mais eficiente que alguns recheios como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Comparação da performance do anel de Raschig (RR) e do anel de Pall (PR).



Fonte: Kister *et al.* (1992).

Segundo Kister *et al.* (1992) e Caldas *et al.* (2003), na Figura 4 acima, é possível perceber o anel de Pall possui uma maior área de contato e, conseqüentemente, uma maior eficiência e capacidade em relação ao anel de Raschig, este que apesar de ser mais antigo ainda é utilizado devido ao seu baixo custo.

Algumas principais considerações também foram assumidas no simulador para a torre absorvedora. Dentre as mais importantes pode-se citar as seguintes:

- Foi utilizado o bloco “ABSBR2” do modelo “Radfrac” para coluna de absorção, sem condensador e sem refeedor;
- O refluxo foi considerado zero;
- A corrente de alimentação líquida possuiu somente água pura (livre de soluto);
- O fluxo gás-líquido foi em contracorrente;
- A pressão e a temperatura se mantiveram constante durante toda a coluna;
- O soluto transferido entre as fases não alterou as vazões do gás e do líquido;
- O sistema foi considerado binário para os componentes de Henry;
- Cada estágio foi considerado como ideal;
- Foi estabelecido 60 iterações para convergência do equipamento;
- O modelo utilizado na absorvedora foi o de equilíbrio.

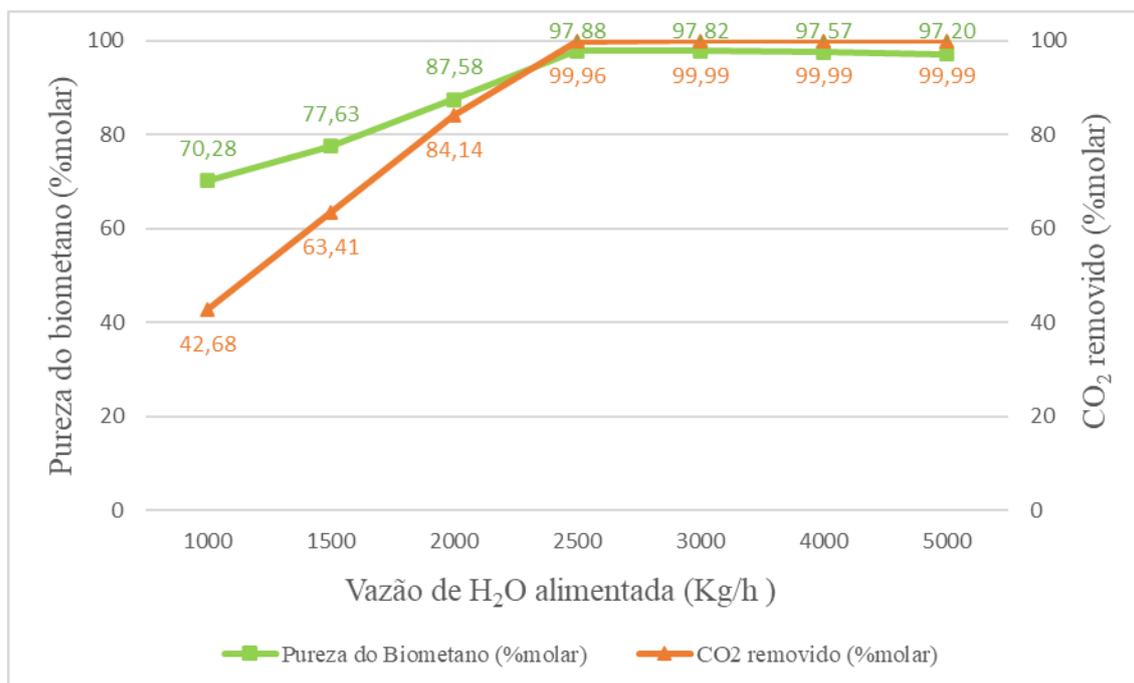
3. Resultados e Discussão

A partir dos dados iniciais retirados dos trabalhos já citados, foi feita a simulação no Aspen Plus[®], obtendo-se, consecutivamente, dados e gráficos da influência da vazão de água alimentada, da pressão e da temperatura da torre sobre as principais respostas, como a pureza de metano no biogás tratado (biometano) e na quantidade de CO₂ removida no processo. A seguir serão descritos os efeitos observados devido as simulações realizadas, sendo que os gráficos apresentados relacionam tanto a pureza do biometano como o CO₂ removido com o parâmetro analisado.

3.1 Efeito da vazão de água alimentada

Inicialmente, foi mantido os valores da pressão e temperatura constantes de acordo com a Tabela 2, variando-se somente a vazão de absorvente alimentado, na faixa entre 1000 e 5000 Kg/h, como mostra a Figura 5.

Figura 5 –Variação da vazão de absorvente alimentado e seu impacto nas respostas.



Fonte: Autores.

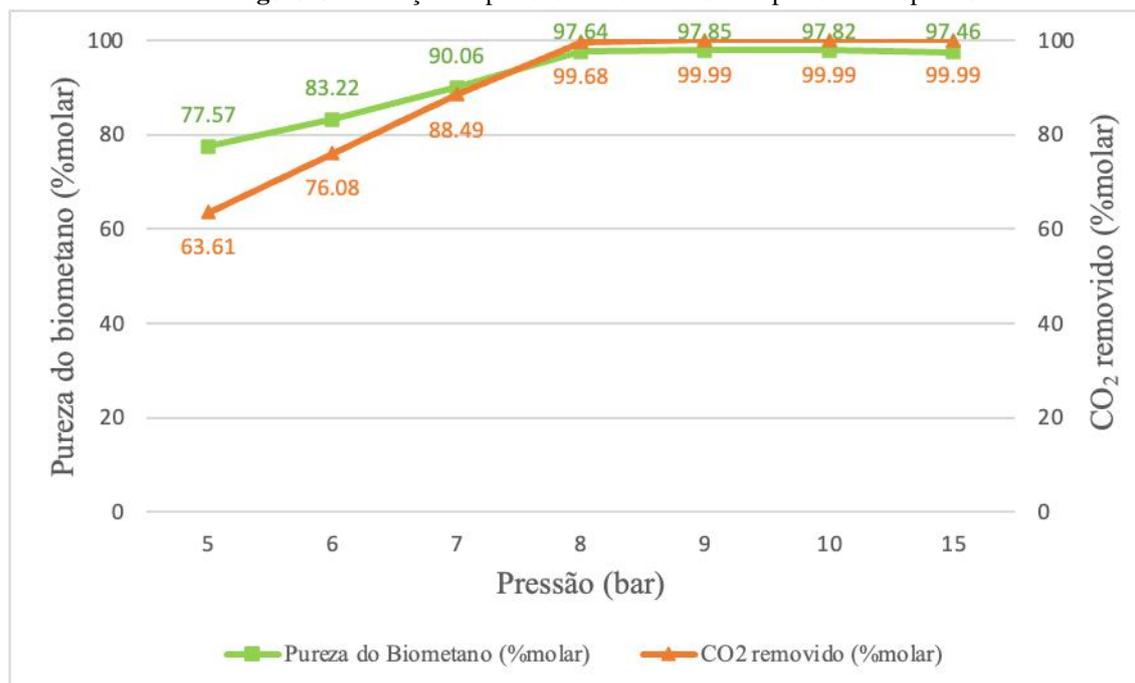
Assim, de acordo com a Figura 5 acima, foi possível avaliar que ao aumentar a vazão de água até 2500 Kg/h, houve um acréscimo considerável na pureza do biometano e maior ainda na quantidade de CO₂ removida. Após 2500 Kg/h, os valores dessas respostas não variaram tanto, porém a pureza do biometano sofreu pequenas reduções, já que com valores elevados de vazão ocorria também a solubilização do metano.

Logo, considerando o equilíbrio entre eficiência e custo, o valor ótimo para vazão de água alimentada foi de 3000 Kg/h, pois foi esta vazão que apresentou melhores valores em ambas as respostas (pureza do biogás e remoção do CO₂). Em concordância com Kapoor *et al.* (2017), o aumento da vazão é justificado por intensificar a quantidade de moléculas de água para dissolver o CO₂, conseqüentemente elevando a área de transferência de massa e a eficiência, e aumentando o custo com absorvente.

3.2 Efeito da pressão

Com a vazão ótima de solvente alimentado definida e mantendo-se a temperatura constante (Tabela 2), foi variada a pressão da coluna utilizando uma faixa entre 5 e 15 bar, como apresenta a Figura 6.

Figura 6 –Variação da pressão da coluna e seu impacto nas respostas.



Fonte: Autores.

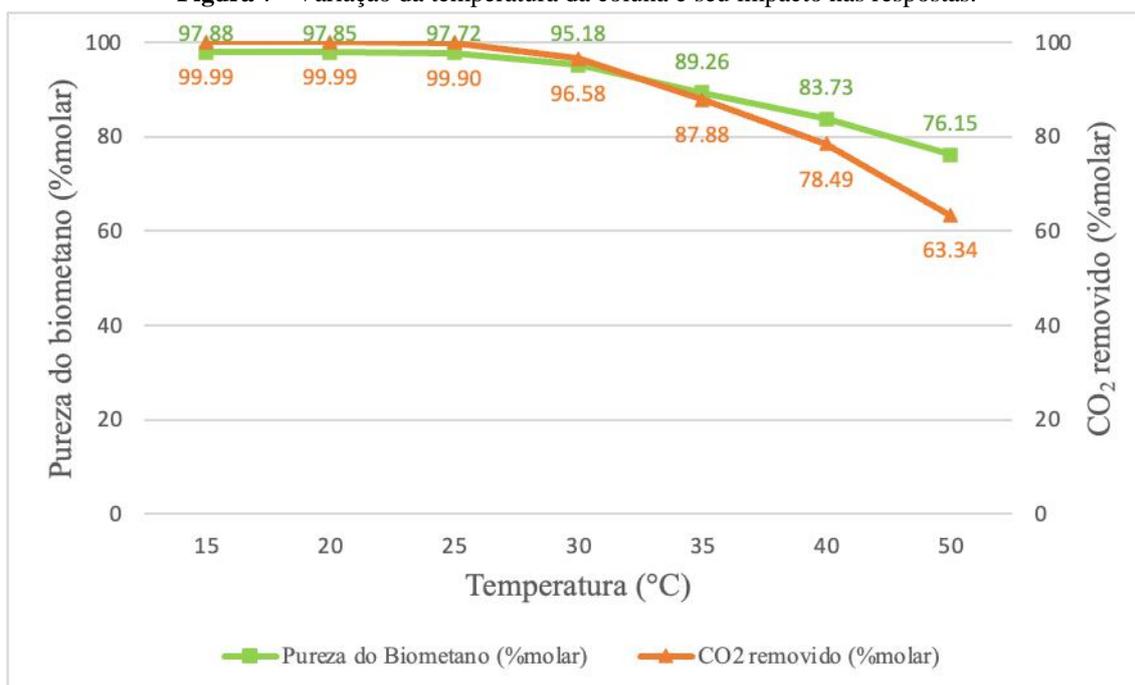
Assim, conforme a Figura 6 acima, ao aumentar a pressão até 8 bar, a pureza do biometano e a remoção do dióxido de carbono aumentaram consideravelmente. De acordo com Bashar (2018), isto é justificado pela lei de Henry, ou seja, o aumento da pressão provoca o aumento da solubilidade do CO₂ na água, em razão de elevar a frequência e intensidade das colisões das moléculas gasosas. Logo, mais moléculas de CO₂ penetram o filme líquido, e conseqüentemente aumenta a eficiência da remoção. Porém, observa-se que após 8 bar, os valores das respostas não variaram muito, apresentando apenas uma pequena redução para valores superiores a 10 bar. Isso ocorre devido a solubilização de pequenas moléculas de metano em altas pressões e à imprecisão do modelo NRTL para pressões a partir de 10 bar.

Portanto, o valor ótimo da pressão considerado obtido no presente trabalho foi o de 9 bar, por apresentar um alto valor de pureza do biometano e de remoção do CO₂ quando comparado com as outras pressões, com um custo operacional não tão elevado, já que o aumento da pressão normalmente acarreta o aumento do custo energético.

3.3 Efeito da temperatura

Com os valores ótimos para a vazão do absorvente alimentado e a pressão da coluna já definidos nos itens anteriores, a temperatura da absorvedora foi variada na faixa entre 15 e 50°C, como mostra a Figura 7.

Figura 7 –Variação da temperatura da coluna e seu impacto nas respostas.



Fonte: Autores.

Conforme a Figura 7 acima, foi possível analisar que entre 15°C e 25°C os valores de ambas as respostas diminuíram muito pouco, porém para temperaturas acima de 30°C, esses valores reduziram significativamente. De acordo com Bashar (2018) e Cozma *et al.* (2014), o fenômeno ocorrido pode ser explicado pela lei de Henry, já que o aumento da temperatura provoca a redução da solubilidade dos gases na água, em razão do aumento da agitação molecular do líquido e dos gases. Assim, mais moléculas de CO₂ dissolvidas abandonam o filme líquido, dificultando assim a solubilidade.

Logo, o valor ótimo para temperatura considerado foi de 15°C, pois apresentou um alto valor na pureza do biometano e uma elevada remoção do dióxido de carbono quando comparado às outras temperaturas, não apresentando altos custos energéticos.

4. Conclusão

Após definir e analisar os valores para as variáveis citadas na simulação deste trabalho, foi feita uma comparação com os dados do trabalho base realizado por Seman e Harun (2019), como mostra a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Comparação dos resultados das simulações realizadas.

Parâmetros operacionais	Seman e Harun (2019)	Presente trabalho
Número de estágios teóricos da torre	18	18
Vazão total do biogás alimentado (Kg/h)	604,6	604,6
Vazão total de água alimentada (Kg/h)	5000	3000
Pressão da absorvedora (bar)	10	9
Temperatura da absorvedora (°C)	20	15
Pureza do biometano (%molar)	97,6	97,88
CO ₂ removido (%molar)	99,93	99,99

Fonte: Autores.

Portanto, foi possível observar que, para todas as simulações, mantendo-se fixas a vazão e composição do biogás alimentado, o presente trabalho apresentou uma menor vazão de absorvente, uma menor pressão e temperatura da coluna, obtendo-se maiores valores tanto na remoção do CO₂ como na pureza do biometano. Porém, deve-se salientar que ambas as simulações apresentaram uma boa concordância e valores bastantes satisfatórios da pureza do metano no biogás tratado e da remoção de CO₂ do biogás, tendo em vista que uma porcentagem acima de 95% já é aceitável para o uso do biogás tratado em veículos automotivos (Nock *et al.*, 2014).

Diante das diversas tecnologias empregadas para o tratamento do biogás, foi escolhido o método de absorção física HPWS por apresentar grande efetividade nesse processo. Assim, no presente estudo, foi simulado no *software* Aspen Plus® uma coluna empacotada com anéis de Pall para absorção do CO₂ presente no biogás, empregando a água como solvente. A simulação deste estudo permitiu determinar a grande influência das variáveis sobre os resultados, em que foi estabelecido valores ótimos para uma vazão de solvente igual a 3000 Kg/h, uma pressão de 9 bar e uma temperatura de 15°C, obtendo-se uma pureza do biometano de 97,88% (molar) e uma remoção do dióxido de carbono de 99,99% (molar).

Considerando o trabalho de Seman e Harun (2019) como um estudo base para comparação acerca dos dados do processo, foi possível estabelecer uma ótima concordância dos resultados, em que ao relacionar, o presente trabalho obteve uma melhor eficiência do processo de separação do CO₂ do biogás, com um custo operacional menor (menor valor das variáveis). O motivo disso pode estar relacionado, principalmente, ao tipo e dimensão do recheio, ou provavelmente com efeitos provocados por fenômenos operacionais como inundação, arraste, queda de pressão, etc.

Portanto, após a simulação da coluna com anéis de Pall para absorção do dióxido de carbono usando água como solvente neste estudo, torna-se possível a realização de outros estudos futuros como: *scale-up* e estudo hidrodinâmico da coluna (inundação, dispersão axial e *hold-up*), estudo de viabilidade econômica no próprio Aspen Plus® (*Aspen Process Economic Analyzer – APEA*), avaliação dos tipos de recheios, realização do planejamento estatístico experimental, estudos de depósitos de patentes desse tema, entre outros.

Agradecimentos

Este trabalho teve apoio da Universidade Salvador (UNIFACS / Brasil) para obtenção do título de Bacharel de Mitsuo Watanabe Neto.

Referências

- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Tarannum, K., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Nuzhat, S., Kumar, P.S., Vo, D.V.N., Lichtfouse, E., & Mahlia, T. M. I. (2021). Biogas upgrading, economy and utilization: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4137-4164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01292-x>.
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology advances*, 36(2), 452-466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>.
- Angelidaki, I., Xie, L., Luo, G., Zhang, Y., Oechsner, H., Lemmer, A., Munoz, R., & Kougias, P. G. (2019). Biogas upgrading: current and emerging technologies. *Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels*, 817-843. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00033-6>.
- Aspen Plus® (1999). *User guide Aspen Plus steady state simulation*, v.10. Aspen Technology Inc.
- Bashar, M. A. (2018). *Biogas quality improvement using water wash and phosphorus recovery as struvite in Jones Island WWTP* (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Milwaukee).
- Caldas, J. N. & Lacerda, A. I., (2003). *Internos de torres: pratos & recheios*. Ed. UERJ, 466.
- Chew, K. R., Leong, H. Y., Khoo, K. S., Vo, D. V. N., Anjum, H., Chang, C. K., & Show, P. L. (2021). Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 2921-2939. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01220-z>.
- Cozma, P., Ghinea, C., Mămăligă, I., Wukovits, W., Friedl, A., & Gavrilescu, M. (2013). Environmental impact assessment of high pressure water scrubbing biogas upgrading technology. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 41(9), 917-927. DOI: <https://doi.org/10.1002/clen.201200303>.

- Cozma, P., Wukovits, W., Friedl, A., & Gavrilesco, M. (2012). Biogas upgrading using water scrubbing technology. *Chem Eng Tome*.
- Cozma, P., Wukovits, W., Mămăligă, I., Friedl, A., & Gavrilesco, M. (2013). Analysis and modeling of the solubility of biogas components in water for physical absorption processes. *Environmental engineering & management journal*.
- Cozma, P., Wukovits, W., Mămăligă, I., Friedl, A., & Gavrilesco, M. (2014). Modeling and simulation of high pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(2), 373-391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0787-7>.
- Dorf, R. C. (2004). *The Engineering Handbook*, Second Edition. CRC Press, EUA.
- Faramawy, S., Zaki, T., & Sakr, A. E. (2016). Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>.
- Gasparovic, C. L. M. (2014). *Simulação e controle de uma coluna de absorção para purificação de biogás: avaliação da viabilidade técnica e econômica do processo* (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná). <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12529>.
- Hoyer, K., Hultheberg, C., Svensson, M., Jernberg, J., & Nörregård, Ö. (2016). *Biogas upgrading-technical review*. <https://lup.lub.lu.se/record/9e1c64bd-efe6-4cc4-88d5-c79eab06fcc5>.
- IPCC (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf.
- Kapoor, R., Subbarao, P. M. V., Vijay, V. K., Shah, G., Sahota, S., Singh, D., & Verma, M. (2017). Factors affecting methane loss from a water scrubbing based biogas upgrading system. *Applied Energy*, 208, 1379-1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.017>.
- Kim, J. H., Lee, J. H., Lee, I. Y., Jang, K. R., & Shim, J. G. (2011). Performance evaluation of newly developed absorbents for CO₂ capture. *Energy Procedia*, 4, 81-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.01.026>.
- Kister, H. Z. (1992). *Distillation design*, First Edition. McGraw-Hill Book Company.
- Lima, J. C. F., Costa, J. C. da, Mattedi, S., & Góis, L. M. N. de . (2021). Flooding and loading in packed columns absorption. *Research, Society and Development*, 10(3), e29410312369. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.12369>.
- Lizarazu, M. S. D. (2016). *Otimização multiobjetivo aplicada à eficiência energética de torres de resfriamento*. <http://www.bdt.uerj.br/handle/1/11839>.
- Magalhães, E. A., de Souza, S. N. M., de Lima Afonso, A. D., & Ricieri, R. P. (2004). Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO₂ contido no biogás. *Acta Scientiarum. Technology*, 26(1), 11-19. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v26i1.1537>.
- Martins, P. R. L. (2011). *Avaliação do processo de absorção de CO₂ com aminas utilizando o HYSYS®* (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado)–Universidade Federal do Rio de Janeiro). <http://epqb.eq.ufjf.br/download/avaliacao-do-processo-de-absorcao-de-co2-com-aminas-utilizando-hysys.pdf>.
- Mello, L. C. D. (2013). *Estudo do processo de absorção de CO₂ em soluções de aminas empregando-se coluna recheada* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). DOI: <https://doi.org/10.11606/T.3.2013.tde-18082014-114022>.
- Mumford, K. A., Smith, K. H., Anderson, C. J., Shen, S., Tao, W., Suryaputradinata, Y. A., Qader, A., Hooper, B., Innocenzi, R.A., Kentish, S.E., & Stevens, G. W. (2012). Post-combustion capture of CO₂: results from the solvent absorption capture plant at Hazelwood power station using potassium carbonate solvent. *Energy & fuels*, 26(1), 138-146. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef201192n>.
- Nanxiang Chemical Packing (2022). *Plastic Pall Ring*. <http://www.nxpacking.com/plastic-random-packing/plastic-pall-ring.html>.
- Nock, W. J., Walker, M., Kapoor, R., & Heaven, S. (2014). Modeling the water scrubbing process and energy requirements for CO₂ capture to upgrade biogas to biomethane. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(32), 12783-12792. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie501280p>.
- Norton (1977). *Design Information for Packed Towers*. Bulletin DC-11, Akron.
- Patuzzo, G. S. (2019). *Otimização e análise do processo de absorção por water scrubbing no refino de biogás*.
- Pereira, A. S., Shitsuka D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. UFSM. https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica_final.pdf.
- Rasi, S., Läntelä, J., & Rintala, J. (2014). Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process. *Fuel*, 115, 539-543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.082>.
- Rodrigues, M. I., Iemma, A. F. (2014). *Planejamento Experimental e otimização de processos*, 3ª edição. Campinas, SP.
- Seman, N. A., & Harun, N. (2019, November). Simulation of pressurized water scrubbing process for biogas purification using Aspen Plus. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 702, No. 1, p. 012040). IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/702/1/012040>.
- Shibata, F. S. (2017). *Absorção de gás carbônico para beneficiamento de biogás utilizando carbonatos em coluna recheada* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2017.tde-24102017-112603>.
- Struk, M., Kushkevych, I., & Vítězová, M. (2020). Biogas upgrading methods: recent advancements and emerging technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(3), 651-671. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09539-9>.
- Vilela, F.H. (2014). *Influência do posicionamento do distribuidor de líquido na eficiência de absorção de dióxido de carbono em torre de absorção* (Master dissertation, Universidade Santa Cecília, São Paulo). https://unisanta.br/arquivos/mestrado%5Cmecanica%5Cdissertacoes%5Cdissertacao_fernando_henrique_vilela.pdf.

Volkers, B. D. (2016). *Carbon dioxide for calcite scale control in cooling water systems* (Doctoral dissertation, Faculty of Science and Engineering). https://fse.studenttheses.ub.rug.nl/15531/2/Master_Thesis_Beerd-Dries_Volk_1.pdf.

Wall, D. M., Dumont, M., & Murphy, J. D. (2018). Green gas: Facilitating a future green gas grid through the production of renewable gas. *IEA Bioenergy*. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/04/green_gas_web_end.pdf.

Xu, Y., Huang, Y., Wu, B., Zhang, X., & Zhang, S. (2015). Biogas upgrading technologies: Energetic analysis and environmental impact assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(1), 247-254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2014.09.048>.