



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Guilherme Cancelier dos Santos

**Análise experimental do tempo de residência empregando um protótipo em
escala laboratorial visando a adsorção de CO₂**

ARARANGUÁ
2020

Guilherme Cancelier dos Santos

**Análise experimental do tempo de residência empregando um protótipo em
escala laboratorial visando a adsorção de CO₂**

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Energia e Sustentabilidade da
Universidade Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Mestre em Energia e
sustentabilidade
Orientador: Prof. Dra. Elise Sommer Watzko
Coorientador: Prof. Dr. Thiago Fernandes de
Aquino

Araranguá

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Guilherme Cancelier dos

Análise experimental do tempo de residência empregando um protótipo em escala laboratorial visando a adsorção de CO₂ / Guilherme Cancelier dos Santos ; orientadora, Elise Sommer Watzko, coorientador, Thiago Fernandes de Aquino, 2020.

99 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2020.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Captura de CO₂. 3. Tempo de residência. 4. Zeólitas. 5. Termoelétricas. I. Sommer Watzko, Elise . II. Fernandes de Aquino, Thiago . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Guilherme Cancelier dos Santos

**Análise experimental do tempo de residência empregando um protótipo em
escala laboratorial visando a adsorção de CO₂**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Tatiana Gisset Pinéda Vásquez, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Elaine Virmond, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Natan Padoin, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em energia e sustentabilidade

Prof. Dr. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes
Coordenador do Programa

Prof. Dra. Elise Sommer Watzko
Orientadora

Araranguá, 28 de fevereiro de 2020.

Este trabalho é dedicado ao senhor Deus de bondade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha mãe, grande incentivadora, ao meu pai e aos meus irmãos pelo apoio e carinho recebidos.

Minha namorada Luana, pela compreensão e companheirismo.

Minha família, que mesmo não atuando diretamente, se fez presente nas dificuldades.

Ao meu coorientador, Thiago Aquino, pela parceria, compreensão, empolgação e auxílio para a execução deste trabalho. A esse laço de amizade que pretendo conservar para a vida.

Minha orientadora, Elise Watzko, pela coordenação dos trabalhos e mentora nas horas de dúvidas e dificuldades.

Aos professores ao longo do curso, colegas, amigos e aos integrantes do colegiado pleno deste programa, o qual tive a honra de participar.

Ao coordenador do CTSATC, Luciano Biléssimo, pela permissão das pesquisas e subsídios para o desenvolvimento dos trabalhos.

A Daniel Kesting, pelas discussões de resultados, contribuição na construção das planilhas, tratamento de dados e construção de gráficos.

Ao colega George Clarck Blayer, pela parceria na realização dos testes e coleta de resultados.

A Edson e Luan pelos conceitos e instruções no uso dos softwares de aquisição.

A Flávio Michels Bianchi pela ajuda na montagem do protótipo.

Aos colegas, Tainá Domingos, Raiane e Sabrina pelo auxílio no laboratório.

A Beatriz Bonetti e outros tantos colegas, cujo as conversas no intervalo tornaram os momentos mais prazerosos e descontraídos.

Aos funcionários da SATC e UFSC que de uma forma ou de outra nos alegam e nos ajudam tanto em nossa caminhada.

Capes pela bolsa concedida e pelo fomento dos programas de pós graduação no Brasil, em especial o programa de pós graduação em energia e sustentabilidade (PPGES).

Gostaria que você soubesse que existe dentro de si uma força capaz de mudar sua vida. Basta que lute e aguarde um novo amanhecer. (Margareth Thatcher)

RESUMO

A crescente demanda por energia com processos industriais mais elaborados e a utilização de automóveis elétricos não permite descartar nenhuma fonte de geração de energia. Para garantir fornecimento e a segurança das matrizes, as termoelétricas precisam se modernizar e incorporar sistemas de captura de CO₂. Uma das tecnologias que se destaca é com a utilização de zeólitas, esta apresenta menor consumo de energia e maior eficiência, alcançando os mesmos resultados de captura que outros processos convencionais. Para que isso seja possível, o tempo de residência das zeólitas no leito de adsorção é uma importante característica que precisa ser avaliada. Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar o tempo de residência de zeólitas em uma coluna de adsorção de uma planta piloto de captura de CO₂ em três diferentes configurações operacionais de leito: (i) sem ar, (ii) com ar, (iii) com mistura gasosa de CO₂ e N₂. Para cada configuração foram utilizadas três tipos de placas perfuradas variando sua área de abertura e quantidade de furos. Cada conjunto de placa foi testada em diferentes vazões de sólidos (zeólitas) e em diferentes vazões de fluido. No intuito de avaliar a remoção de CO₂ foi injetado gás em contracorrente simulando os gases de exaustão em uma planta de captura na proporção de 14% de CO₂ e 86% de N₂. Os resultados mostraram que é possível alcançar cerca de 13 segundos de tempo de residência com modificações simples no leito e que a adsorção acontece de forma eficaz, sendo que com 10,65 segundos se tem um percentual de remoção de CO₂ de aproximadamente 95,5 % e que por volta dos 15 segundos incríveis 99,33 % de captura de CO₂. Ao tornar a planta viável com adsorção através das zeólitas, pode-se conseguir resultados potenciais que devem ser analisados em trabalhos futuros, como a redução expressiva das penalidades energéticas da regeneração de líquidos, maior eficiência da usina térmica e menores custos de energia para os consumidores.

Palavras-chave: Captura de CO₂, Tempo de residência, Zeólitas, Eficiência energética, Termoelétrica.

ABSTRACT

The growing demand for energy with more elaborate industrial processes and the use of electric automobiles does not allow to discard any source of energy generation. To ensure a supply of energy and security of the matrices, such as thermoelectric plants necessary to modernize and incorporate CO₂ capture systems. One of this technologies that show the use of zeolites, presents less energy consumption and greater efficiency, achieving the same results of capture of other used applications. For this to be possible, the residence time of the adsorption readings is an important resource that needs to be evaluated. Thus, this work aimed to analyze the residence time of zeolites in an adsorption column of a CO₂ capture pilot plant in three different bed operation configurations: (i) without air, (ii) with air, (iii) with a gas mixture of CO₂ and N₂. For each configuration, three types of perforated plates were used, varying their opening area and number of holes. Each set of plates was tested on different strength flow (zeolites) and different fluid flow. In the intention to evaluate the removal of CO₂ was injected into the gas, simulating the exhaust gases in a capture plant in the proportion of 14% CO₂ and 86% N₂. The displayed results, which are possible, reach about 13 seconds of residence time with simple changes in the bed, that the adsorption occurs effectively, being 10.65 seconds if a CO₂ removal percentage of approximately 95.5%, and which returns to an incredible 15 seconds 99.33% CO₂ capture. By making a plant viable with adsorption through zeolites, results can be obtained that must be analyzed in future works, such as a significant reduction in energy penalties for the regeneration of recordings, greater efficiency of the economic plant and lower energy costs for consumers.

Keywords: CO₂ capture, Residence time, Zeolites, Energy efficiency, Thermoelectric.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação de cada fonte emissora em porcentagem (2017)	16
Figura 2 – a) Diagrama esquemático de geração de energia com base em combustíveis fósseis; b) Diagrama esquemático de captura pós-combustão; c) Diagrama esquemático de captura pré-combustão; d) Diagrama esquemático da oxidação.	26
Figura 3 – Elementos de uma usina termoelétrica pós-combustão	27
Figura 4 – Curvas da capacidade de adsorção de CO ₂ em uma atmosfera de mistura CO ₂ (14 %) e N ₂ (86 %).	32
Figura 5 – Isotermas de adsorção pura de CO ₂ (preto) e N ₂ (vermelho) à 25 °C (círculo), 50 °C (quadrado) e 75 °C (triângulo). Os símbolos representam os dados experimentais e linhas tracejadas representam o reajuste do modelo <i>Sips</i>	33
Figura 6 – Diagrama de leito de adsorção de uma planta de captura de CO ₂	38
Figura 7 – Processos e tecnologias selecionadas para captura de CO ₂	41
Figura 8 – Esquema da planta piloto de captura de CO ₂	43
Figura 9 – Estufa	44
Figura 10 – TGA	45
Figura 11 – Dosador contínuo de zeólitas.	47
Figura 12 – Esquema do leito de adsorção e placas defletoras	49
Figura 13 – Protótipo do leito de adsorção	50
Figura 14 – Parte superior do protótipo do leito de adsorção	51
Figura 15 – Seção de adsorção do leito vista de cima (detalhe para as placas furadas-defletores)	52
Figura 16 – Rotâmetro e regulador de pressão	56
Figura 17 – Esquema de aquisição de dados	62
Figura 18 – Amplificador para célula de carga	64
Figura 19 – Placa de aquisição	65
Figura 20 – Analisador de gases online	66
Figura 21 – Esquema do teste experimental.	67
Figura 22 – Planilha de cálculo empregada para cada teste experimental	68
Figura 23 – Gráfico das vazões (massa que sai do sistema e massa adicionada) ...	70
Figura 24 – Gráfico do escoamento no sistema	72
Figura 25 – Gráfico da análise de adsorção	73

Figura 26 – Processo de inundação do leito	75
Figura 27 – Gráfico dos testes na placa 1 – sem injeção de ar.....	77
Figura 28 – Gráfico dos testes na placa 2 – sem injeção de ar.....	78
Figura 29 – Gráfico dos testes na placa 3 – sem injeção de ar.....	79
Figura 30 – Comparação dos testes sem ar e com ar – placa 1	83
Figura 31 – Comparação dos testes sem ar e com ar – placa 2	83
Figura 32 – Comparação dos testes sem ar e com ar – placa 3	84
Figura 33 – TR e remoção de CO ₂ no anel 11 mm em diferentes placas.....	91
Figura 34 – TR e remoção de CO ₂ no anel 12 mm em diferentes placas.....	91
Figura 35 – TR e remoção de CO ₂ no anel 13 mm em diferentes placas.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores usados para o cálculo de vazão proporcional.....	58
Quadro 2 – Valores usados para o cálculo de correção do rotâmetro.....	61
Quadro 3 – Valores calculados para correção do rotâmetro.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre amina e zeólitas do tipo A e 13 X.....	31
Tabela 2 – Processos de operação do leito na adsorção com sólidos.....	34
Tabela 3 – Dimensões gerais da planta piloto.....	43
Tabela 4 – Capacidade de adsorção da zeólita comercial 13X (14 % de CO ₂ e 86 % de N ₂)	46
Tabela 5 – Propriedades da zeólita comercial 13 X.....	46
Tabela 6 – Composição da zeólita comercial 13 X.....	46
Tabela 7 – Configurações do dosador	48
Tabela 8 – Dimensões internas do protótipo do leito de adsorção.....	49
Tabela 9 – Dimensões gerais das placas.....	52
Tabela 10 – Configurações das placas	53
Tabela 11 – Configurações experimentais para os testes sem injeção de ar	53
Tabela 12 – Configurações experimentais para os testes com injeção de ar	54
Tabela 13 – Configurações experimentais para os testes com injeção de mistura CO ₂ e N ₂	54
Tabela 14 – Configurações experimentais para os testes com injeção de mistura CO ₂ e N ₂ com 30 placas	55
Tabela 15 – Vazões de sólidos (zeólitas).....	57
Tabela 16 – Vazões de ar e da mistura CO ₂ e N ₂	59
Tabela 17 – Especificações da célula de carga	63
Tabela 18 – Especificações da fonte de alimentação	64
Tabela 19 – Placa de aquisição USB 6001	65
Tabela 20 – Resultados dos testes sem injeção de ar.....	74
Tabela 21 – Resultados dos testes com injeção de ar.....	80
Tabela 22 – Comparação dos resultados sem e com injeção de ar.....	82
Tabela 23 – Características dos testes sem ar e com ar	85
Tabela 24 – Resultados com injeção de CO ₂ e N ₂ placa 1 simples	86
Tabela 25 – Resultados com injeção de CO ₂ e N ₂ placa 1 dupla.....	86
Tabela 26 – Resultados com injeção de CO ₂ e N ₂ placa 2 simples	86
Tabela 27 – Resultados com injeção de CO ₂ e N ₂ placa 2 dupla.....	87
Tabela 28 – Resultados com injeção de CO ₂ e N ₂ placa 3 simples	87

Tabela 29 – Resultados com injeção de CO ₂ e N ₂ placa 3 dupla.....	88
Tabela 30 – Comparação dos tempos de residência	88
Tabela 31 – Resultados de remoção de CO ₂	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

US\$ – (Dólares americanos)

CCS – *Carbon capture and storage* (Captura e armazenamento de carbono)

PSA – *Pressure swing adsorption* (Variação de pressão na adsorção)

PTSA – *Pressure temperature swing adsorption* (Variação de pressão e temperatura na adsorção)

VTSA – *Vacuum temperature swing adsorption* (Variação de vácuo e temperatura na adsorção)

MBTSA – *Moving bed temperature swing adsorption* (Variação de pressão na adsorção em leito móvel)

TSA – *Temperature swing adsorption* (Variação de temperatura na adsorção)

RTD – *Residence time* (Tempo de residência)

SATC – Associação Beneficente da Indústria Carbonífera

CTSATC – Centro Tecnológico da SATC (Associação Beneficente da Indústria Carbonífera).

PP – Planta Piloto

IGCC – *Integrated gasification combined cycle* (Ciclo combinado de gaseificação integrado)

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂ – Dióxido de carbono

SO_x - Óxidos de enxofre

NO_x - Óxidos de nitrogênio

HCl – Ácido clorídrico

HF – Ácido fluorídrico

N₂ – Gás nitrogênio

t-CO₂ – Tonelada de dióxido de carbono

H₂ – Gás hidrogênio

Mt – Mega tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	19
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3	ESTADO DA ARTE.....	23
3.1	CAPTURA DE CO ₂	23
3.1.1	Processos de captura de CO₂	25
3.2	TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE CO ₂	28
3.2.1	Adsorção de CO₂ por sólidos.....	30
3.3	PROCESSOS DE OPERAÇÃO DO LEITO NA ADSORÇÃO COM ZEÓLITAS.....	34
3.4	TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS ZEÓLITAS NO LEITO DE ADSORÇÃO	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	A PLANTA PILOTO DE CAPTURA DE CO ₂ DO CTSATC.....	42
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA ZEÓLITA 13 X	44
4.3	PROTÓTIPO PARA TESTES DE CAPTURA DE CO ₂	47
4.3.1	Configuração do alimentador de zeólitas	47
4.3.2	Protótipo do leito de adsorção.....	48
4.3.3	Configurações do leito.....	51
4.3.4	Variáveis de operação.....	55
4.3.4.1	<i>Pressão</i>	55
4.3.4.2	<i>Temperatura.....</i>	56
4.3.4.3	<i>Vazões de sólidos e de fluidos</i>	57
4.3.4.4	<i>Testes com injeção de mistura de CO₂ e N₂.....</i>	62
4.4	EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	62

4.4.1	Software e Sistema de aquisição de dados	62
4.4.2	Célula de Carga	63
4.4.3	Amplificador para célula de carga	64
4.4.4	Fonte de alimentação	64
4.4.5	Placa NI USB 6001	65
4.4.6	Analisador de gases online	65
4.5	METODOLOGIA DE TESTES	66
4.6	METODOLOGIA DE CÁLCULO	68
4.6.1	Metodologia para testes com injeção de CO₂ e N₂	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1	TESTES SEM INJEÇÃO DE AR	74
5.2	TESTES COM INJEÇÃO DE AR NA BASE	79
5.3	TESTES COM INJEÇÃO DE MISTURA CO ₂ E N ₂	85
6	CONCLUSÕES	93
7	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Desenvolver tecnologias de geração de energia com fontes renováveis e ampliar suas aplicações são ações extremamente necessárias para diversificação da matriz energética e complementação do sistema elétrico de qualquer nação. Contudo, as termoelétricas ainda permanecerão por longos anos, principalmente em regiões da Europa e ainda em diversos países como segurança do sistema elétrico, garantindo desenvolvimento de forma equilibrada.

O uso de termoelétricas possibilita a geração de energia de forma sólida e com alta flexibilidade, sendo fundamental para a matriz energética de qualquer país. Isso é favorecido pelos processos de queima de biomassa que possuem um viés mais sustentável e também pela tradição da utilização dos combustíveis fósseis como carvão e petróleo. O carvão, por exemplo, possui quantidade suficiente para atender a população mundial por mais 134 anos. (BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2018).

No Brasil 5,7% da energia primária total consumida vem do carvão mineral. No setor de geração de energia elétrica, 3,6% da matriz é proveniente de carvão, o que contabiliza aproximadamente um total de 16.257 GW/h (EPE, 2018). Ainda é preciso considerar regiões com poucos recursos hídricos, onde a presença de usinas térmicas é grande. Portanto, a modernização e manutenção dessas usinas é muito importante.

Na geração termoelétrica, em 2018, carvão e derivados tiveram participação de 12,9%, biomassa de 29,5%, gás natural de 37,7%, fonte nuclear de 9,1% e petróleo e derivados de 12,5% (EPE, 2018).

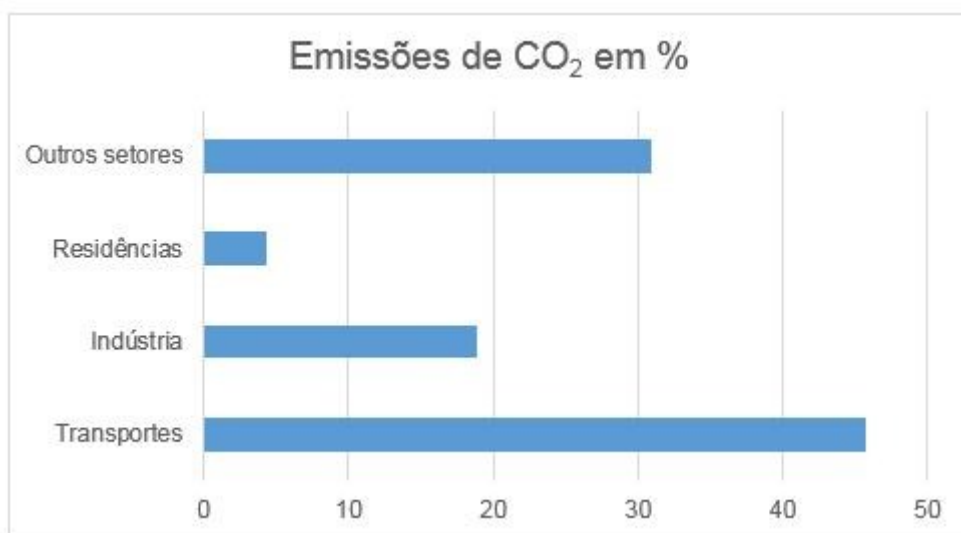
Como outras fontes de energia além do carvão também contribuem para a emissão de CO₂ para a atmosfera, um sistema de captura de CO₂ como o avaliado neste trabalho, pode ter seu campo de aplicação ampliado para outros combustíveis, como o gás liquefeito de petróleo, por exemplo.

Um importante emissor de CO₂ é o setor de transportes com aproximadamente 46% das emissões no Brasil. Como as plantas de captura de CO₂ são equipamentos relativamente grandes e que exigem certo cuidado de operação, minimizar a emissão dessa fonte se torna mais complexo. Entretanto, é preciso

relembrar que existe uma forte tendência de migração de um extenso setor de máquinas de combustão interna como os veículos de transporte terrestre passando para consumidores do setor elétrico. Para abastecer veículos elétricos a geração de energia terá que aumentar e se tornar ainda mais sólida, portanto, é possível que a presença de termoeletricas para garantir seguridade no suprimento, tanto de residências, indústrias, quanto de automóveis seja mantida.

A Figura 1 demonstra que no Brasil aproximadamente 18% das emissões são oriundas das indústrias e 31% de outros setores, tais como energético, agropecuário e serviços. Na geração termoeletrica em geral e em processos industriais, sistemas de captura de CO₂ poderiam ser utilizados para mitigar essas emissões.

Figura 1 – Participação de cada fonte emissora em porcentagem (2017).



Fonte : Adaptado de EPE (2018).

O setor de geração de energia corresponde a 16,7% das emissões de CO₂, sendo que da geração termoeletrica 21% das emissões são provenientes da queima de carvão mineral, 49% de gás natural, 1% de biomassa e 29% de petróleo e derivados (SEEG, 2016).

No ano de 2017, no Brasil foram emitidas para a atmosfera cerca de 435,8 MtCO₂. Quando comparado com outros países, o brasileiro emite 7 vezes menos que um norte americano e 3 vezes menos que um europeu. Entretanto, essa emissão só tende a crescer nos próximos anos e estima-se que em 2026 já serão 469 MtCO₂ (EPE, 2018).

Essas emissões trazem um dano ambiental em diversas esferas, como saúde, qualidade de vida e afetam os recursos naturais do planeta, além de resultar em alterações climáticas. Fatores como o rápido desenvolvimento global, a industrialização e urbanização, têm aumentado continuamente o consumo de combustíveis fósseis e processos de combustão, conduzindo a emissões de CO₂ (SHI et al., 2019).

As emissões tornaram-se motivo de grande preocupação, a China por exemplo, é o maior emissor de CO₂ do mundo, sendo que 63,7% de sua matriz energética é movida a carvão. Até 2030, as emissões de CO₂ da China serão equivalentes ao restante do total das emissões do mundo (LIU et al., 2019).

As emissões de CO₂ vêm aumentando desde o início da revolução industrial. Desde os anos 90 ocorreram duas grandes reuniões em todo o mundo, uma em Kyoto e outra em Paris, em 1997 e 2015, respectivamente. Nestas reuniões, tem sido sugerido cientificamente que a temperatura média global não deve aumentar mais de 2 °C, a fim de evitar resultados catastróficos. Para atingir essa meta, em todo o mundo as emissões de CO₂ devem ser reduzidas em pelo menos 50% até 2050 (AĞRALI; ÜÇTUĞ; TÜRKMEN, 2018).

A mudança climática global pode causar irreversíveis alterações ambientais, que representam uma enorme ameaça à sustentabilidade, desenvolvimento e recursos naturais. Para enfrentar o desafio da mudança climática global, reduzindo as emissões de CO₂, o meio ambiente e o desenvolvimento tornaram-se foco que atrai a atenção de acadêmicos e profissionais (SHI et al., 2019).

O desafio de reduzir os índices de emissões de dióxido de carbono para níveis muito mais baixos do que a realidade atual será superado não apenas com o emprego das energias limpas, mas também com o uso de tecnologias de captura em plantas de combustíveis fósseis já constituídas. Além disso, existem os processos de captura e utilização de carbono, seja para processos químicos, bem como para aquecimento e geração de energia. É importante a utilização das fontes tradicionais nas matrizes energéticas para garantir segurança no sistema no suprimento das energias renováveis, e isso é reforçado valorizando a flexibilidade de despacho das usinas térmicas e utilizando sistemas de captura de dióxido de carbono. Contudo, ainda

faltam incentivos para viabilizar essas tecnologias (KOYTSOUMPA; BERGINS; KAKARAS, 2018).

Além disso, existe toda uma cadeia industrial onde se destaca a importância dos equipamentos de captura e sua capacidade em reduzir e mitigar as emissões globais de CO₂ e contribuir para um mundo mais sustentável. Como por exemplo, os processos de queima de biomassa que também deverão crescer como fontes de geração de energia e calor, já que gozam de um viés mais renovável. A captura de CO₂ na indústria pode ocorrer em plantas com diversas matrizes, tais como gás, carvão, petróleo, refinarias e biomassa. Especialmente nas indústrias que utilizam sistemas de combustão para geração de calor, como cerâmicas e químicas (BAINS; PSARRAS; WILCOX, 2017).

Para garantir que se tenha uma geração de energia sustentável mesmo com sistemas de geração termelétrica a base de carvão, biomassa e outros combustíveis considerados seguros é preciso que os processos sejam modernizados para reduzir as emissões.

Ao longo dos anos diversas alterações foram feitas em sistemas térmicos para reduzir emissões poluentes. Tecnologias para captura de outros gases danosos a atmosfera já evoluíram e estão presentes em termoelétricas mais modernas, como equipamentos e processos para tratamento e redução de SO_x, NO_x, HCl, HF, mercúrio, entre outros. Sendo assim, diversos componentes como precipitadores eletrostáticos, ciclones, filtros, lavadores de gases, processos para redução de NO_x tem sido instalados em unidades térmicas.

Em relação à captura de CO₂ existem variações nos processos quanto à tecnologia utilizada, configurações de operação do leito de captura e material adsorvente (líquido ou sólido).

As três principais tecnologias de captura são: (i) a pós-combustão, que trata o gás após a queima de combustível, (ii) a pré-combustão, onde o combustível é gaseificado e se tem uma mistura de gases, sendo que o dióxido de carbono é removido e o restante dos gases segue para a queima e a (iii) oxicomustão que é similar a pós-combustão, mas ao invés de queimar com ar, esse é queimado com oxigênio puro.

Quanto às configurações de operação do leito de captura em processos de adsorção, eles podem variar basicamente em: (i) *PSA*, onde se tem a adsorção a partir

da variação de pressão no leito, (ii) *VSA*, com formação de vácuo no leito de adsorção, (iii) *TSA* com variação de temperatura no leito ou (iv) *MBTSA* com leito móvel com variação de temperatura.

Adicionalmente, os materiais utilizados em processos de absorção de CO_2 podem ser solventes líquidos, como a amina ou amônia. Já em processos de adsorção são empregados materiais sólidos com grande capacidade de adsorção, como zeólitas, estruturas organometálicas, aminas enriquecidas sólidas ou óxido de cálcio.

A utilização de processos de absorção de CO_2 com amina ou amônia se depara com obstáculos no custo e na eficiência do processo. Os processos que existem atualmente penalizam consideravelmente a eficiência da usina e, por consequência, aumentam consideravelmente o preço da energia para o consumidor final. Contudo, existem diversas tecnologias de captura de CO_2 em desenvolvimento e algumas delas com estudos que apresentam maior viabilidade, com maior eficiência e menores custos.

Na cidade de Criciúma, SC, mais especificamente nas dependências do Centro Tecnológico da SATC, foi construída uma planta piloto de captura de CO_2 com potência térmica equivalente a 100 kW e utiliza a tecnologia *MBTSA* para sistemas de pós-combustão em operação com adsorventes sólidos, especialmente as zeólitas. Essa planta é a primeira da América Latina em captura de CO_2 e a única desse modelo no mundo operando com uma configuração de leito em linha, em uma única coluna com os processos em um fluxo contínuo.

Para estudar o tempo de residência neste processo, desenvolveu-se um protótipo capaz de representar a seção de adsorção da planta piloto. Neste protótipo foram realizados testes experimentais em diferentes configurações do leito para avaliar o tempo de residência das zeólitas e a quantidade de CO_2 capturado no processo. Esse trabalho é pioneiro na área e inclui o desenvolvimento do protótipo do leito.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Buscar soluções para gerar energia de forma mais limpa e dar um destino correto para os gases de combustão com alto estigma poluidor é um caminho para

que os processos de geração de energia possam ser mais sustentáveis. É dever de engenheiros e pesquisadores analisarem os processos como um todo e buscarem tecnologias que se preocupem não apenas com a geração de energia, mas também em desenvolverem dispositivos para tratamento de emissões de poluentes.

Ao longo do século XX gerou-se energia com carvão, biomassa, petróleo e outros, por meio de processos bem dominados de combustão em máquinas a vapor, termoelétricas e geração de calor em geral. Atualmente, são conhecidos os resultados danosos de cada processo e o que os resíduos e rejeitos podem causar na garantia da vida humana e do bem-estar do planeta, recursos naturais e futuras gerações.

Apesar de que nas últimas décadas tenham surgido energias alternativas e muito mais limpas, ainda não podemos descartar qualquer forma de geração por uma necessidade óbvia de suprimento da crescente demanda de energia, desenvolvimento e de garantia de qualidade de vida aos cidadãos. Sabe-se que energia é garantia de qualidade de vida e progresso social, além de proporcionar mais conforto, segurança, saúde e outras diversas questões básicas aos seres humanos. Ademais, é preciso lembrar que as matrizes energéticas precisam suprir estabilidade e segurança ao sistema elétrico para garantir o fornecimento às mais diversas unidades consumidoras, em especial à indústria e à agricultura, que são fatores chaves da economia de um país civilizado.

Portanto, é imprescindível que as unidades termoelétricas, tão importantes na matriz energética, evoluam nos processos e destinação de resíduos.

É preciso que se modernizem, no que diz respeito a equipamentos que evitem a poluição e deem um destino aos resíduos gerados. E é justamente com essa motivação que o emprego de sistemas de captura de CO₂ se justifica nas unidades geradoras de energia a carvão, bem como quaisquer outras que emitam CO₂ para a atmosfera. Dessa forma, utilizando dessulfurizadores, precipitadores eletrostáticos e outros equipamentos é possível desmistificar a geração termoelétrica e tirar esse estigma de poluição, minimizando de forma expressiva os impactos causados.

Além disso, outra motivação é que estudos sobre o tempo de residência das zeólitas na seção de adsorção são bastante escassos e o foco tem se concentrado nos estudos das zeólitas propriamente ditas, dos processos de adsorção e no funcionamento do leito. Ou seja, os processos são analisados separadamente.

Acredita-se que essa escassez de testes experimentais do processo de adsorção de zeólitas no leito, com o intuito de avaliar o tempo de residência das zeólitas para adsorção efetiva do CO₂, se dá pelo número reduzido de plantas de captura de carbono disponíveis. Além disso, a falta de protótipos que possam simular uma planta de captura e estudar especificamente o tempo de residência também é alta.

Apesar de estudos que analisem a adsorção de CO₂ por zeólitas em laboratórios, faltam trabalhos experimentais e testes em protótipos que simulem o funcionamento da zona de adsorção, levando em consideração tempo de residência e adsorção. Além disso, existe uma outra dificuldade construtiva, pois é preciso buscar meios mecânicos para que a zeólita “atrase” e fique o tempo de residência necessário para que o processo de adsorção ocorra.

Neste contexto, dispositivos de captura de CO₂ devem ser analisados, no intuito de viabilizar a utilização desta tecnologia nas usinas atuais. É dever das autoridades incentivar o uso desses equipamentos, contribuindo com a redução de tributos e penalizar fortemente as emissões. E é dever das geradoras de energia buscarem recursos para que esses dispositivos se adequem ao seu processo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar experimentalmente o tempo de residência das zeólitas e a capacidade de remoção de CO₂ para diferentes configurações do leito de adsorção de um protótipo que representa a seção de adsorção de uma planta piloto de captura de CO₂.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um protótipo para a realização de testes de adsorção de CO₂, utilizando blocos e placas de acrílico para facilitar a visualização e montagem com as devidas configurações dos testes.
- Variar as configurações dos anéis e placas para verificar experimentalmente a influência no tempo de residência.
- Medir o tempo de residência em testes com as zeólitas sem injeção de ar para cada configuração de placas defletoras e anéis dosadores.
- Avaliar a influência da vazão de ar nos valores de tempo de residência para os diferentes tipos de placas em testes.
- Avaliar a quantidade de CO₂ removido pelas zeólitas e o tempo de residência em experimentos com mistura gasosa de CO₂ e N₂ em diferentes configurações de espaçamento de placas e vazões.

3 ESTADO DA ARTE

O estado da arte aborda uma revisão sobre a importância de reduzir as emissões e os diversos processos de captura de CO₂, além dos desafios das pesquisas que estudam a utilização de adsorventes sólidos, em busca de maior viabilidade do processo.

A preocupação com o meio ambiente também é valorizada, destacando as plantas de captura de CO₂ já existentes e em operação.

3.1 CAPTURA DE CO₂

Um das vantagens da captura de CO₂ é a sua mitigação na atmosfera e os diversos problemas que esse gás pode trazer às pessoas e ao planeta com o passar dos anos. Muitos processos industriais que emitem esse gás precisam de alternativas que minimizem seus efeitos danosos para que possam continuar a fornecer matéria-prima à indústria.

Na metalurgia, por exemplo, uma das maiores fontes emissoras de dióxido de carbono na atmosfera pela produção de aço, a busca por processos de captura de carbono está cada vez maior (RAMÍREZ-SANTOS; CASTEL; FAVRE, 2018).

As emissões de CO₂ são consideradas uma grande ameaça para o meio ambiente, pois são responsáveis por 60% do aquecimento global causado pelos gases de efeito estufa. Os combustíveis fósseis constituem atualmente a principal fonte de energia devido à sua disponibilidade e baixo custo, devendo manter esse domínio durante as próximas décadas. Portanto, a captura de CO₂ em vários processos industriais, bem como em processos de geração de energia termoelétrica, desempenhará um papel importante, permitindo reduzir as emissões de CO₂ e melhorar a segurança do fornecimento de energia através de uma mistura equilibrada de diversas fontes de energia (ZHANG et al., 2017).

Os processos de captura de CO₂ se mostram muito promissores na diminuição efetiva dos gases de efeito estufa lançados para a atmosfera e como uma alternativa muito importante para o planeta. Avaliar o processo correto para cada tipo de usina

ou modalidade de adsorção, separação e armazenamento devem ser as chaves que necessitam ser estudadas para viabilizar cada vez mais os processos de captura (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014).

A produção e emissão de carbono também está presente nas indústrias em processos bem similares ao de geração de energia e estudos sobre a implantação de captura nesses processos também são de suma importância para redução das emissões.

A captura de CO₂ em fontes industriais de larga escala e em regiões altamente industrializadas e urbanizadas é uma necessidade. O processo de absorção de CO₂ pode ser aplicado a diversas indústrias - papel e celulose, óleo e gás, aço, cimento e produção química, assim como na geração termoelétrica em geral, ampliando o leque de aplicações e a expansão das plantas de captura de CO₂ (GARÐARSDÓTTIR et al., 2018).

Levando-se em conta as diversas fontes emissoras de carbono, seja na produção de aço, indústrias em geral ou geração termoelétrica, e avaliando fatores como o custo de captura, além dos processos como transporte e armazenagem, a Índia poderia mitigar 780 Mt de CO₂ por ano, segundo estimativas. (GARG et al., 2017).

Em 2017, haviam 17 projetos de captura de CO₂ de larga escala em operação em todo o mundo. A capacidade combinada de captura de CO₂ desses 17 projetos é de aproximadamente 30 milhões de toneladas por ano. Mais quatro projetos de captura estão em construção e espera-se que estejam em operação até 2020. A escala de captura de CO₂ existente atualmente é menor do que a escala esperada e proposta pela Agência Internacional de Energia (IEA) em 2009, que destacou a necessidade de desenvolver 100 projetos de captura de 2010 a 2020 e armazenar aproximadamente 300 MtCO₂ / ano. O alto custo da captura de CO₂ e a incerteza associados ao seu desenvolvimento tecnológico são obstáculos à rápida difusão desta tecnologia, particularmente nos países em desenvolvimento, como a China (YAO et al., 2018).

Em 2019, o número de instalação de plantas de grande escala aumentou para 51, sendo que 19 estão em operação, quatro estão em construção, 10 em desenvolvimento avançado e 18 em desenvolvimento inicial. Estes que estão em operação e construção podem capturar e armazenar 40 milhões de toneladas de CO₂

por ano. Além disso existem cerca de 39 plantas pilotos de captura de CO₂ para demonstrações e testes (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2019).

Outro ponto que precisa melhorar são as políticas públicas entre os países, para disseminar a tecnologia através da concorrência para que os testes e experiências possam se propagar entre os concorrentes e a tecnologia evoluir (UPSTILL; HALL, 2018).

Contudo, a captura de CO₂, juntamente com o uso crescente de energia renovável e melhoria da eficiência energética, podem proporcionar a redução das emissões necessárias para alcançar melhores condições de sustentabilidade (RAO; KUMAR, 2014).

3.1.1 Processos de captura de CO₂

Existem três principais processos para captura de CO₂: pré-combustão, oxicombustão e pós-combustão.

Em sistemas que operam no regime de pré-combustão, o combustível é processado primeiramente em um reator com vapor e ar ou oxigênio para produzir uma mistura principalmente de monóxido de carbono e hidrogênio, o chamado gás de síntese. Em um reator, gás de síntese é convertido em H₂ e CO₂ (ELIAS; WAHAB; FANG, 2018).

O dióxido de carbono é removido, e a mistura gasosa restante é queimada com ar para produzir eletricidade. O produto liberado possui como único resíduo a água. Embora as etapas iniciais de conversão de combustível sejam mais elaboradas e com custos mais elevados do que sistemas de pós-combustão, esse processo resulta em altas concentrações de CO₂, facilitando a separação e captura do mesmo. A pré-combustão é interessante em usinas que empregam tecnologia de ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC) (IPCC : PANEL; CHANGE, 2005).

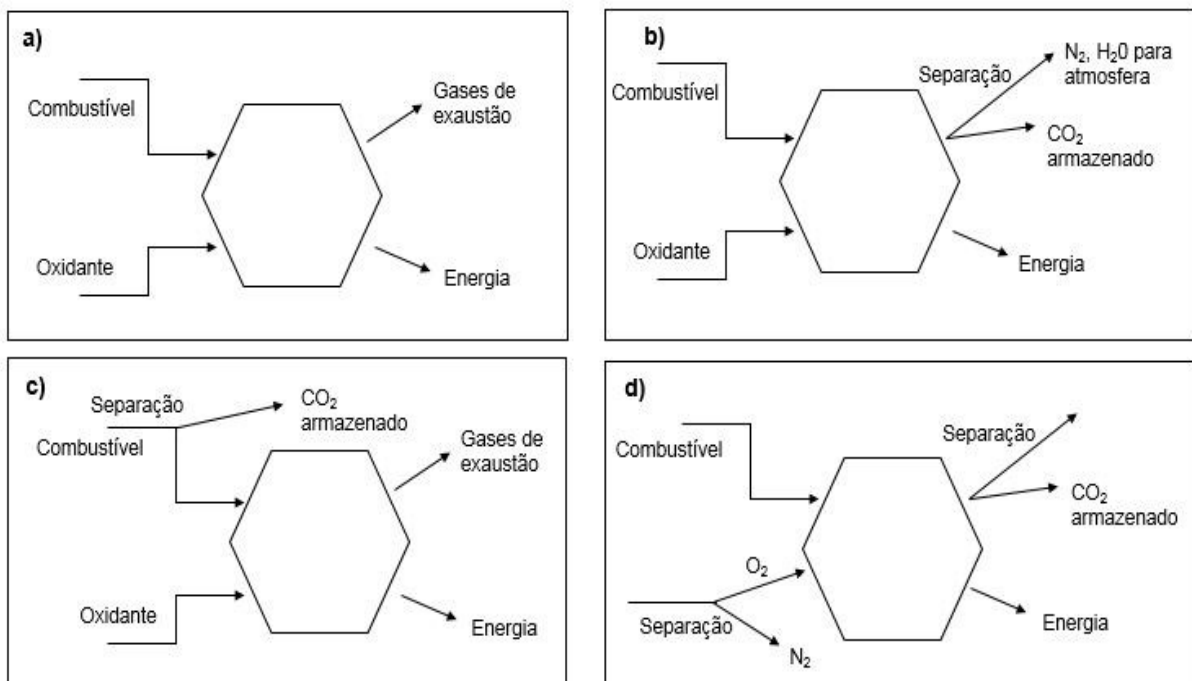
Os sistemas oxicombustão são bastante similares ao de pré-combustão, entretanto, usa-se oxigênio puro (em torno de 95% a 99% de pureza) ao invés de ar para a combustão primária e assim produz um gás de combustão que é composto principalmente de vapor de água e CO₂. Isso resulta em um gás de combustão com altas concentrações de CO₂ (maior que 80% em volume). O vapor de água é removido

posteriormente por processos com pressão e resfriamento. O método de oxicomustão ainda está em fase de testes e pesquisas para o desenvolvimento da tecnologia (IPCC : PANEL; CHANGE, 2005) .

Os sistemas de oxicomustão poderão ser uma alternativa interessante, especialmente em usinas que utilizam carvão de baixa qualidade e com baixo teor de enxofre. Entretanto, ainda seriam necessários mais testes em escalas reais para avaliar o processo (BORGERT; RUBIN, 2017).

As principais dificuldades dos processos de captura de CO₂ na pré-combustão e oxicomustão são a implantação desses sistemas em usinas já constituídas, podendo causar alterações no processo e altos custos para modificação. Na Figura 2, tem-se um esquema com os principais processos de captura de CO₂.

Figura 2 - a) Diagrama esquemático de geração de energia com base em combustíveis fósseis; b) Diagrama esquemático de captura pós-combustão; c) Diagrama esquemático de captura pré-combustão; d) Diagrama esquemático da oxicomustão.



Fonte: Adaptado de IPCC (2005).

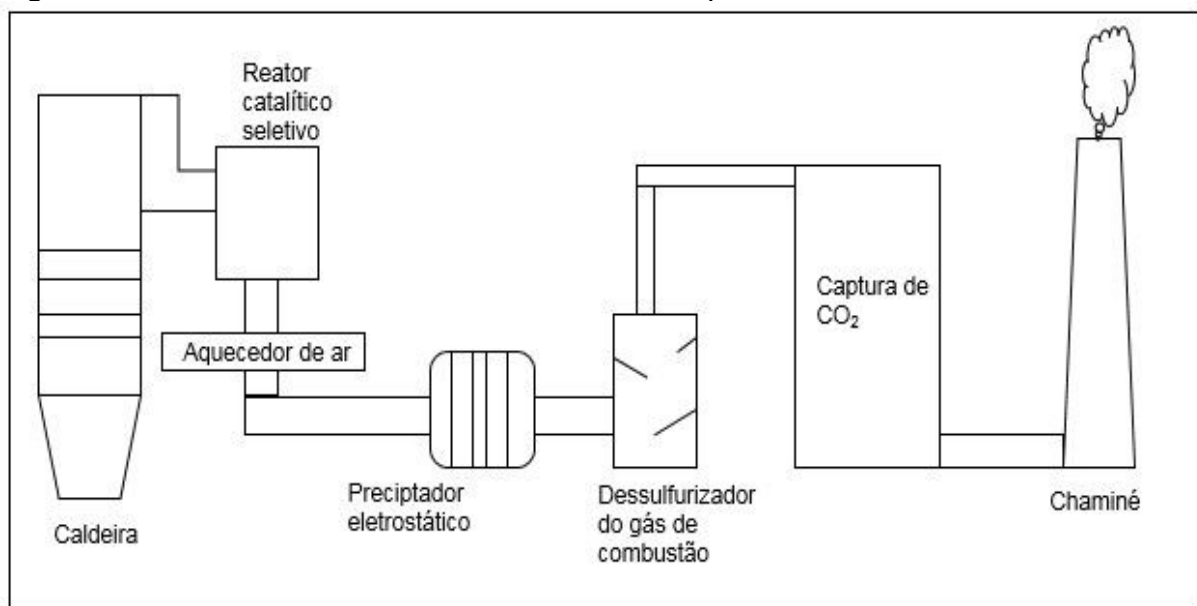
O processo de captura pós-combustão ocorre após a queima do combustível, e remove o CO₂ do gás de combustão. Os sistemas de captura de pós-combustão

podem ser aplicados aos gases da combustão de qualquer tipo de combustível, como por exemplo biomassa, carvão e combustíveis fósseis em geral (KOEHLER, 2015).

Existem outros gases provenientes da queima do carvão mineral, e para realizar a captura desses gases existem tecnologias evoluídas e que estão presentes em termoeletricas mais modernas, como equipamentos e processos para tratamento e redução de SOx, NOx, HCl, HF, mercúrio, entre outros. Sendo assim, diversos componentes como precipitadores eletrostáticos, ciclones, filtros, lavadores de gases, processos para redução de NOx tem sido instalados em unidades térmicas. Na Figura 3, tem-se um modelo de captura pós-combustão, onde se pode ver o processo de combustão e a saída da caldeira, o reator catalítico seletivo, na sequência o precipitador eletrostático, o dessulfurizador de gás de combustão e por último o sistema de captura de CO₂.

Em uma aplicação real, o sistema de captura ficaria logo após o precipitador eletrostático, sendo que este deverá operar à quente.

Figura 3 – Elementos de uma usina termoeletrica pós-combustão.



Fonte: Adaptado de IPCC (2005).

Dentre os diversos tipos de captura de CO₂, o processo de pós-combustão tem se mostrado como a alternativa mais viável, devido à sua característica de estar

no “fim de linha”, para ser adequado em usinas constituídas, em especial as usinas à carvão (WANG et al., 2017).

Prova disso é que o processo de pós-combustão também figura com menores custos em relação a outros processos, por sua simplicidade. A China tem investido em tecnologias para promover a implantação da captura de dióxido de carbono ainda que de maneira parcial. Analisar os projetos chineses torna-se interessante pelo fato de que os custos de implantação são bem menores que nos Estados Unidos e na maioria dos outros países do mundo. Em algumas usinas operando em regime de pós-combustão tem-se o custo de captura entre 40-43 US\$ por tonelada de CO₂. O principal fator se dá por um custo de capital mais baixo para implantação e a importância da poupança de capital (SINGH et al., 2018).

3.2 TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE CO₂

Existem três grandes tecnologias de captura de CO₂: por absorção, por adsorção e por membranas.

A absorção é o processo onde a substância absorvida é embebida pela substância absorvente. Este processo baseia-se na capacidade de reversibilidade das reações químicas do solvente, geralmente uma amina, que neste caso absorve CO₂. Os processos de absorção ocorrem em torres onde os gases de exaustão estão em fluxo contracorrente ao solvente, que pode ser monoetanolamina, dietanolamina, entre outros (LESSA, 2012).

A adsorção é o processo em que a substância adsorvida fica retida na superfície da substância adsorvente, sem ser incorporada à superfície da outra. Algumas variáveis que influenciam no processo de adsorção são: temperatura, pressão, força nas superfícies dos materiais e o tamanho dos poros na superfície (LESSA, 2012).

Outra modalidade de captura de CO₂ é com a utilização de membranas. Essas membranas são seletivas e separam diversos tipos de elementos, tais como H₂, CO₂ e O₂, por exemplo. Elas podem ser constituídas de materiais metálicos, polímeros ou cerâmicos. A sua capacidade de separação de material é determinada pela seletividade dos dois componentes que fazem parte da mistura. Contudo, a baixa

pressão do CO₂, comum em efluentes gasosos dificulta a separação e captura de CO₂ (LESSA, 2012).

Uma das dificuldades no uso de sistemas de membranas são os custos inerentes a operação e implantação dos sistemas, além da incerteza na eficiência de captura de CO₂. Por isso, em geral, os sistemas para captura de CO₂ utilizam tecnologias de absorção à base de amina como solvente, uma vez que a capacidade de captura de CO₂ é maior, chegando a níveis de 90%. Entretanto, assim como as membranas, os sistemas de absorção à base de amina ainda implicam em um alto consumo de energia à usina. Estima-se que ao implantar os sistemas de captura de CO₂, a base de amina a produção líquida da usina diminua de 12% a 16% enquanto a penalidade de energia líquida deverá ser de 17% a 22% da energia bruta. (RAO; KUMAR, 2014).

A utilização de sistemas de captura CO₂ com absorção à base de amina e processos com membrana na Índia, país onde existe uma forte ligação entre desenvolvimento energia e carvão, traz uma penalidade de energética que varia de 34% a 53% da eficiência da planta termoelétrica, enquanto o custo é de 66 a 109 US\$ a t-CO₂ (SINGH; RAO; CHANDEL, 2017).

Uma análise de implantação de um sistema de captura de CO₂ em regime de pós-combustão utilizando amina como solvente em uma usina termoelétrica à carvão pulverizado foi realizado por Koehler (2015). Segundo estimativas a diminuição da eficiência da planta foi da ordem de 20,34%, o aumento no custo da energia é em torno de 136,32% e o custo total do sistema é da ordem de 500 milhões de dólares.

Ainda existem outras tecnologias mais recentes, como a combustão por ciclo químico e processos com desidrato de CO₂ que podem fornecer outras soluções para a captura de CO₂.

No estágio atual, a captura de CO₂ permanece economicamente inviável. No entanto, é esperado que, com melhorias na tecnologia, uso de absorventes mais modernos e com menores penalidades energéticas à usina, o custo do da captura de CO₂ possa diminuir e as usinas de energia possam fornecer vias de reduções substanciais nos níveis de emissões (SINGH; RAO, 2015).

As tecnologias de captura de dióxido de carbono vem evoluindo e usando diversos procedimentos aprimorados, com solventes melhores e processos menos

caros, entretanto, o grande fator ainda é a penalidade à unidade geradora de energia por custos e eficiência. Para minimizar esses efeitos, tecnologias de adsorção com sólidos têm sido estudadas (SONG et al., 2018).

3.2.1 Adsorção de CO₂ por sólidos

Existem diversos tipos de adsorventes sólidos, tais como as zeólitas, o Mg-MOF-74, carvão ativado e quimissorvente de PEI/MCF. Em geral, as zeólitas tem sido as mais usadas no processo de adsorção por sólidos. Dentre os diversos tipos, a zeólita 13 X se destaca como um dos adsorventes preferidos para os processos de captura de CO₂ (MARING; WEBLEY, 2013).

O processo de adsorção de CO₂ com sólidos tem se destacado como uma alternativa para diminuir as penalidades energéticas da absorção que os processos a base de solventes ou de membranas impõem às usinas.

Solventes e adsorventes sólidos para captura de dióxido de carbono foram testados por Bhattacharyya e Miller (2017). O foco foi redução dos custos de implantação e operacionalidade, bem como em diminuir as penalidades energéticas. Segundo eles, uma das alternativas para se alcançar menores custos é a utilização de adsorventes sólidos.

Além disso, os adsorventes sólidos também apresentam vantagens em relação aos líquidos numa avaliação do sistema de adsorção, considerando as etapas seguintes ao leito, como a regeneração, por exemplo, em que para a amina é necessário outros acessórios como bombas, ventiladores e compressores. Já para os adsorventes sólidos, em especial zeólitas, o processo de regeneração consome menos energia, por se tratar de um sólido e não precisa evaporar, como nos líquidos, pois em pouco tempo já se separa do sólido. Além disso, possui menos dispositivos envolvidos o que diminui consideravelmente o consumo de energia e a penalidade da planta (KNAEBEL, 2015).

São características importantes para a captura de CO₂: capacidade de captura de CO₂, energia de regeneração, custo de capital, disponibilidade comercial, volatilidade (para solventes), características de atrito (para sorventes), massa e transferência de calor, densidade, porosidade, pressão, entre outras. (BHATTACHARYYA; MILLER, 2017)

Aquino (2018) comparou essas propriedades/características importantes para captura de CO₂ entre dois tipos de zeólita: a tipo A e a 13 X, que são tipos bastante comuns e utilizados de adsorventes sólidos, e um solvente bastante comum: a amina. Os dados obtidos foram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre amina e zeólitas do tipo A e 13 X

Caracterização	Zeólita A	Zeólita 13 X	Base de Amina
Diâmetro de poro (mm)	0,4	0,8	8-40
Densidade (kg/m ³)	660-720	610-710	1000-1500
Porosidade	0,3	0,5	-
Área superficial BET (m ² /g)	35,3	558-600	5-500
Tipo de adsorção	Física	Física	Química
mmol CO ₂ (puro)/g	3,1	4	-
%CO ₂ Capturado (Porcentagem de massa)	13	16	5-14
Pressão (bar)	1,01	1,01	1,01
Temperatura de adsorção (°C)	25	25	-
Temperatura de regeneração (°C)	120-350	120-350	80-120

Fonte: AQUINO (2018).

A zeólita 13 X é um adsorvente bem eficaz na captura de CO₂ em comparação as zeólitas tipo A e à amina, com maiores níveis de adsorção, maior porosidade e tamanho de poros, bem como maior área superficial. As diferenças de operação também revelam uma complexa relação entre o desempenho ótimo, operacionalidade e potenciais adsorventes. (NIKOLAIDIS; KIKKINIDES; GEORGIADIS, 2018).

Nos processos de adsorção de CO₂ por meio de sólidos, inúmeras partículas sólidas, como as zeólitas por exemplo, são lançadas por gravidade e fluem em contracorrente aos gases de exaustão. Os sólidos adsorvem o dióxido de carbono que fica alojado na sua superfície. Para testes de adsorção de CO₂ podem ser testados vários ciclos, levando as zeólitas a passar pela zona de adsorção mais de uma vez, com o intuito de analisar se a zeólita adsorve mais CO₂ em cada ciclo.

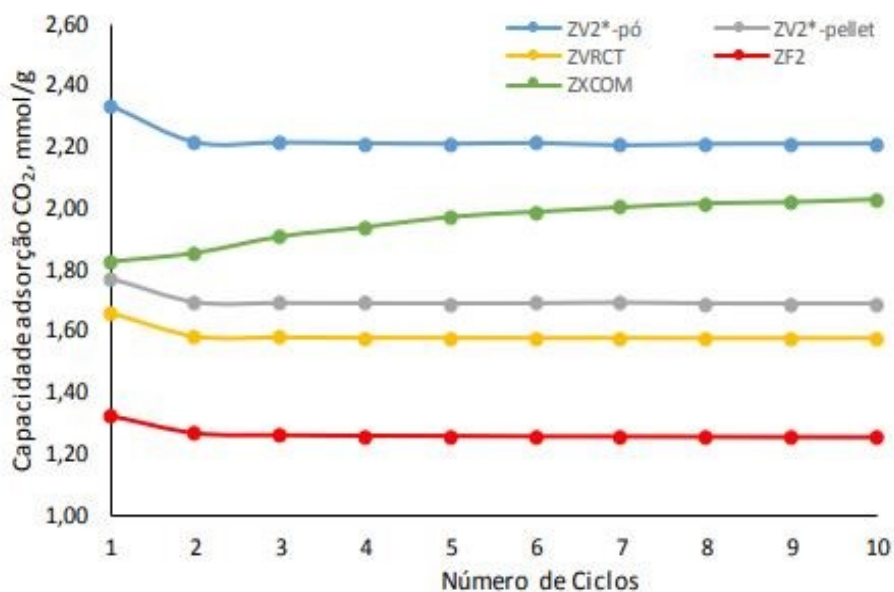
Alguns tipos de zeólitas foram analisadas por Aquino (2018) quanto ao seu potencial de adsorção de CO₂. Foram analisadas as zeólitas 13 X comercial da marca

Linde (ZXCUM) em comparação com algumas zeólitas sintetizadas por ele utilizando cinzas de carvão mineral que apresentaram as melhores performances, chamadas por ele de: ZV2*-pó, ZV2*-pellet (sendo que essas duas sintetizadas a partir de cinzas volantes e aluminato de sódio como fonte de alumínio), ZVRCT-pellet (empregando resíduo de alumínio em substituição ao aluminato de sódio) e ZF2-pellet (utilizando cinzas de fundo sem nenhum tipo de beneficiamento prévio).

Com isso, é possível visualizar na Figura 4 que a zeólita ZV2*-pó sintetizada conseguiu bom resultado de adsorção, assim como a zeólita 13 X comercial (ZXCUM), que teve a segunda melhor performance de adsorção de CO₂.

Ainda na Figura 4, pode-se perceber que a zeólita 13 X comercial teve um aumento sutil na capacidade de adsorção ao longo dos ciclos, atingindo um valor de capacidade igual a 2,02 mmol/g.

Figura 4: Curvas da Capacidade de adsorção de CO₂ em uma atmosfera de mistura CO₂ (14 %) e N₂ (86 %).



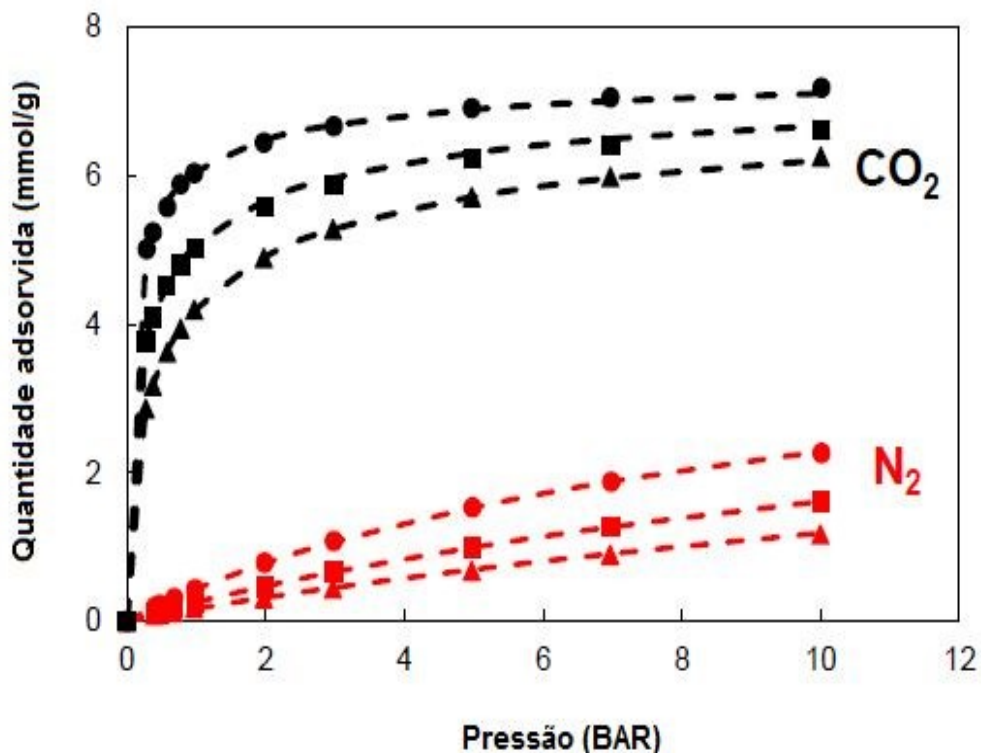
Fonte: AQUINO (2018).

Quanto a temperatura e pressão ideais para os processos de adsorção com a zeólita 13 X, os dados experimentais mostraram que o adsorvente apresenta uma seletividade muito maior para o CO₂ que em relação ao N₂ em uma faixa razoavelmente ampla de pressão (0 a 10 bar). A capacidade superior de adsorção de

CO₂ pode ser explicada também pelas diferenças de temperatura críticas de CO₂ (31,3 °C) e N₂ (-146,9 °C), ou seja, o CO₂ apresenta um comportamento semelhante ao vapor condensável que o torna mais fácil de ser adsorvido, enquanto N₂ se comporta como um gás supercrítico. Existem vários modelos de equilíbrio isotérmico, entre eles um muito utilizado, o modelo *Sips* que pode ser utilizado para ajustar os dados da isoterma de testes experimentais devido a sua precisão e viabilidade de serem estendidos a misturas multicomponentes (OSPINO, 2018).

A Figura 5, mostra as conexões do modelo *Sips* para as isotermas individuais de CO₂ e N₂ para três temperaturas. Sendo que a composição utilizada nos testes experimentais foi CO₂ (15 %), N₂ (75 %) e He (10 %).

Figura 5: Isotermas de adsorção pura de CO₂ (preto) e N₂ (vermelho) à 25 °C (círculo), 50 °C (quadrado) e 75 °C (triângulo). Os símbolos representam os dados experimentais e linhas tracejadas representam o reajuste do modelo *Sips*.



Fonte: OSPINO (2018).

Dados experimentais confirmam, como esperado, que a adsorção física ocorre para ambas as isotermas, uma vez que o aumento da temperatura resulta em uma queda na capacidade de adsorção e vice-versa (OSPINO, 2018).

Além disso, pode-se perceber que o aumento de pressão não causa grande acréscimo na quantidade adsorvida, sendo muitas vezes mais viável economicamente trabalhar com pressões baixas, facilitando projeto e operação e sem penalizar a eficiência no processo de adsorção de CO₂.

3.3 PROCESSOS DE OPERAÇÃO DO LEITO NA ADSORÇÃO COM ZEÓLITAS

Os processos de operação do leito na adsorção com sólidos se subdividem em seis principais tipos, que podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Processos de operação do leito na adsorção com sólidos

Processos de Operação do leito	Características dos Processos
<i>PSA (pressure swing adsorption)</i>	Variação de pressão no leito
<i>VSA (vacuum swing adsorption)</i>	Variação de vácuo e pressão no leito
<i>Híbridos</i>	Dois ou mais processos integrados
<i>ESA (eletric swing adsorption)</i>	Adsorção por oscilação elétrica
<i>TSA (temperature swing adsorption)</i>	Variação de temperatura no leito
<i>MBTSA (moving bed temperature swing adsorption)</i>	Variação de temperatura em leito oscilante

Fonte: Do autor (2020).

Os processos *PSA* utilizam uma variação de pressão no leito e visam economia de energia. Entretanto, o processo de pressão variável tem um custo energético elevado e algumas dificuldades envolvidas. Em geral, consistem em seis etapas, que são: pressurização, onde a coluna é pressurizada; adsorção, em alta pressão; despressurização e pressurização via equalização, onde duas colunas estão conectadas, assim como uma é despressurizado e o outro pressurizado (reciclagem), onde a pressão na coluna é liberada e CO₂ puro é coletado. Em geral, as etapas de equalização de pressão são implementadas para economizar custos de compressão, uma vez que esse processo pode ter um alto custo energético, pois necessita de pressurização para operar (CASAS et al., 2013).

Os processos *PSA* podem operar normalmente com adsorventes sólidos, como as zeólitas, por exemplo. Entretanto, muitas vezes os adsorventes não desempenham bons índices, como capacidade de trabalho e seletividade, quando são submetidos a operarem processos *PSA* (SEONGBIN; JANG; LEE, 2016).

Outro fator limitante de desempenho para o processo *PSA* é a lenta transferência de massa e a cinética que introduz atrasos significativos para alcançar o estado de equilíbrio e adsorção completa por meio dos adsorventes sólidos (GA; JANG; LEE, 2017).

Os processos híbridos se apresentam como uma tendência para diminuir o consumo energético e as penalidades impostas à unidade geradora de energia. Um exemplo é o regime de vácuo e temperatura *VTSA* que tende a ser mais suave no consumo de energia. Os coeficientes de recuperação (92,2%) e pureza (93,6%) de CO_2 são muito bons (WANG et al., 2012).

A aplicação da adsorção por oscilação elétrica tem se mostrado como uma técnica bem promissora de segunda geração para capturar CO_2 e tem sido avaliada em estudos e pesquisas mais recentes, mas ainda na fase de testes.

Outra combinação são os processos de regime de oscilação de pressão e vácuo (*VPSA*). A implantação de sistemas *VPSA* em usinas não traz problemas significativos, o que viabiliza a implantação em plantas antigas. Em aplicações de pré-combustão, são notadas perspectivas para melhorar materiais e processos adsorventes. Bom potencial para *PSA* é previsto com processo de separação de gás quente, especialmente com processos aprimorados de sorção. Além disso, a complexidade dos arranjos em casos de pré-combustão podem abrir espaço para interessantes configurações de sistemas alternativos. Na pós-combustão boa maturidade foi alcançada em relação ao processo, tanto no desenvolvimento de materiais como no de adsorventes, em especial as zeólitas. A integração do processo *PSA* nas usinas é relativamente simples e viável. Ainda se pode ter processos híbridos para geração, como por exemplo o subproduto H_2 que pode ser capturado e utilizado para ajudar a viabilizar o sistema (RIBOLDI; BOLLAND, 2017).

A utilização de sistemas *TSA* (*com variação de temperatura no leito*) e *MBTSA* (*variação de temperatura em leito móvel*) são os mais econômicos do ponto de vista

energético e possuem a mesma eficiência de captura quando comparados a outros processos.

O sistema *MBTSA* é formado por um leito móvel onde ocorrem várias etapas do processo variando a temperatura. O leito tem a seção de alimentação, pré-aquecimento, recuperação (regenerador), pré-resfriador e refrigerador. O processo *MBTSA* tem um ganho de energia no processo de regeneração de calor de 76 %. Contudo, *MBTSA* ainda é uma tecnologia nova e existem muitos pressupostos quanto às seções de regeneração do adsorvente sólido e retirada de CO₂, sendo que necessita de testes e simulações experimentais para valores mais precisos (GRANDE et al., 2017).

Outro fator importante é que o *MBTSA* é um processo mais simples, sem pressão e vácuo, utilizando apenas a variação de temperatura dentro da faixa oferecida pelos gases de combustão. Sendo que na seção de adsorção, pode-se trabalhar com temperaturas próximas a 25 °C.

O processo *MBTSA* tem vantagens quanto ao processo *PSA* no que diz respeito à economia de energia. O sistema *MBTSA* possui três zonas no leito. Um leito de adsorção atmosférica, um leito de dessorção atmosférica e um de dessorção a vácuo. O adsorvente sólido cai por gravidade em um sistema contra fluxo ao gás de exaustão. Este estudo propõe o processo *MBTSA* integrado ao calor. Isso permite um perfil de temperatura no leito de adsorção. As placas de trocador de calor permitem uma adsorção de 97% de pureza e 80% de recuperação de CO₂. (KIM et al., 2013).

Outras vantagens da técnica de captura de CO₂ em leito móvel (*MBTSA*) e uso de sólidos como as zeólitas são: a baixa queda de pressão, baixo inventário de adsorvente, mínimo desgaste adsorvente e baixo custo. Os processos convencionais necessitam de grandes quantidades de energia parasitária para processos de separação, como os depuradores que necessitam de vapor para regenerar a amina. O sistema de membranas por adsorção por oscilação de pressão (*PSA*) requerem compressão. Essas energias representam uma parcela significativa. Já o processo *MBTSA* explora uma faixa de temperatura contida no gás de combustão, utilizando esse calor para o processo de separação reduzindo o custo operacional. (KNAEBEL, 2015).

Alguns aprimoramentos e estudos têm sido feitos nos processos *MBTSA* com a finalidade de reduzir os gastos com energia. Recirculação do gás para maior

eficiência de captura de CO₂, sendo que o gás recircula mais de uma única vez, entretanto, dois fatores limitam o processo *MBTSA*: queda de pressão no leito adsorvente e baixas temperaturas de aquecimento e resfriamento. A temperatura do leito móvel, com conceito de adsorção por oscilação *MBTSA* oferece a possibilidade de superar a queda de pressão na seção de remoção de CO₂ e conseqüentemente permite aquecimento e resfriamento mais rápidos do adsorvente. Esse sistema *MBTSA* com uso do calor dos gases de combustão para regeneração diminui consideravelmente a demanda de energia (MONDINO; GRANDE; BLOM, 2017).

A busca por economia de energia no processo também pode ser alcançada por tecnologias adsorvedoras do CO₂, como alguns tipos de fibras, por exemplo. O desempenho de novos tipos de fibras adsorventes de CO₂ tem sido simuladas numericamente e analisam um sistema *MBTSA* na combustão e processo de captura. Os efeitos de adsorção e dessorção de CO₂ são os aspectos importantes. Esse processo consegue pureza de CO₂ de 90,53%. Esses resultados mostram que seria possível uma completa performance de *MBTSA* em apenas alguns minutos para captura de CO₂, o que acaba melhorando a eficiência e os custos do processo. Isso abre um caminho de possibilidades e novas configurações para o processo *MBTSA* que pode evoluir para ser ainda mais eficiente (REZAEI et al., 2014).

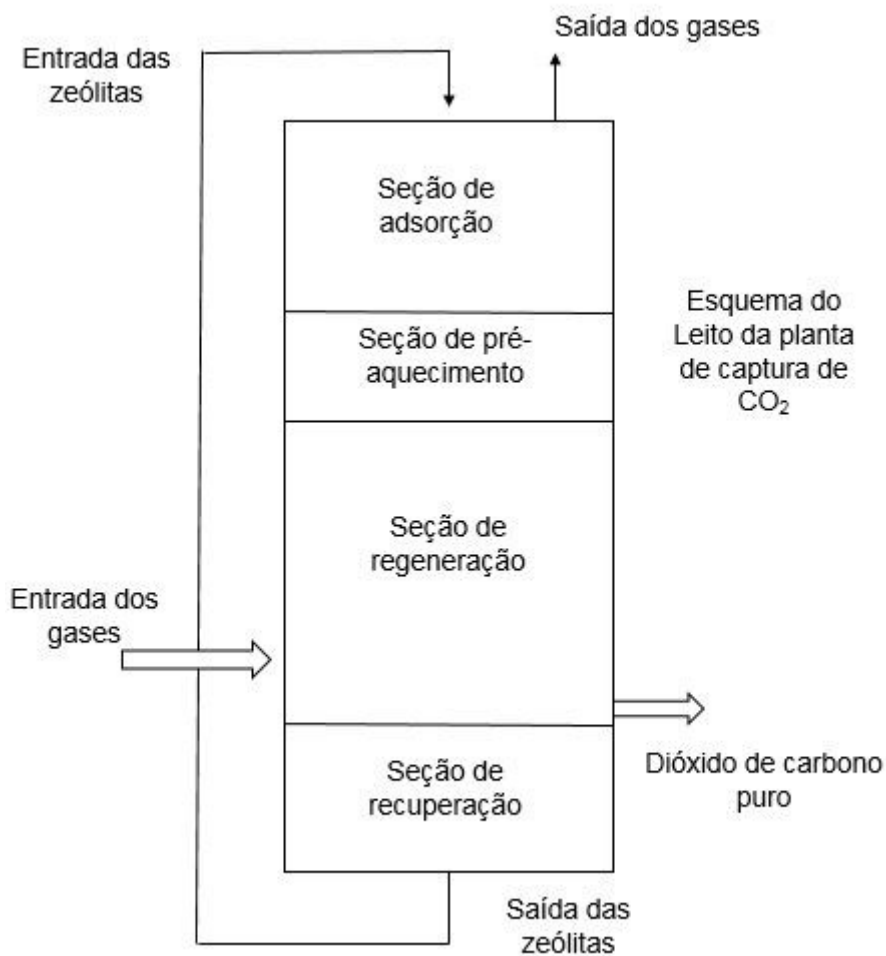
Ao analisar as pesquisas com o processo *TSA* ou *MBTSA*, pode-se constatar que estes podem ser mais vantajosos no ponto de vista energético, precisando de menos energia para operar e utilizando uma faixa de temperatura contida nos gases de exaustão para os processos de operação do leito. Além disso, as zeólitas se enquadram muito bem como adsorventes nesses sistemas, uma vez que é possível trabalhar com pressão muito próxima da atmosfera (1 bar) e temperatura próximo a do ambiente (25 °C), sem gastos de energia extra para manter essas condições.

3.4 TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS ZEÓLITAS NO LEITO DE ADSORÇÃO

O tempo de residência das zeólitas varia conforme a configuração do leito de uma planta de captura, mais especificamente com as características de projeto da seção de adsorção.

A Figura 6 apresenta um esquema do leito de adsorção de uma planta de captura de CO₂. As zeólitas (adsorventes) são alimentadas na parte superior do leito por gravidade e percorrem, respectivamente, a zona de adsorção, onde encontra o dióxido de carbono fluindo em contracorrente. O objetivo desta etapa é adsorver nas zeólitas o máximo possível de CO₂. As zeólitas, vão caindo por gravidade para uma seção de pré-aquecimento e em seguida para a regeneração, onde se separam do CO₂ na devida temperatura de regeneração. Posteriormente seguem para a seção de recuperação e retornam novamente ao ciclo por meio de um elevador de canecos. Para a maior adsorção é preciso que as zeólitas permaneçam o tempo de residência necessário para a máxima adsorção de CO₂.

Figura 6 - Diagrama de leito de adsorção de uma planta de captura de CO₂.



Fonte: Do autor (2020).

Determinar o tempo de residência ideal para a máxima adsorção através de teste experimental em protótipo da planta é fundamental para viabilizar seu funcionamento de forma eficiente, bem como desenvolver dispositivos que permitam o tempo de residência correto sem prejudicar o processo de adsorção.

Algumas simulações buscam descobrir a influência do perfil do tempo de residência de sólidos no desempenho da unidade, que é a chave no projeto do sistema e melhoria de desempenho de operações unitárias práticas. O desenvolvimento da modelagem preditiva também é um objetivo importante no desenvolvimento a longo prazo da teoria do tempo de residência. A modelagem, em muitos casos, pode ser bem complexa e de difícil previsibilidade por simulação. Portanto, existe a necessidade de testes experimentais que levem em conta uma correlação válida entre parâmetros (operação, propriedades do material, geometria etc.) (GAO; MUZZIO; IERAPETRITOU, 2012).

Analizar a fluidização e como ela afeta o tempo de residência também é um fator importante. A abordagem euleriana-euleriana é um dos caminhos que pode ser simulado através do ANSYS CFX 14.0. Com isso, pode-se estimar velocidades de fluidização e tempo de residência que devem ser adotados para obter melhores rendimentos de produto no processo industrial. A velocidade de fluidização é uma importante variável para o controle cinético do processo. Diferentes velocidades de fluidização produzem curvas de tempo de residência diferentes, bem como rendimentos de produtos diferentes para a cinética adotada podem ser testados seja por meio de simulação ou experimentalmente alcançando-se bons resultados (ALVAREZ-CASTRO et al., 2015).

Outras abordagens de tempo de residência em processos similares também são importantes e precisam ser consideradas como a influência do tempo de residência e do tempo de regeneração da zeólita de xisto betuminoso, por exemplo. A influência dos parâmetros de processo no tempo de residência do vapor sobre a regeneração foi examinado por Oahu (2001). O rendimento e composição dos gases derivados antes e depois da catálise foram determinados. Além disso, o rendimento e a composição do óleo derivado em termos do teor total de azoto e enxofre e do teor de hidrocarbonetos aromáticos nos óleos foi investigado. A influência de tempo de residência maiores foi observada pelo aumento da formação de hidrocarbonetos

aromáticos e redução das concentrações dos compostos de azoto e enxofre. Com isso, pode-se observar que a variação no tempo de residência altera diretamente a eficiência dos processos e, conseqüentemente, seus resultados.

No caso de plantas de captura é preciso descobrir o tempo na etapa de adsorção, para que os sólidos permaneçam na zona de adsorção durante o tempo ideal de exposição para a saturação (WATERS et al., 2017).

Medições experimentais da distribuição do tempo de residência de partículas podem ser realizadas. A velocidade das partículas próximas a paredes tendem a ser menores e a velocidade das partículas pode alterar com a pressão no leito (HARRIS; DAVIDSON; THORPE, 2003).

Medições do tempo de residência também podem ser feitas com base na distribuição do tempo de permanência em um reator de rotação. Os parâmetros são independentes ou influenciados pela orientação da velocidade e vazão de líquido. Entretanto alguns parâmetros, como o tempo de residência por exemplo, podem alterar a velocidade com alteração do projeto e defletores (LEON et al., 2014).

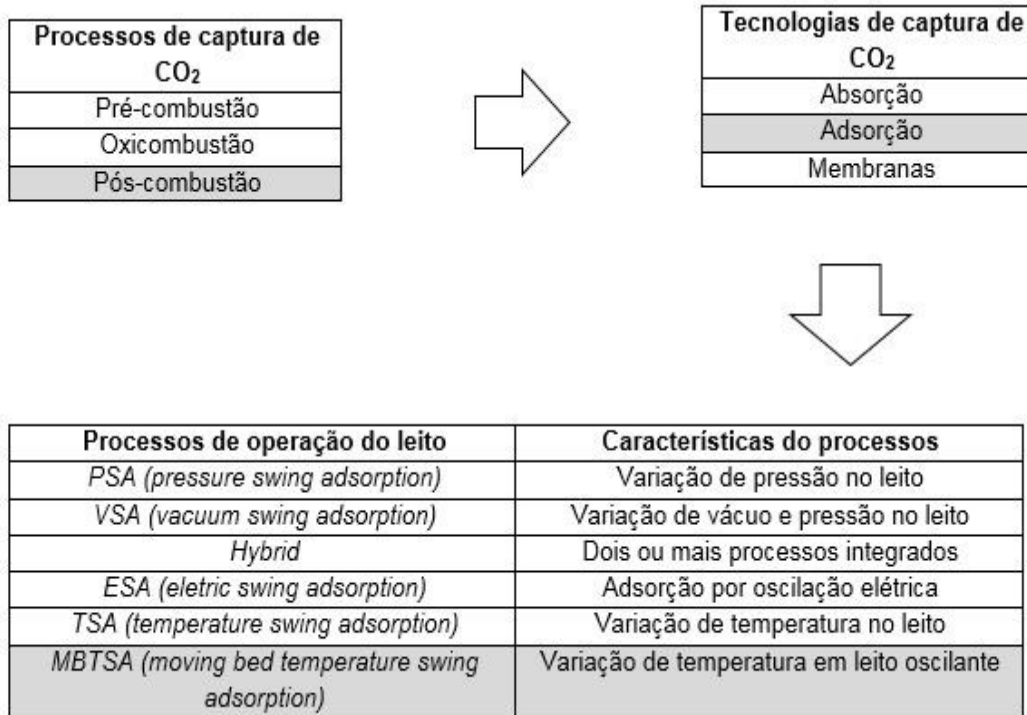
Para viabilizar o tempo de residência ideal, é preciso avaliar as alterações no leito com defletores e placas de geometrias e quantidade de furos variando a área de abertura, modelando e testando cada configuração. Por isso, a importância de desenvolver protótipos com configurações diferentes e analisar a influência de cada modelo no tempo de residência, com a finalidade de variar o tempo dos adsorvedores na zona de adsorção de forma a não prejudicar o funcionamento normal do leito.

O leito pode ser constituído em diversas configurações de operação que foram apresentadas ao longo desta seção. A combinação de cada processo, com as tecnologias de captura que podem ser utilizadas e as variáveis de operação no leito formam a planta de captura de CO₂.

Esquemáticamente, os processos e tecnologias utilizadas na planta de captura de CO₂ estudada podem ser vistos na Figura 7, mostrando os processos de captura de CO₂ mais utilizados, bem como as tecnologias de captura mais comuns e os processos de operação do leito da planta que tem sido mais estudados ultimamente.

Em cada processo a configuração de captura de CO₂ que este trabalho esta inserido foi selecionada.

Figura 7 – Processos e tecnologias selecionadas para captura de CO₂.



Fonte: Do autor (2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção foram apresentadas as etapas do trabalho que foram realizadas com o intuito de avaliar experimentalmente o tempo de residência das zeólitas e a capacidade de remoção de CO₂ para diferentes configuração do leito de adsorção do protótipo da planta piloto.

Primeiramente, a planta piloto existente no Centro Tecnológico SATC (CTSATC) e que se encontra sob fase implantação foi apresentada, com suas características construtivas e etapas do processo de captura. Em seguida, foram mostradas algumas propriedades do adsorvente sólido utilizado na planta piloto e, conseqüentemente, no protótipo estudado neste trabalho. Por fim, descreveu-se o protótipo que representa a zona de adsorção da planta piloto, em que foram realizados os testes de tempo de residência.

Uma apresentação dos equipamentos utilizados para aquisição dos dados do experimento, bem como suas características, também pode ser vista ao final desta seção.

4.1 A PLANTA PILOTO DE CAPTURA DE CO₂ DO CTSATC

Com foco em pesquisas que utilizem tecnologias inovadoras, o CTSATC, por meio de um projeto de pesquisa fomentado pela empresa ENEVA S.A. e uma parceria com a companhia americana *ARI (Adsorption Research, Inc.)* construiu uma planta piloto para captura de CO₂ na cidade de Criciúma, SC, nas dependências da SATC, que ficou pronta para operação e testes em julho de 2019. Essa planta piloto tem como base um processo de adsorção patenteado por Knaebel (2009).

A planta piloto (PP) opera com a tecnologia *MBTSA*, utilizando zeólitas 13 X como adsorvente, e é uma unidade constituída basicamente de uma estrutura metálica, contendo a zona de adsorção, a zona de pré-aquecimento, a zona de regeneração e a seção de recuperação.

Externamente a essa estrutura, tem-se um elevador de canecos por onde as zeólitas são recolhidas na base da planta (seção de recuperação) e transportadas até o topo para retornar à zona de adsorção.

As dimensões gerais da PP podem ser vistas na Tabela 3.

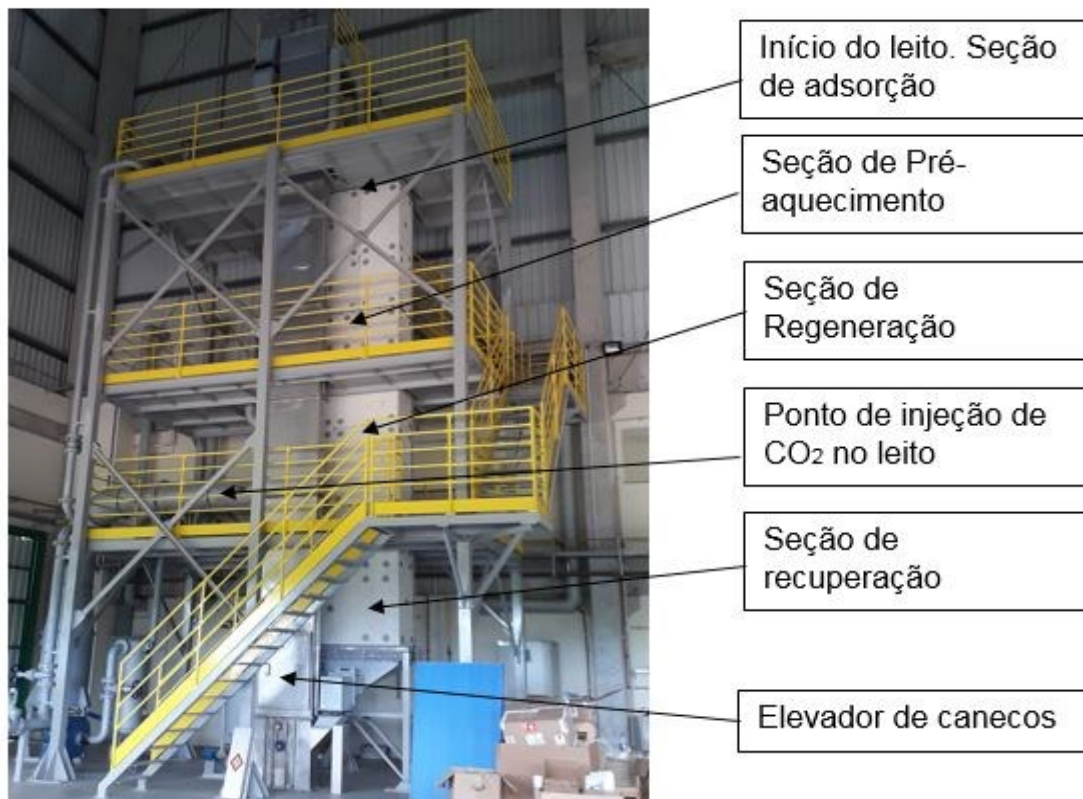
Tabela 3 – Dimensões gerais da planta piloto

Largura	1619 mm
Altura	8153 mm
Profundidade	704,85 mm

Fonte: Do autor (2020).

Toda a estrutura foi envolvida por plataformas de acesso, com escadarias, para que a operação fosse facilitada. A planta de captura fica em local apropriado para testes, protegida de chuva e sob uma estrutura metálica, o que permite trabalhar independentemente das condições do tempo. A partir daí têm sido realizados diversos testes para analisar sua operação e realizar as pesquisas e aperfeiçoamentos.

Na Figura 8, tem-se as estruturas explicadas separadamente, sendo a coluna dividida em quatro seções, além de conter um elevador de canecos para recirculação das partículas do fundo até o topo da unidade piloto.

Figura 8 – Esquema da planta piloto de captura de CO₂.

Fonte: Do autor (2020).

Na seção do leito de adsorção há um conjunto de placas defletoras dispostas em linha. Elas podem ser removidas e trocadas conforme as condições de operação desejadas. Os resultados de tempo de residência no protótipo obtidos nesta dissertação contribuirão para as possíveis modificações futuras na configuração das placas presentes na unidade piloto.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ZEÓLITA 13 X

A zeólita 13 X possui um bom desempenho na adsorção de CO₂ e é um material bastante recomendado para plantas de captura, se destacando em relação à zeólita tipo A e amina. A zeólita 13 X é produzida em escala comercial, sendo importada da China e utilizada para captura de CO₂ na planta piloto, por isso foi empregada também no protótipo.

Nos testes realizados neste trabalho na avaliação de tempos de residência com injeção da mistura CO₂ e N₂, as zeólitas foram preparadas da seguinte forma: primeiramente, simulou-se suas características ao saírem do regenerador da planta piloto, sendo dispostas em uma estufa a 200 °C durante o período de uma hora, de forma idêntica ao que acontece no sistema da planta piloto.

A estufa utilizada para a regeneração das zeólitas para os testes foi da marca Quimis, com capacidade para 200 °C. O modelo da estufa pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Estufa.



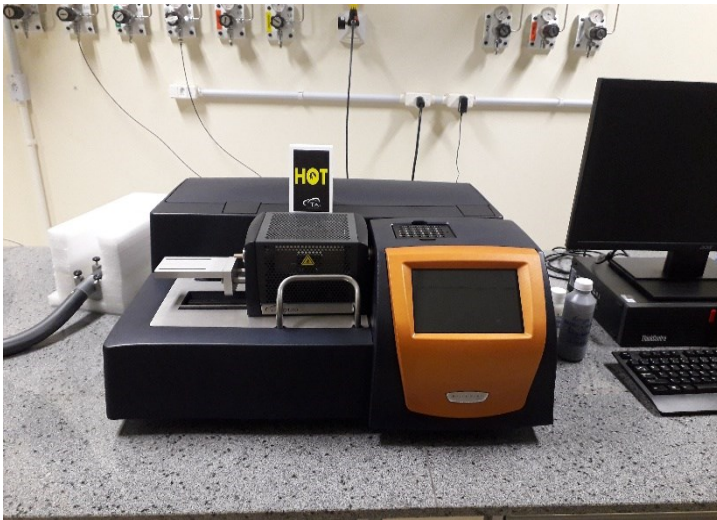
Fonte: Do autor (2020).

Após a saída da estufa, as zeólitas resfriaram em um dessecador livre de umidade até a temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C. Em seguida, as amostras foram analisadas por análise termogravimétrica (TGA) quanto à sua capacidade de adsorção em uma corrente de gás inerte de N₂ na concentração de 93% e CO₂ na concentração de 7%.

O equipamento utilizado é da marca *TA instruments* SDT650, modelo *Discovery MS*.

O equipamento de análise termogravimétrica (TGA), pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – TGA.



Fonte: Do autor (2020).

A fim de analisar a capacidade máxima de adsorção de CO₂ das zeólitas, em condições laboratoriais, elas foram regeneradas *in loco* no equipamento TGA a 300 °C e foram colocadas em uma corrente de gás inerte de N₂ na concentração de 93% e CO₂ na concentração de 7% para medir a capacidade máxima de adsorção.

Na Tabela 4 encontra-se a capacidade de adsorção de CO₂ e a resistência da zeólita 13 X que foi utilizada nos testes, bem como a capacidade máxima de adsorção da zeólita obtida em laboratório.

Tabela 4 – Capacidade de adsorção da zeólita comercial 13X (14% de CO₂ e 86% de N₂).

Amostra	Capacidade de adsorção gCO ₂ /g de adsorvente	Capacidade de adsorção mmol de CO ₂ /g de adsorvente	Resistência a compressão ou Tensão de ruptura (Mpa)
Zeólita 13 X utilizada nos testes	0,02027	0,46	13,82
Zeólita 13 X ativada em laboratório	0,18296	2,256	13,82

Fonte: Do autor (2020).

As demais propriedades e características geométricas da zeólita comercial 13 X, tais como área superficial específica, volume total de poros, diâmetro médio de poros, granulometria e massa específica aparente podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades da zeólita comercial 13 X.

Material	Área superficial específica BET (m ² g ⁻¹)	Volume total de poros (cm ³ g ⁻¹)	Diâmetro médio de poros (Å)	Granulometria (mm)	Massa específica aparente (kg/m ³)
Zeólita Comercial 13 X	497,80	0,34	28,06	1,6 a 2,6	610-710

Fonte: AQUINO (2018).

A composição da zeólita 13 X comercial utilizada pode ser vista na Tabela 6 em porcentagem de massa:

Tabela 6 – Composição da zeólita comercial 13 X.

Compostos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂
Zeólita Comercial 13X em % de massa	25,29	0,46	1,2	0,48	1,2	0,48	14,3	0,09	43,35	0,18	25,29

Fonte: AQUINO (2018).

4.3 PROTÓTIPO PARA TESTES DE CAPTURA DE CO₂

Para a realização dos testes experimentais foi desenvolvido um protótipo que representa a seção de adsorção da planta de captura de CO₂, bem como uma estrutura para a bancada e um alimentador de zeólitas.

4.3.1 Configuração do alimentador de zeólitas

O alimentador possui a finalidade de manter uma vazão contínua das zeólitas, fazendo o mesmo papel do elevador de canecos na planta piloto.

Na Figura 11 foi apresentado o dosador contínuo de zeólitas com uma estrutura de PVC e uma válvula de abertura.

Figura 11 – Dosador contínuo de zeólitas.



Fonte: Do autor (2020).

Esse dispositivo de dosagem simula a entrada das zeólitas no leito (saída do elevador de canecos). Para fins de testes de bancada, basta que sua vazão seja a mais contínua possível.

A vazão mássica alimentada foi controlada por meio das trocas dos anéis de vazão utilizados no dosador. Os anéis utilizados nos testes podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7– Configurações de dosador

Anel tipo 1	Anel tipo 2	Anel tipo 3	Anel tipo 4	Anel tipo 5
10 mm	11 mm	12 mm	13 mm	14,3 mm (livre)

Fonte: Do autor (2020).

Anéis menores de 10 mm não possibilitaram alcançar vazões satisfatórias das zeólitas, conforme analisado em testes preliminares e foram considerados limites inferiores do dosador. O limite superior é a vazão que permite que o sistema opere sem inundação. Foram feitos testes com diâmetros maiores que 14,3 mm e acarretaram na inundação do sistema, ocorrendo a formação de uma camada com zeólitas acumuladas que impediram o escoamento, não permitindo o funcionamento do protótipo e causando a obstrução do leito.

Uma vez garantida a vazão de zeólitas, obteve-se a representação de uma réplica da parte interna do leito, que para efeitos de melhor execução dos testes foi construída em acrílico, permitindo completa visualização do seu interior.

4.3.2 Protótipo do leito de adsorção

O protótipo tem como base o projeto da PP e a coluna de adsorção foi desenvolvida para realizar testes de tempo de residência das zeólitas, onde, para efeitos de testes, foi decidido que o protótipo deveria ter aproximadamente 1% da área da base do projeto real, para que tivesse um tamanho reduzido, com custos menores de elaboração e facilidade para os testes, já que a redução proporcional da área não interfere no tempo de residência. Porém, a altura entre as placas foi mantida a mesma para não perder a proporcionalidade, uma vez que o tempo de residência varia com a medida vertical do protótipo.

Na Tabela 8 tem-se as dimensões e principais características do protótipo.

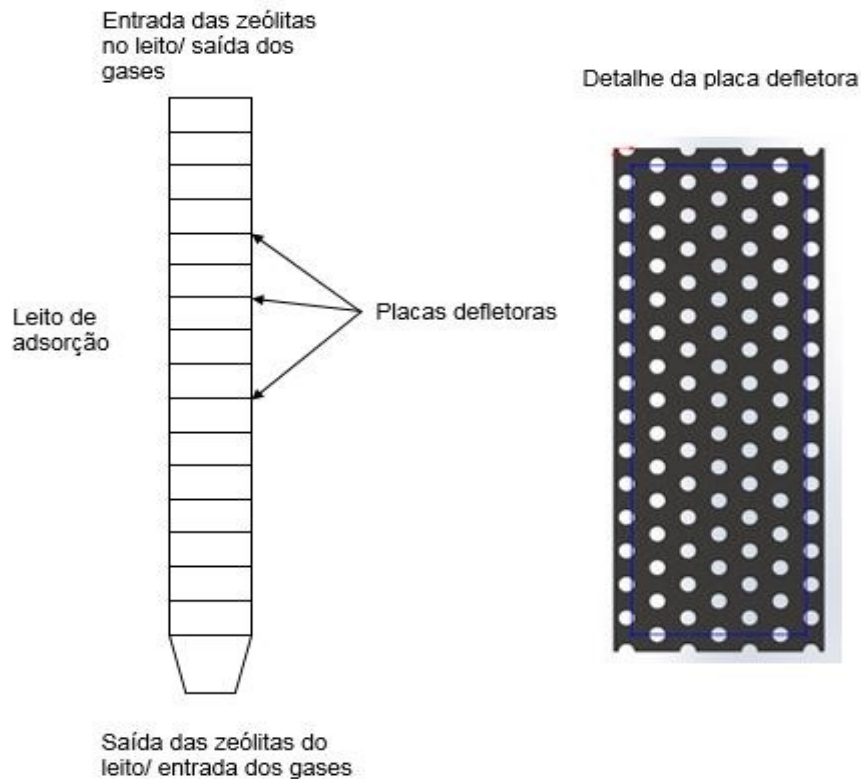
Tabela 8 – Dimensões internas do protótipo do leito de adsorção.

Descrição	Dimensão/material
Área	6860 mm ²
Largura	140 mm
Profundidade	49 mm
Altura	1800 mm
Espaçamento entre as placas	100 mm
Material principal do protótipo	Em acrílico transparente

Fonte: Do autor (2020).

O protótipo foi portanto, construído em acrílico, com uma série de blocos encaixados para garantir a operacionalidade e as diferentes configurações de leito testadas. Na Figura 12, pode ser visto um esquema do leito com as placas inseridas.

Figura 12 – Esquema do leito de adsorção e placas defletoras.



Fonte: Do autor (2020).

A estrutura é constituída de 16 blocos que são desmontáveis e podem ser encaixados um no outro formando a coluna por inteiro. Essa particularidade permitiu a troca das placas defletoras que foram avaliadas em cada um dos testes que formam cada configuração do leito.

A empresa Prolume foi contratada para realizar a construção do protótipo conforme as dimensões dadas. Uma vez o protótipo montado nas dependências do laboratório, foi feita a fixação da estrutura de acrílico em uma bancada de madeira e aço.

A seção de adsorção do leito prototipada pode ser vista detalhadamente na Figura 13, onde são apresentados os principais aspectos construtivos. Ressaltando que a altura do protótipo é a altura real da seção de adsorção presente na planta piloto, com a finalidade de tornar os resultados mais próximos da operação real.

Figura 13 – Protótipo do leito de adsorção.



Fonte: Do autor (2020).

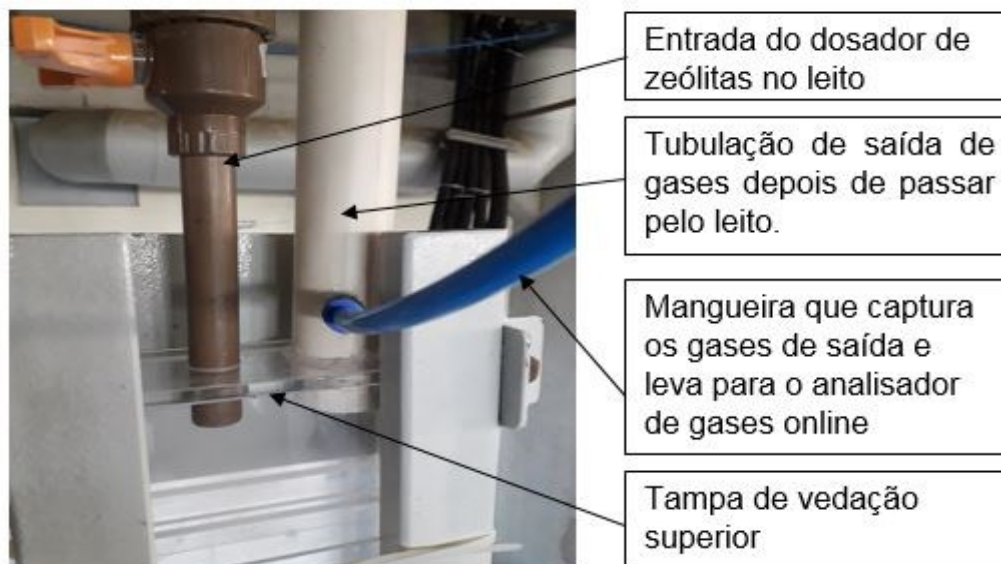
A bancada foi isolada com uma estrutura de madeirite, porta de acrílico, para melhor visualização, sendo que esta foi vedada com borracha em todo seu contorno, sendo comprimida contra a estrutura de madeira com o auxílio de três trincos e duas dobradiças e toda isolada com silicone nas emendas. A plataforma de pesagem e célula de carga fica dentro da bancada isolada.

Para os testes com injeção de ar e gases foi realizada a vedação e isolamento dos encaixes dos blocos e de toda a estrutura, a fim de garantir o escoamento pleno do gás sem vazamento.

Nos testes com uso de mistura CO_2 e N_2 , foi vedada também a superfície superior do leito, onde ocorre a saída dos gases, e colocada uma tampa de acrílico isolada com silicone e com uma tubulação para entrada das zeólitas pelo dosador e uma outra tubulação para saída dos gases. Nessa última existe uma mangueira posicionada que captura os gases e com o uso de bomba de vácuo os direciona para o analisador de gases.

Os detalhes da parte superior do leito podem ser vistos na Figura 14.

Figura 14 – Parte superior do protótipo do leito de adsorção.



Fonte: Do autor (2020).

4.3.3 Configurações do leito

As configurações do leito variam conforme os aspectos construtivos de cada jogo de placas testado e injeção ou não de ar, bem como injeção de CO_2 e N_2 .

Na Figura 15, tem-se a seção de adsorção do protótipo vista de cima.

Figura 15 – Seção de adsorção do leito vista de cima (detalhe para as placas furadas- defletores - 25% de abertura).



Fonte: Do autor (2020).

A largura e o comprimento das placas foram iguais para todas as configurações de placas testadas, a diferença entre elas foi o número de furos e, conseqüentemente área de abertura. As dimensões das placas utilizadas, são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões gerais das placas

Largura	140 mm
Profundidade	49 mm
Área	6860 mm ²

Fonte: Do autor (2020).

O projeto da planta piloto bem como a configuração das placas se baseou na patente e nos estudos de Knaebel (2009), e possuem uma área de abertura de 32%. Como o objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes configurações de leito no intuito de buscar tempos de residência maiores, foram desenvolvidas três configurações de placas defletoras com menor percentual de área de abertura.

A placa tipo 1 foi desenvolvida com 25% de abertura de área e 96 furos. Placas tipo 2 e 3 foram desenvolvidas com a finalidade de aumentar ainda mais o tempo de residência, para isso, foram variados geometria, área de abertura e espaçamento. Para o aumento do tempo de residência foi preciso diminuir a

porcentagem da área de abertura das placas, que ficou com 17% de abertura, para placa tipo 2 e aproximadamente 9% de abertura para placa tipo 3.

Na Tabela 10, têm-se as configurações das placas usadas.

Tabela 10 – Configurações das placas

Características	Placas Tipo 1	Placas Tipo 2	Placas Tipo 3
Área de Abertura	25%	17%	9%
Configuração de furos	Em triângulo	Em triângulo	Em triângulo
Diâmetro de furos	4,76 mm	4,76 mm	4,76 mm
Espaçamento	8,6 mm	10 mm	12,2 mm
Total de furos	96	67	35

Fonte: Do autor (2020).

Como os resultados desta pesquisa serão possivelmente implementados na planta piloto futuramente, foi necessário instalar tipos de placas disponíveis comercialmente, evitando a fabricação de peças customizadas, o que elevaria muito o custo do produto.

Os testes ocorreram em três configurações de operação, testadas para três tipos de placas e cinco tipos de anéis dosadores. Cada teste foi realizado 5 vezes. Na Tabela 11, foram apresentados os testes sem injeção de ar.

Tabela 11 – Configurações experimentais para os testes sem injeção de ar

15 Placas	Testes		SEM	Injeção de	AR
Configuração	Anel 10 mm	Anel 11 mm	Anel 12 mm	Anel 13 mm	Anel 14,3 mm
Placa 1, 25%, 96 furos	5X	5X	5X	5X	5X
Placa 2, 17%, 67 furos	5X	5X	5X	5X	5X
Placa 3, 9%, 35 furos	5X	5X	5X	5X	5X

Fonte: Do autor (2020).

No intuito de analisar a influência da vazão de ar no tempo de residência, foram realizados os testes com injeção de ar na base do protótipo (Tabela 12).

No anel 11 mm foram testadas duas vazões de ar, 75 L/min e 200 L/min. A definição dos valores das vazões testadas será explicado na seção 4.3.4.3.

Tabela 12 – Configurações experimentais para os testes com injeção de ar

15 Placas	Testes		COM	Injeção de	AR
Configuração	Anel 10 mm	Anel 11 mm	Anel 12 mm	Anel 13 mm	Anel 14,3 mm
Vazão de AR (L/min)	50	75/200	90	100	200
Placa 1, 25%, 96 furos	5X	5X	5X	5X	5X
Placa 2, 17%, 67 furos	5X	5X	5X	5X	5X
Placa 3, 9%, 35 furos	5X	5X	5X	5X	5X

Fonte: Do autor (2020).

Para os experimentos com injeção da mistura CO₂ e N₂ foram selecionados os testes mais confiáveis, excluindo-se o limite inferior (anel 10 mm) pelo fato de ser impreciso e ter alta variação, e o teste com anel 14,3 mm (livre) pelo fato de possuir elevada vazão de sólidos e ficar fora da capacidade operacional do protótipo. Também se optou por triplicata, ao invés de 5 testes devido ao gasto excessivo da mistura gasosa e com a alta utilização de zeólitas que neste teste passam uma única vez no leito sem serem novamente utilizadas.

Na Tabela 13, tem-se a estrutura dos testes com injeção de CO₂ e N₂.

Tabela 13 – Configurações experimentais para os testes com injeção de mistura CO₂ (14%) e N₂ (86%)

15 Placas	Injeção	Mistura	CO ₂ e N ₂
Configuração	Anel 11 mm	Anel 12 mm	Anel 13 mm
Vazão de CO₂/N₂ (L/min)	75	90	100
Placa 1, 25%, 96 furos	3X	3X	3X
Placa 2, 17%, 67 furos	3X	3X	3X
Placa 3, 9%, 35 furos	3X	3X	3X

Fonte: Do autor (2020).

Nos testes com injeção da mistura CO₂ e N₂, para avaliar a influência do número de placas no tempo de residência e na adsorção, foi realizado um conjunto de testes adicionais, onde foram duplicados o número de placas defletoras, colocando-se placas intermediárias no protótipo.

As dimensões do leito do protótipo continuaram as mesmas, conforme já mostradas na Tabela 8 da seção 4.3.2. A única alteração foi no espaçamento entre placas, que passou a ser de 50 mm ao invés de 100 mm, contabilizando 30 placas defletoras no lugar de 15.

Na Tabela 14 foram apresentados os esquemas dos testes realizados com a injeção da mistura CO₂ e N₂ com 30 placas no leito de adsorção do protótipo.

Tabela 14 – Configurações experimentais para os testes com injeção de mistura CO₂ e N₂ com 30 placas

30 Placas	Injeção	Mistura	CO ₂ e N ₂
Configuração	Anel 11 mm	Anel 12 mm	Anel 13 mm
Vazão de CO ₂ / N ₂ (L/min)	75	90	100
Placa 1, 25%, 96 furos	3X	3X	3X
Placa 2, 17%, 67 furos	3X	3X	3X
Placa 3, 9%, 35 furos	3X	3X	3X

Fonte: Do autor (2020).

4.3.4 Variáveis de operação

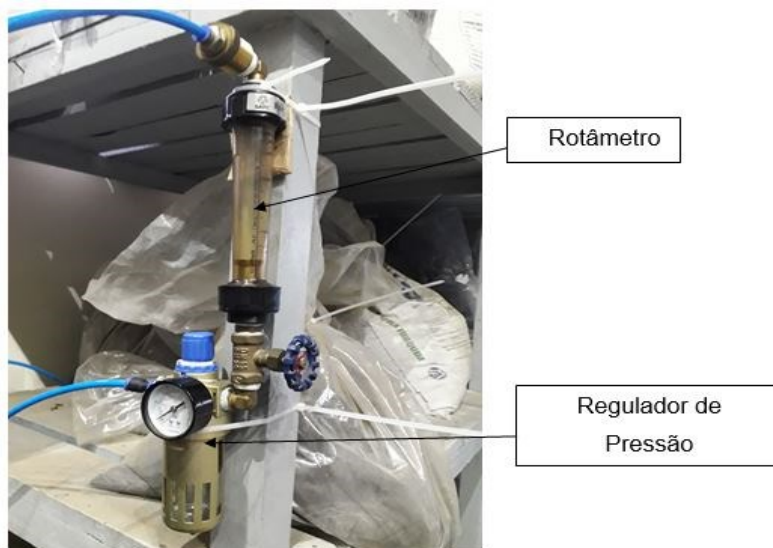
4.3.4.1 Pressão

Os testes experimentais em protótipo não sofreram variação de pressão no leito, uma vez que o processo de adsorção ocorre a pressões atmosféricas. A pressão foi controlada por um regulador de pressão da marca Fluir, modelo BEFR4000 SUPPLY PRESS, 0,05-1,0 Mpa que se manteve em 1 bar ou 0,1 Mpa.

O fluxo, por sua vez foi controlado por um rotâmetro, marca AppliTech, 1 bar a 21 °C AP-MK-650SS/22/Sg OP-11137.C devidamente calibrado para 1 bar e que opera de 30 L/min a 450 L/min.

Na Figura 16, pode-se ver o rotâmetro e o regulador de pressão utilizado nos testes. A mangueira de ar ou injeção da mistura de CO₂ e N₂ entra primeiramente no regulador de pressão, onde é realizado o devido ajuste que, por sua vez, conectado a um rotâmetro com regulagem, possibilitando operar nas vazões de fluido utilizadas nos testes. A mangueira sai pela parte superior do rotâmetro e segue para a bancada de testes, entrando no leito de adsorção.

Figura 16 – Rotâmetro e regulador de pressão.



Fonte: Do autor (2020).

4.3.4.2 Temperatura

Não houve variação de temperatura, uma vez que o processo de adsorção ocorre em temperatura ambiente, ou seja, por volta dos 25 °C.

Na situação de captura de CO₂ em escala piloto, existe um trocador de calor na regeneração, seguida de uma torre de resfriamento adiabática, que garantirá que o gás de exaustão subirá para a zona de adsorção praticamente na temperatura ambiente.

4.3.4.3 Vazões de sólidos e de fluidos

Primeiramente foram executados testes para se obter os valores de vazão mássica para cada anel de dosagem do alimentador de zeólitas. Posteriormente foi feito o cálculo de vazão mássica por área para manter a mesma proporcionalidade entre a planta piloto e o protótipo.

Na Tabela 15 foram apresentadas as vazões mássicas, ou seja as vazões de sólidos (zeólitas) utilizadas nos testes. A proporção do fluxo mássico do protótipo em relação a planta nada mais é que a porcentagem do fluxo mássico do protótipo em relação ao fluxo mássico nominal inicialmente dimensionado para a planta (47,3 kg/m².min).

Tabela 15 – Vazões de sólidos (zeólitas)

Dosador de zeólitas	Protótipo	Proporção do fluxo mássico do protótipo em relação a planta	Fluxo mássico (planta piloto/protótipo)
Anel	Vazão Média (kg/s)	Proporção (%)	Vazão Média (kg/m ² .min)
10	0,006155	0,84	53,83
11	0,009667	1,32	84,55
12	0,011320	1,55	99,00
13	0,013289	1,82	116,23
14,3	0,029810	4,08	260,72

Fonte: Do autor (2020).

O menor fluxo de massa alcançado no protótipo foi 53,83 kg/m².min, pois com anéis menores ocorreu o entupimento do dosador de zeólitas e elas não escoaram. Desta forma, adotou-se o anel 10 mm como limite inferior. A faixa de testes foi realizada com valores um pouco acima do fluxo mássico dimensionado para o projeto da planta piloto inicialmente que foi de 47,3 kg/m².min, isso devido a uma limitação das zeólitas de escoarem em anéis com vazões menores. Por isso foi utilizada uma faixa de fluxo mássico um pouco acima da faixa inicialmente dimensionada para a planta, para que os experimentos fossem possíveis.

Em contrapartida, o anel 14,3 mm foi o limite superior, em que ocorreu inundação no teste com a placa tipo 3, de 9% de abertura de área, trazendo maior restrição e impedindo o escoamento no leito.

Com o intervalo de vazões mássicas médias definido, foi possível avaliar o comportamento do tempo de residência para vazões de zeólitas dentro deste intervalo.

Para garantir a captura de CO₂, a vazão proporcional de gás exausto deve ser sempre menor que a vazão de sólidos, ou seja, as vazões de ar ou da mistura CO₂ e N₂ devem respeitar a seguinte relação, conforme sugerido no projeto da planta piloto por Knaebel, (2015).

$$\dot{m}_{gás} * cp_{gás} < \dot{m}_{sólido} * cp_{sólido} \quad (1)$$

Onde,

$\dot{m}_{gás}$ – vazão mássica de gás exausto (kg/s)

$cp_{gás}$ – calor específico do gás exausto à pressão constante (kJ/kg.°C)

$\dot{m}_{sólido}$ – vazão mássica de zeólitas (kg/s)

$cp_{sólido}$ - calor específico do gás exausto à pressão constante (kJ/kg.°C)

Os valores das propriedades utilizados nos cálculos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores usados para o cálculo de vazão proporcional.

Dados	Valor	Unidades	
ρ_{ar}	1,2	kg/m ³	Ar atmosférico
$cp_{gás}$	1,0048	kJ/kg°C	Ar atmosférico
$cp_{(sólido)}$	1	kJ/kg°C	Zeólita 13 X

Fonte: Do autor (2020).

A planta piloto foi dimensionada para operar inicialmente com uma vazão nominal de 44 kg/min ou 47,3 kg/m².min de fluxo mássico de zeólitas e 5,7653 m³/min de vazão de gás de exaustão.

A partir desses dados foram obtidas as vazões proporcionais de fluido para cada vazão de sólidos nos testes do protótipo, como apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Vazões de ar e da mistura de CO₂ e N₂

Dosador	Valor considerado para teste	Protótipo Calculada	Protótipo Calculada	Proporção da vazão de gás do protótipo em relação a planta	Planta Piloto Proporcional
Anel	Vazão Média (L/min)	Vazão Média (L/min)	Vazão Média (m ³ /min)	Proporção (%)	Vazão Média (m ³ /min)
10	50	48,39	0,04839	0,84	6,55
11	75	76,00	0,07600	1,32	10,29
12	90	88,99	0,08899	1,54	12,06
13	100	104,47	0,10447	1,81	14,15
14,3	200	234,35	0,23435	4,06	31,76

Fonte: Do autor (2020).

Como a faixa de vazão mássica de zeólitas para os testes ficou acima da vazão mássica inicial da planta piloto, devido às características das zeólitas, consequentemente, a vazão média de gás também ficou com uma faixa um pouco acima da vazão de gás utilizada inicialmente na planta piloto, respeitando a proporção vazão de sólidos-vazão de fluidos proposta para a planta.

O rotâmetro utilizado foi calibrado para a utilização com ar. Para ser utilizado nos testes com a mistura CO₂ (14%) e N₂ (86%), foi realizado o cálculo de correção do rotâmetro, conforme Maurici e Dutra, (1999).

$$F_c = F_t * F_d * F_p \quad (2)$$

Onde,

F_c – fator de correção do rotâmetro.

F_t – fator de correção devido a temperatura do gás.

F_d – fator de correção devido à densidade do gás

F_p - fator de correção devido à pressão do gás.

Para achar o fator de correção da temperatura do gás, tem-se:

$$F_t = \sqrt{\frac{T_{cal}+273}{T_t+273}} \quad (3)$$

Onde,

T_{cal} – Temperatura à qual o instrumento foi calibrado (°C).

T_t – Temperatura de trabalho (°C).

Para encontrar o fator de correção devido à densidade do gás, tem-se:

$$F_d = \sqrt{\frac{d_{rel}}{d_t}} \quad (4)$$

Onde,

d_{rel} – Densidade relativa ao ar, do gás com que o instrumento foi calibrado.

d_t – Densidade relativa ao ar, do gás utilizado.

Para calcular o fator de correção de pressão para os testes com utilização da mistura CO₂ e N₂, tem-se:

$$F_p = \sqrt{\frac{P_t+P_a}{P_{cal}+P_a}} \quad (5)$$

Onde,

P_t – Pressão no interior do instrumento, com o gás utilizado (bar).

P_a – Pressão atmosférica (bar).

P_{cal} – Pressão de calibração do instrumento (bar).

Para o cálculo foram considerados os seguintes valores, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores usados para o cálculo de correção do rotâmetro.

Variáveis	
T_{cal}	21 °C
T_t	25 °C
d_{rel}	1 bar
d_t	1 bar
P_t	1 bar
P_a	1,0133 bar
P_{cal}	1 bar

Fonte: Do autor (2020).

O fator de correção resultou em 0,97138. E os valores corrigidos foram calculados para todas as vazões determinadas nos testes. Os resultados das vazões corrigidas, bem como o valor utilizado no rotâmetro são apresentados no Quadro 3.

O valor do rotâmetro e valor corrigido estão em L/min.

Quadro 3 – Valores calculados para correção do rotâmetro.

Rotâmetro	
Valor no Rotâmetro	Corrigido
0	0
50	48,56
75	72,85
90	87,42
100	97,13
200	194,27

Fonte: Do autor (2020).

Como a densidade e o calor específico do ar e da mistura de CO₂ (14%) e N₂ (86%) são muito próximos, uma vez que o ar é composto por 78% de nitrogênio, considerou-se os mesmo valores para os cálculos de vazões médias de gás exausto para os testes com ar e para os testes com a mistura de CO₂ e N₂, respeitando a proporcionalidade de volume da PP e do protótipo.

4.3.4.4 Testes com injeção de mistura de CO₂ e N₂

Os testes com injeção de mistura de CO₂ e N₂, foram feitos com a seguinte proporção mássica: CO₂: 14% e N₂: 86%.

Esta proporção não foi variada neste estudo, haja vista que o objetivo deste trabalho é simular os gases que saem da queima da termoelétrica em regime de pós combustão a carvão e esta é a concentração média dos gases que serão recebidos pela planta piloto para testes.

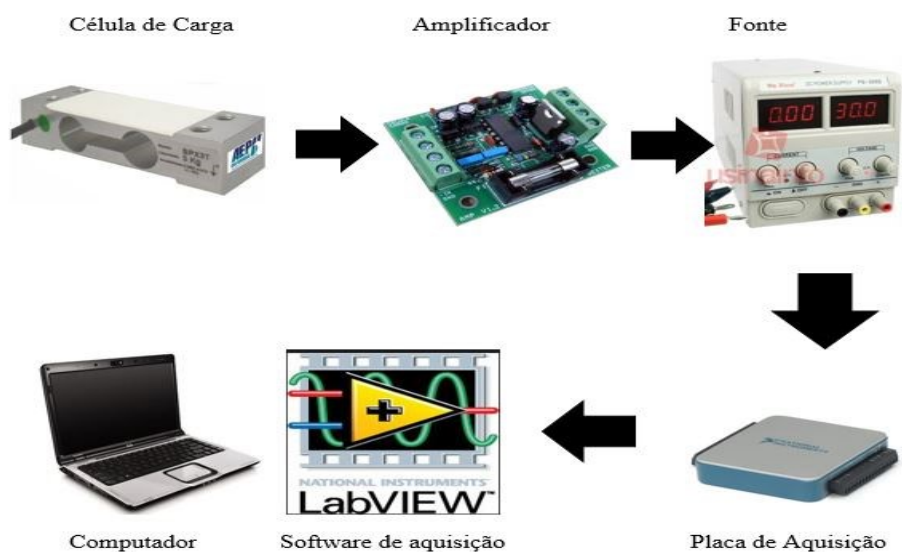
4.4 EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

4.4.1 Software e Sistema de aquisição de dados

O software de aquisição foi o *Labview*, da *National Instruments*, com a licença de uso da Faculdade SATC. O esquema de aquisição de dados, de uma maneira geral, foi composto por uma célula de carga embutida em uma estrutura de plataforma de balança para coletar a massa em um recipiente.

Na Figura 17, é possível ver um esquema dos equipamentos utilizados para a aquisição de dados dos experimentos.

Figura 17 – Esquema de aquisição de dados.



Fonte: Do autor (2020).

Os dados de massa e tempo foram adquiridos pela célula de carga e o sinal foi para um amplificador de sinal de célula de carga. Esse sinal foi ampliado para uma fonte de alimentação, evitando oscilações na rede e protegendo o sistema das oscilações de energia, regulando a tensão. Conectado a fonte de alimentação, tem-se uma placa de aquisição da *National Instruments* para a leitura dos dados com precisão que se comunica com o software *Labview* instalado no computador. Na sequência é possível coletar os dados extraídos do software *LabView* e exportar para o software Excel. No Excel os dados foram trabalhados e organizados e com isso se conseguiu os resultados para os testes realizados.

4.4.2 Célula de Carga

Para a obtenção dos dados de massa de zeólitas que sai do leite e o tempo que ela leva para percorrer a seção de adsorção foi utilizada uma célula de carga modelo SPX3T da empresa AEPH do Brasil com capacidade para 10 kg. Esse equipamento mede a massa das zeólitas em um determinado espaço de tempo com bom nível de precisão. O modelo de célula de carga utilizado e suas principais especificações podem ser vistas na Tabela 17.

Tabela 17 – Especificações da célula de carga

CÉLULA DE CARGA	CONSUMO	UNIDADES
Modelo	SPX3T	-
Capacidade	10	kg
Sensibilidade	2,00 ± 10%	mV/V
Sobrecarga segura	150	%
Tensão de entrada recomendada	5 a 10	V
Tensão de entrada máxima	15	V
Tensão de saída **	20	mV

** Tensão de saída máxima para a tensão de entrada recomendada.

Fonte: AEPH do Brasil (2019).

4.4.3 Amplificador para célula de carga

O amplificador para célula de carga possui fonte estabilizadora de 10 V para alimentar a célula, e diferencial com ganho de 100 vezes para leitura de peso. O amplificador utilizado para a célula de carga foi fornecido pela marca Dexter Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos. Na Figura 18, tem-se o modelo do amplificador utilizado nos testes.

Figura 18 – Amplificador para célula de carga



Fonte: DEXTER Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos LTDA (2019).

4.4.4 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação utilizada foi fornecida pela Usinainfo Eletrônica e Robótica e é mais precisamente uma fonte de alimentação digital regulável 30 V 5 A – PS 305 D Bivolt 127 V -220 V. Suas principais especificações podem ser vistas na Tabela 18.

Tabela 18 – Especificações da fonte de alimentação

Especificações	Características
Alimentação	127/220 V +/- 10 %
Tensão de saída	DC 0 a 30 V
Corrente de saída	0 a 5A
Potência de entrada	350 W (consumo máximo)
Precisão do display voltagem	+/-1% +/-1 dígito
Precisão do display corrente	+/-1% +/-1 dígito
Estabilidade da tensão	≤0,01% +2 mV
Estabilidade da corrente constante	≤0,1% +2 mA
Proteção contra sobrecarga	-

Fonte: Usinainfo Eletrônica e Robótica (2019).

4.4.5 Placa NI USB 6001

A placa de aquisição utilizada foi fabricada pela marca *National Instruments* modelo NI USB 6001 e pode ser vista na Figura 19.

Figura 19 – Placa de aquisição.



Fonte: *National Instruments* (2014).

As especificações da placa de aquisição usada foi apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Placa de aquisição USB 6001

Especificações	Características
Modelo	NI USB 6001
Quantidade máxima de canais single-ended de entrada analógica	8
Quantidade máxima de canais diferentes de entrada analógica	4
Taxa de amostragem	20 KS/s
Resolução de entrada analógica	14 bits
Exatidão absoluta da entrada analógica	26 mV
Quantidade de canais de saída analógica	2
Quantidade de contadores temporizados	1
Quantidade de canais bidirecionais	13
Buffer de FIFO de entrada analógica	2047 <i>samples</i>

Fonte: *National Instruments* (2014).

4.4.6 Analisador de gases online

Ao longo de cada teste com a mistura gasosa CO₂ e N₂, o gás exausto (que deixa o protótipo) passa em tempo real em um analisador de gases, para avaliar sua

composição química, possibilitando assim o cálculo da quantidade de CO₂ que foi efetivamente adsorvido pelas zeólitas em cada teste.

Na Figura 20, pode-se ver o analisador de gases da marca *Thermoscientific*, modelo Prima Pro, que foi utilizado para os testes.

Figura 20 – Analisador de gases online.



Fonte: Do autor (2020).

4.5 METODOLOGIA DE TESTES

Para realização dos testes, executou-se a seguinte sequência:

(i) Abertura do alimentador de zeólitas e início da operação do *software* de aquisição de dados, simultaneamente. Nos testes com vazão de ar e da mistura de CO₂ e N₂ o regulador de vazão foi aberto anteriormente ao alimentador de zeólitas e início do sistema de aquisição. Aguardou-se a normalização da vazão para iniciar os testes.

(ii) Espera pela total queda das zeólitas, choques de partícula-partícula e partícula-parede.

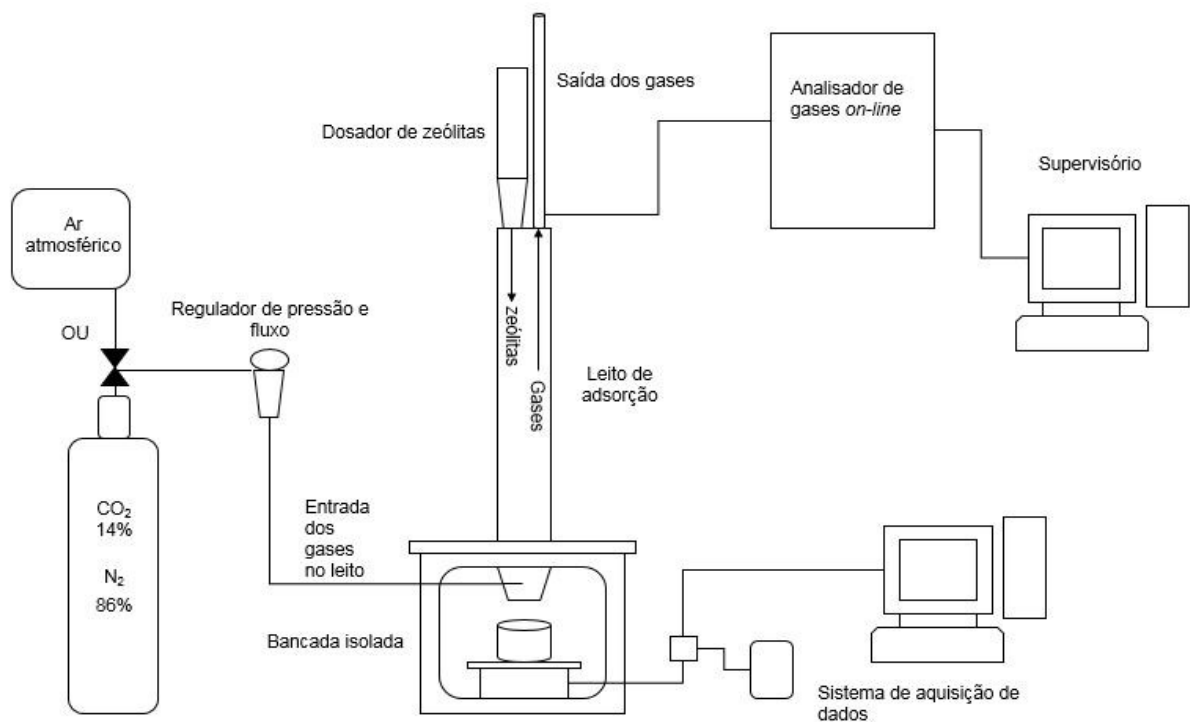
(iii) Encerramento do *software* e exportação dos dados para o Excel para serem posteriormente tratados a fim de obter os resultados.

Esta sequência foi realizada cinco vezes para os testes sem injeção de ar e com injeção de ar na base e três vezes para os testes com injeção de CO₂ e N₂.

Na Figura 21, tem-se um esquema dos testes experimentais, onde se pode ver o dosador de zeólitas que permite a entrada das zeólitas no leito de adsorção até ficarem armazenadas em um recipiente posicionado acima da balança, sendo esta integrada ao sistema de aquisição de dados. Em contracorrente tem-se o fluxo de gás (ar ou mistura CO₂ e N₂), e na parte superior a saída dos gases do leito para a atmosfera. Na parte superior, bem no início, tem-se a saída para o analisador de gases, onde o gás segue para a análise de CO₂ e N₂. Para controlar a pressão do ar e mistura de gases CO₂/N₂, foi empregado um regulador de pressão, já para controlar a vazão empregou-se um rotâmetro.

A bancada foi toda isolada, e a única comunicação com a atmosfera é a saída na parte superior, o que faz com que o gás siga o fluxo e suba até sair para a atmosfera. O supervisor fica conectado ao analisador de gases e recebe em tempo real a concentração de gases presente no teste.

Figura 21 – Esquema do teste experimental.



Fonte: Do autor (2020).

4.6 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Como resultado de saída dos testes se tem os intervalos de tempo, e para cada tempo em segundos se tem um valor respectivo de massa em quilogramas para aquele tempo. Os equipamentos de aquisição permitem coletar 500 dados por segundo, em que a própria placa de aquisição faz uma média desses 500 dados e lança 2 dados por segundo. Esse número de dados para cada segundo é suficiente, já que não existe uma variação de massa considerável nesse espaço de tempo.

Com isso, na Figura 22, pode-se ver a planilha de cálculos em Excel. Para cada teste realizado se constrói uma planilha com desse mesmo modelo.

Figura 22 – Planilha de cálculo empregada para cada teste experimental.

F	G	H	I	J
tempo (s)	Massa que sai do sistema (kg)	massa adicionada (kg)	Massa no sistema (kg)	Vazão mássica que sai com o tempo (kg/s)
0	0	0	0	
0,5	0	0,005522131	0,005522131	0
1	0	0,011044263	0,011044263	0
1,5	0	0,016566394	0,016566394	0
2	0	0,022088525	0,022088525	0
2,5	0	0,027610657	0,027610657	0
3	0	0,033132788	0,033132788	0
3,5	0	0,038654919	0,038654919	0
4	0	0,044177051	0,044177051	0
4,5	0	0,049699182	0,049699182	0
5	0	0,055221313	0,055221313	0
5,5	0	0,060743445	0,060743445	0
6	0	0,066265576	0,066265576	0
6,5	0	0,071787707	0,071787707	0
7	0	0,077309839	0,077309839	0
7,5	0,001778	0,08283197	0,08105397	0,000508
8	0,004772	0,088354102	0,083582102	0,001668229
8,5	0,01101	0,093876233	0,082866233	0,004065371
9	0,016259	0,099398364	0,083139364	0,006703943
9,5	0,02038	0,104920496	0,084540496	0,008661771
10	0,024479	0,110442627	0,085963627	0,0094616
10,5	0,030802	0,115964758	0,085162758	0,0099816
11	0,035834	0,12148689	0,08565289	0,009819886
11,5	0,042531	0,127009021	0,084478021	0,010516857
12	0,046743	0,132531152	0,085788152	0,010914457
12,5	0,053427	0,138053284	0,084626284	0,011386286

Fonte: Do autor (2020).

Na coluna “F” se tem o tempo em segundos (s) e na coluna “G” a massa em (kg) que sai do sistema para cada intervalo de tempo. Essas duas variáveis são os dados de saída do teste. Com esses dados pode-se calcular as demais variáveis.

Para o cálculo da vazão mássica foi realizado a função “MÉDIA” da coluna “J” e também a função “INCLINAÇÃO” entre a coluna “G” (massa que sai do sistema) e “F” (o tempo em segundos), sendo que os dois valores são bem parecidos e servem como confirmação um do outro.

Ainda na Figura 22, na coluna “H” tem-se a “massa adicionada”, que é a massa que está sendo colocada no sistema na entrada do leito, ou seja, na saída do alimentador. Mais simplificada, é a massa que está saindo do alimentador a cada intervalo de tempo. Para estimar seu valor foi feito o seguinte cálculo:

$$\dot{m}_{ad} = t * \dot{Q}_s \quad (6)$$

Onde:

\dot{m}_{ad} – massa adicionada em (kg)

t – intervalo de tempo em (s)

\dot{Q}_s – vazão mássica de zeólitas (kg/s).

Com estes valores pode-se calcular a “massa no sistema”, que pode ser vista na coluna “I” da Figura 22. Ela pode ser encontrada fazendo a subtração entre as colunas “H” (massa adicionada) e “G” (massa que sai do sistema).

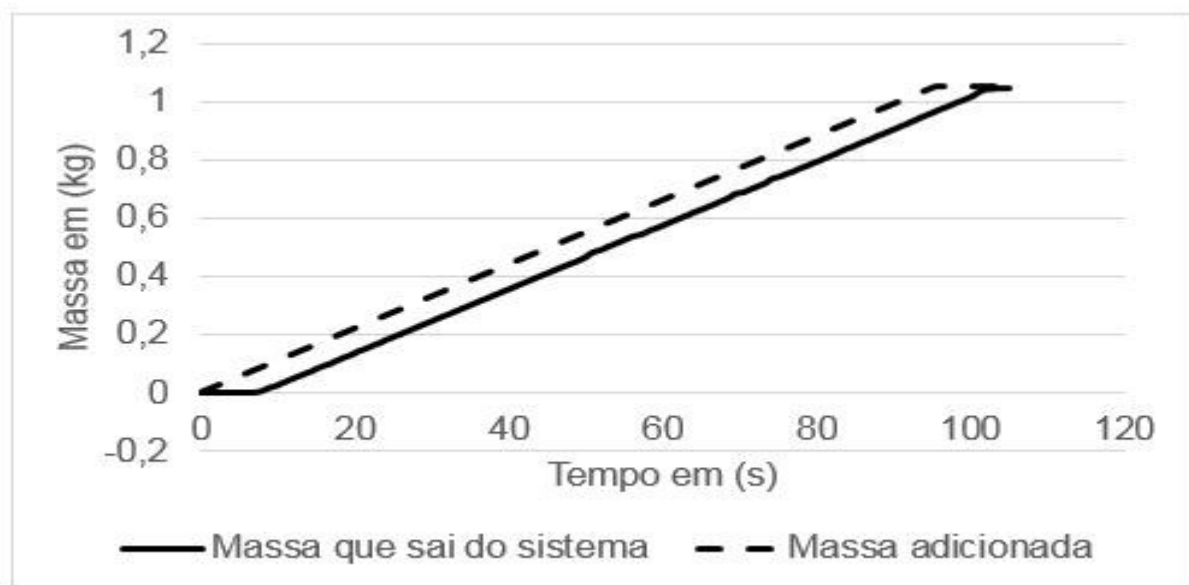
Por fim, fez-se o cálculo com a função “INTERCEPÇÃO” entre as colunas “G” (massa que sai do sistema) e “F” (tempo em segundos). Com isso, se obteve o ponto onde a reta (massa que sai do sistema) da Figura 23 tocava o eixo das ordenadas e o valor correspondente de massa do instante zero até o momento em que a vazão estabiliza. Também é calculada a função R quadrática para averiguar a precisão da reta, fazendo a função “RQUAD” entre as colunas “G” (massa que sai do sistema) e “F” (tempo em segundos).

Para calcular o tempo de residência, a massa que sai do sistema considerada para os cálculos é o valor da massa coletada desde o instante zero, quando é aberto

o dosador, até o momento em que a vazão estabiliza, entrando em regime permanente, ou seja, nada mais é que o ponto de intercepção da reta contínua (massa que sai do sistema) da Figura 23, quando ela é projetada e toca o eixo das ordenadas, encontrando um valor correspondente de massa.

Para que se possa compreender melhor o cálculo da intercepção das retas e o tempo de residência, tem-se as curvas da Figura 23 que é levantada para cada teste.

Figura 23 – Gráfico das vazões (massa que sai do sistema e massa adicionada).



Fonte: Do autor (2020).

Com o valor da massa coletada e o valor da vazão estabilizada, pode-se encontrar o tempo de residência médio utilizando a equação 8.

$$Q = \frac{m}{t} \quad (7)$$

Mais precisamente, isolando o tempo de residência em função da massa e da vazão e obtendo:

$$t_{res} = \frac{m}{Q} \quad (8)$$

Onde:

m - massa total das partículas de zeólitas (kg)

Q - vazão mássica das partículas de zeólitas no leito de adsorção (kg/s)

t_{res} - tempo de residência das partículas de zeólitas no leito de adsorção (s)

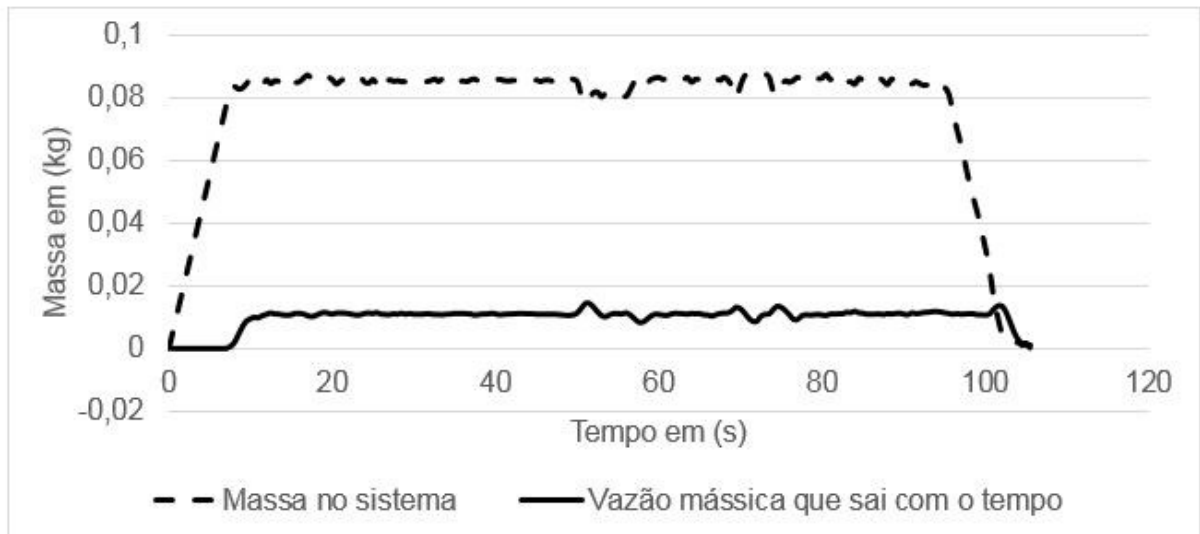
Na Figura 23 a linha tracejada é a massa que está entrando no sistema e em linha contínua a massa que está saindo do sistema ou leito de adsorção. Repare que existe um período de tempo, bem no início da linha contínua, em que a quantidade de zeólitas que cai inicialmente é muito próximo de zero e rapidamente o sistema entra em regime permanente. Esse intervalo de tempo, é o tempo de residência. Ou seja, o tempo que as partículas levam para percorrer todo o leito de adsorção e entrar em regime permanente.

Para que os valores sejam mais precisos, é necessário considerar a parte segura da reta, garantindo assim valores para os cálculos das funções “INCLINAÇÃO”, “RQUAD” e “INTERCEPÇÃO”, bem como vazão e consequentemente tempo de residência. Para utilizar a parte segura da reta, ou seja, onde a reta está mais perfeita com sua tendência bem delineada, excluindo as variações de início e fim, é preciso selecionar a faixa do gráfico onde isso ocorra e selecionar a maior parte da reta para que os cálculos fiquem o mais próximo da realidade possível. Neste caso, foram selecionados os dados do ponto referente ao tempo 15 segundos, até o ponto de 85 segundos. E para todas as repetições deste mesmo teste, utilizou-se os mesmos pontos.

Outro dado importante a ser avaliado é o de escoamento no sistema, fazendo um comparativo da massa no sistema e a vazão mássica que sai com o tempo, como pode ser visto na Figura 24.

Pode-se perceber ao analisar a Figura 24 que a vazão mássica que sai com o tempo (linha contínua), entra em regime permanente bem rápido. Sendo que a massa correspondente ao período do instante zero até o momento em que a vazão entra em regime permanente, que foi calculado anteriormente pela função “intercepção”, pode ser visto com mais detalhe no gráfico da Figura 24.

Figura 24 – Gráfico do escoamento no sistema.



Fonte: Do autor (2020).

Com isso foi possível obter uma correlação da massa que fica no sistema e seu comportamento de início na seção de saída até o final do escoamento por completo.

Para cada um dos testes executados foi realizado toda essa estrutura de cálculo, sendo que os dados foram tratados, eliminando-se possíveis pontos de oscilações da rede de energia, que raramente acontece, devido às proteções.

Também existem oscilações aleatórias no escoamento, que são bem pequenas e podem ser vistas nos gráficos, fazendo com que não sejam retas perfeitas, isso devido à variação natural das zeólitas que fluem, ora mais, ora menos, e que essas oscilações só aparecem no gráfico devido à grande sensibilidade dos equipamentos de aquisição. Portanto, o resultado principal de cada teste é o tempo de residência.

4.6.1 Metodologia para testes com injeção de CO₂ e N₂

Nos testes com injeção de gás, o cálculo do tempo de residência seguiu a metodologia apresentada anteriormente. A pressão e vazão de saída desejada para o gás que sai do cilindro para ser alimentado no protótipo foram conferidas utilizando-se um regulador de pressão e um rotâmetro, respectivamente.

Aguardou-se que a concentração de CO₂ na bancada estabilizasse, chegando por volta dos 14% e então os testes foram iniciados liberando-se a vazão de sólidos e concomitantemente acionando o software de captura de dados.

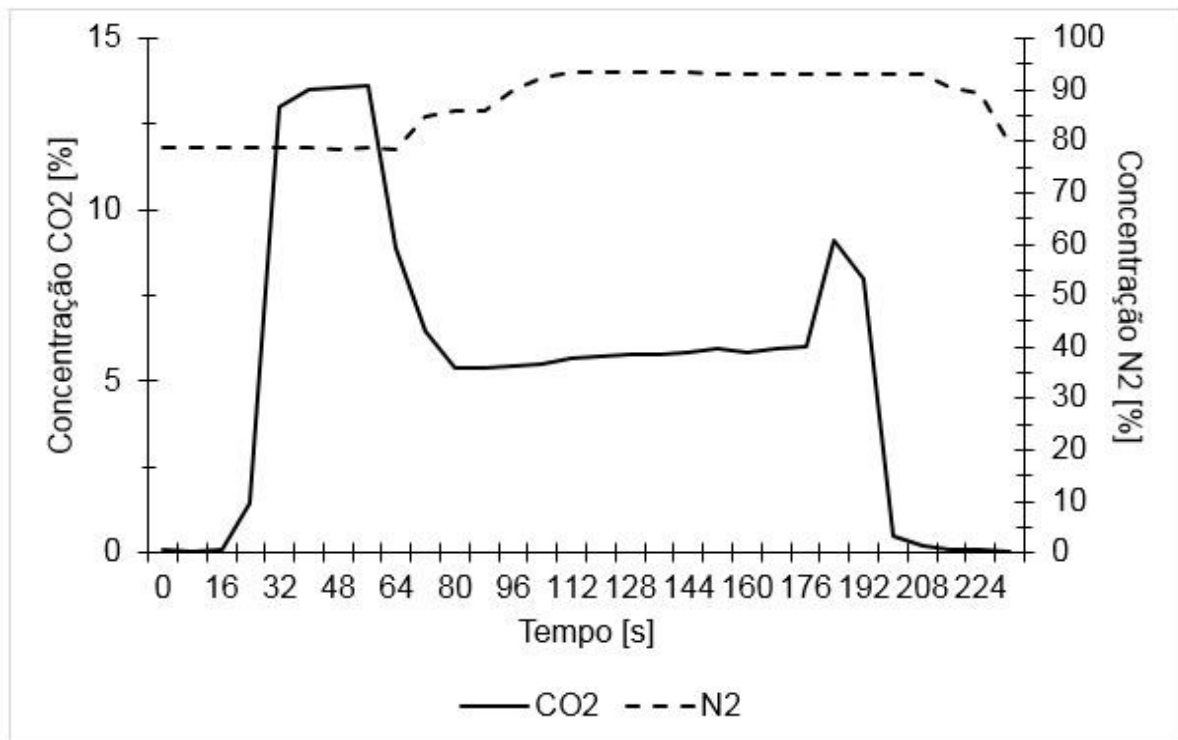
O analisador de gases ficou ligado continuamente, sendo possível visualizar o pico da corrente de CO₂ e o processo de adsorção pelas zeólitas. O segundo pico, é o fim do teste, quando as zeólitas terminam de escoar no leito.

O cálculo do percentual de remoção é feito pela seguinte fórmula:

$$\frac{\text{Concentração máx de \%CO}_2 - \text{Concentração mín de \%CO}_2}{\text{Concentração máx de \%CO}_2} = \% \text{ Remoção CO}_2 \quad (9)$$

Os dados foram coletados e o cálculo do percentual de remoção de CO₂ foi feito para cada teste. Na Figura 25, tem-se um modelo de como os dados são coletados de um teste de adsorção com as correntes de CO₂ e N₂ e seus respectivos picos.

Figura 25 – Gráfico da análise de adsorção.



Fonte: Do autor (2020).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As diferentes configurações dos testes experimentais permitiram encontrar diferentes tempos de residência e vazões de saída de zeólitas. Conforme explicado na seção anterior, foram realizados testes sem injeção de ar, com injeção de ar de uma mistura de CO₂ e N₂ para representar o gás que passará pela planta piloto de captura de CO₂.

5.1 TESTES SEM INJEÇÃO DE AR

Os resultados dos testes sem injeção de ar no leito, foram apresentados na Tabela 20, onde TR: tempo de residência médio, Qs: vazão média de sólidos (zeólitas) e D.P: desvio padrão.

Tabela 20 – Resultados dos testes sem injeção de ar

TESTES SEM AR												
Anel (mm)	Placa 1				Placa 2				Placa 3			
	TR(s)	D.P	Qs (kg/s)	D.P	TR(s)	D.P	Qs (kg/s)	D.P	TR (s)	D.P	Qs (kg/s)	D.P
10	4,04	0,46	0,0064	0,0004	4,265	0,17	0,0059	0,0004	12,48	5,82	0,006	0,0001
11	6,452	0,75	0,0098	0,0005	4,817	0,31	0,0095	7,69E-05	10,38	1,15	0,0095	7,71E-05
12	5,226	0,68	0,0112	0,0002	6,973	0,78	0,0108	0,0001	14,08	0,96	0,0108	0,00063
13	5,02	0,62	0,0153	0,00079	7,395	0,34	0,0138	0,0015	14,393	0,78	0,0106	0,0004
14,3	4,177	0,08	0,0294	0,00112	6,516	0,34	0,0301	0,0009				

Fonte: Do autor (2020).

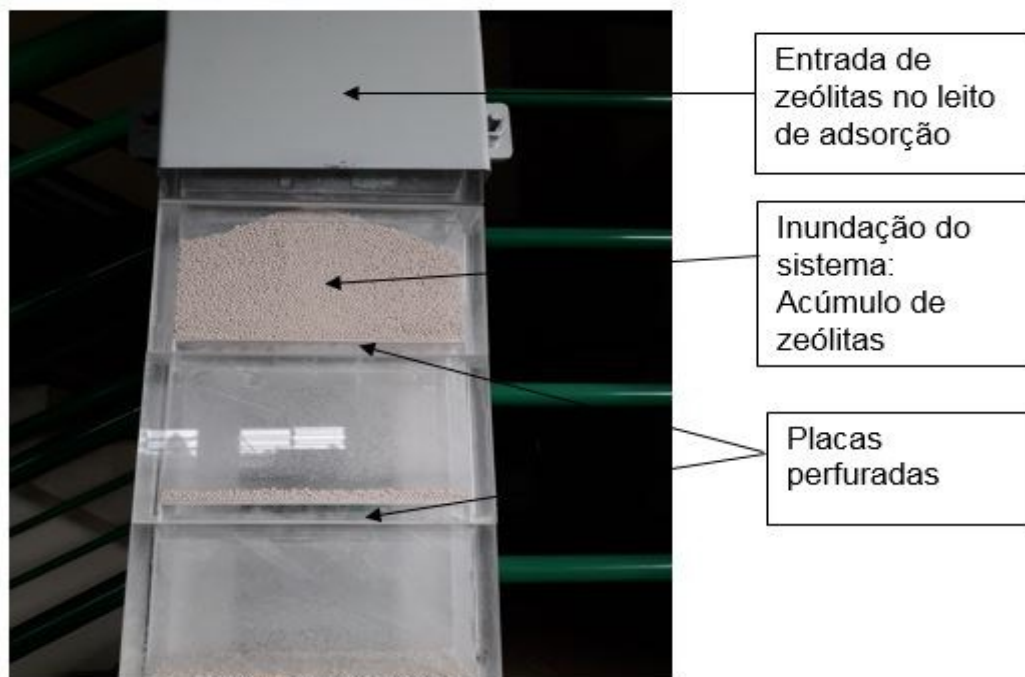
Com o anel de 10 mm houve dificuldade para o escoamento das zeólitas do dosador. Isso por quê o diâmetro reduzido prejudicou o fluxo contínuo de zeólitas, causando entupimento do dosador e interrupção em alguns testes. O desvio padrão (D.P.) com este anel apresenta um valor relativamente baixo nos testes com placas tipo 1 e 2 pois apesar de terem sido realizados cinco experimentos, o número de resultados avaliados foi menor: em três ocorreu entupimento e as zeólitas não saíram do dosador. Para isso se fez mais três testes extras, onde dois entupiram novamente. Portanto, ao todo, de oito testes, apenas três ocorreram de forma contínua e foram contabilizados no cálculo da média e do D.P. Dessa forma, considerou-se o teste com anel 10 mm o limite inferior do dosador de sólidos, uma vez que o diâmetro das zeólitas

em combinação acabam obstruindo a saída e paralisando o fluxo, causando o entupimento do dosador e grandes variações nos resultados dos testes.

Na placa tipo 3, com anel 10 mm, dos cinco testes realizados conforme o protocolo, três deles tiveram resultados considerados úteis, com escoamento do início ao fim, sem entupimentos. Além disso, o alto D.P. encontrado mostra como o teste é impreciso, ora permitindo a vazão do dosador e ora causando a obstrução e com isso trazendo resultados diferentes e alto valor de D.P.

Ainda em relação à placa tipo 3, utilizando o anel 14,3 mm, ou seja, com passagem livre no dosador, ocorreu inundação do sistema, obstruindo a primeira placa da seção do leito de cima para baixo. O processo de inundação que ocorreu no leito pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Processo de inundação no leito.



Fonte: Do autor (2020).

Pode-se concluir que isso ocorre devido à grande vazão de zeólitas do dosador, que rapidamente obstrui os furos e impede a passagem dos sólidos. Desta forma, as zeólitas acumularam-se no primeiro bloco, sem cair para as próximas placas, impedindo o escoamento ao longo da coluna de adsorção, causando uma

inundação no leito. Em cada uma das cinco tentativas, o teste foi interrompido pela inundação do sistema e esse anel considerado o limite superior de vazão de zeólitas para os testes de tempo de residência no leito de adsorção.

Analisando a vazão média de sólidos (Q_s), na saída do leito de adsorção, é possível perceber que ela aumentou à medida que o diâmetro do anel de estrangulação no dosador de zeólitas aumentou. Isso ocorreu, evidentemente pelo fato de que uma maior vazão de entrada acarretou em uma maior vazão de saída.

Avaliando diferentes placas para o mesmo diâmetro de anel dosador, a vazão média de sólidos diminuiu, conforme a porcentagem de abertura de área das placas diminuiu. Como o jogo de placas defletoras tipo 1 possui maior abertura de área que a placa 2 e a placa 3, a vazão média de sólidos nessas últimas placas diminuem quando comparadas com o mesmo anel dosador.

Por exemplo, analisando-se o anel 13 mm da Tabela 20, dos testes sem ar a vazão média de sólidos na placa 1 foi 0,0153 kg/s, na placa 2 foi 0,0138 kg/s e na placa 3 foi 0,0106 kg/s. Essa diferença na vazão média ocorreu devido a configuração diferente das placas. A placa 1, possui 25 % de área de abertura e permite maior passagem de fluxo. A placa 2 17 % e a placa 3, apenas 9 % de abertura, causando mais restrição e acúmulo de material no leito, o que faz os sólidos escoarem de forma mais lenta e conseqüentemente, reduziu o valor de vazão média de saída.

Os valores de desvio padrão, tanto para a vazão média de sólidos, quanto para os valores de tempo de residência foram relativamente pequenos, apresentando valores menores que 15% de variação para cima ou para baixo em relação ao valor do TR, sendo que a maioria ficou abaixo dos 10%, o que pode ser considerado o erro do experimento. Tomando como exemplo um TR de 5 s e um pior caso de 15%, o TR teria uma variação de $\pm 0,75$ s e suas variações existem devido a uma particularidade do processo, onde pode ocorrer pequenas diferenças de escoamento de um teste para o outro, isso porque o dosador utilizado não é um dosador perfeito e existem algumas pequenas oscilações de um teste para outro mesmo utilizando o mesmo anel de vazão. A própria combinação das zeólitas no fluxo de escoamento pode contribuir para essas pequenas variações.

Outro fator que pode alterar o desvio padrão nos testes é o procedimento de abertura. A abertura do dosador é feita manualmente, no mesmo instante em que é dado o clique para a ligação do sistema de coleta de dados. Contudo, alguns

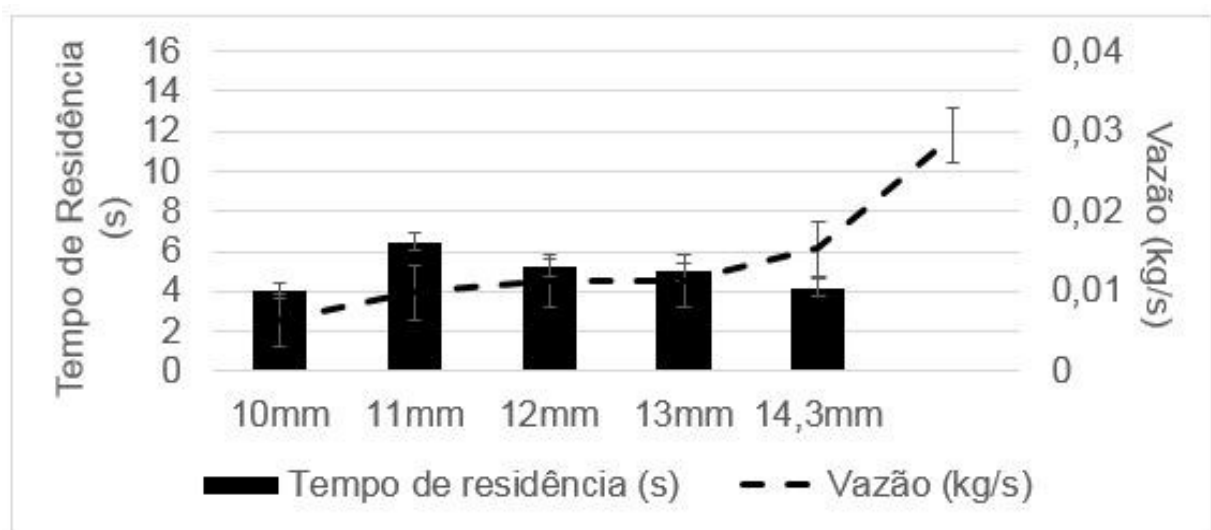
milissegundos de diferença podem ocorrer entre um teste e outro. Particularidades do teste também ocorrem e são aleatórias, como o quicar das zeólitas nas placas defletoras e na parede e o próprio escoamento desses sólidos no leito.

Alguns furos das placas defletoras também podem ser obstruídos com a passagem de mais de uma zeólita ao mesmo tempo no mesmo orifício e acabam entupindo o fluxo por aquele furo. À medida que o escoamento acontece esse orifício pode ser desobstruído ou não. Isso pode ser observado no decorrer dos testes como uma característica do processo. Além disso, existe uma certa tendência dos sólidos se acumularem nos cantos da placa e nos locais ao redor dos furos.

Todas essas particularidades, variaram de teste para teste e influenciaram o valor do desvio padrão. Contudo, os valores dos D.P, com exceção do anel 10 mm da placa 3, foram relativamente baixos e os testes podem ser considerados confiáveis. As diferenças existem devido às particularidades do processo anteriormente explicadas.

Quanto ao tempo de residência, excluindo o teste com anel dosador de 10mm, pelo fato de muitas obstruções e pouca confiabilidade nos poucos resultados obtidos, pode-se perceber que na placa 1, em geral, existe uma tendência em que a medida que a vazão de saída de sólidos aumenta, o tempo de residência diminuiu, como pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Gráfico dos testes na placa 1 – sem injeção de ar.

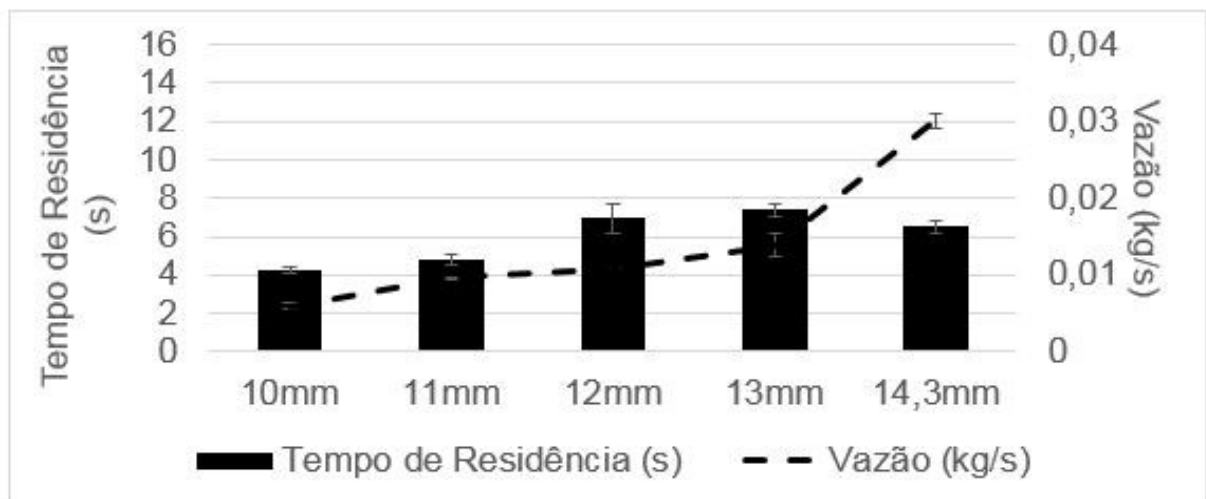


Fonte: Do autor (2020).

Como a placa 1 possui 96 furos e 25% de abertura de área, não existe uma restrição de fluxo considerável, e dessa forma, aumentando a vazão de sólidos a passagem das zeólitas é permitida e com maior vazão as zeólitas se colidem mais umas nas outras, ficando menos acumuladas nas placas e seguindo pela seção de adsorção. Consequentemente, à medida que a vazão aumenta, o tempo de residência diminui, pois não há uma restrição considerável ao fluxo de sólidos testado.

Já na placa 2 que possui uma configuração com 67 furos e 17%, existe uma tendência de quando se aumenta a vazão de sólidos, o tempo de residência aumenta também. O comportamento da placa 2 pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Gráfico dos testes na placa 2 – sem injeção de ar.

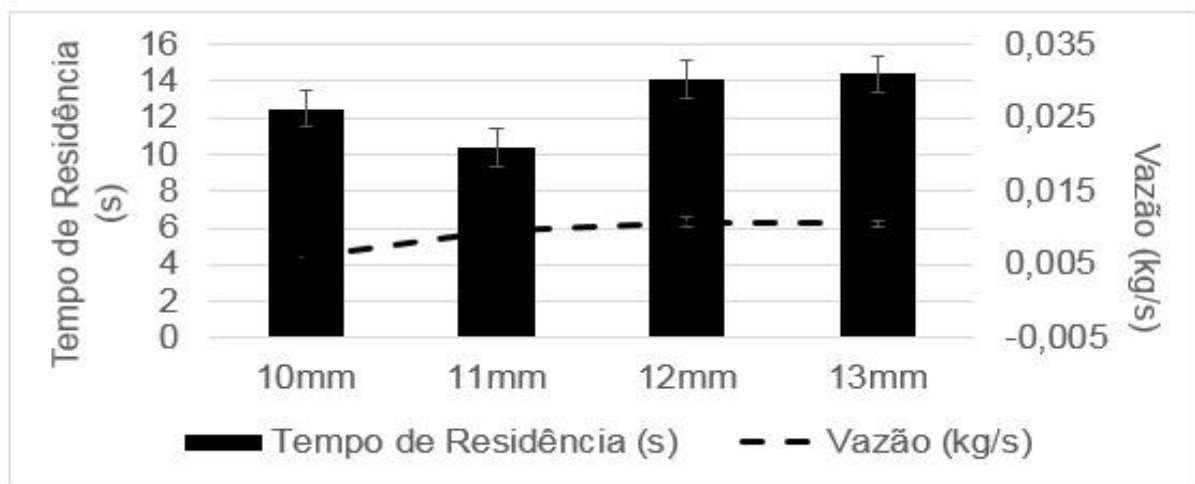


Fonte: Do autor (2020).

Esse aumento da vazão e consequentemente aumento do tempo de residência se dá pelo fato de que existe uma maior restrição ao fluxo de sólidos e à medida que a vazão média de sólidos aumenta, ocorre o acúmulo dessas zeólitas nas placas defletoras, demorando mais para que elas percorram o percurso da zona de adsorção.

Na placa 3, um maior acúmulo de zeólitas pode ser visto à medida que a vazão aumenta. Novamente, deve-se excluir o teste com anel dosador de 10 mm, uma vez que ele sofre grandes variações de fluxo e neste caso os poucos testes possíveis demonstram elevado desvio padrão. Na Figura 29, tem-se o gráfico dos testes com a placa 3.

Figura 29 – Gráfico dos testes na placa 3 – sem injeção de ar.



Fonte: Do autor (2020).

Como a placa 3 possui 35 furos e 9%, sendo ainda mais restrita, ocorre maior acúmulo de material, ou seja, quando se aumenta a vazão de sólidos, o tempo de residência também aumenta e se mantém devido ao acúmulo de zeólitas nas placas defletoras devido à restrição de passagem do fluxo de sólidos.

5.2 TESTES COM INJEÇÃO DE AR NA BASE

Para os testes com injeção de ar na base, foram realizados os mesmos procedimentos, entretanto, com a correspondente vazão de sólidos e de ar (fluido) proporcionais à planta piloto.

O objetivo desses testes foi analisar se o escoamento ocasionado pela injeção de ar na base do leito de adsorção e em fluxo contracorrente ao das zeólitas causaria alguma variação no comportamento do tempo de residência.

Para avaliar de forma mais nítida, a influência do fluxo de ar no tempo de residência, optou-se por fazer um teste com a menor vazão de sólidos, com a maior vazão de fluido. Como a menor vazão de sólidos com valores confiáveis obtida nos testes anteriores foi com o anel 11 mm no dosador, testou-se este anel para sua vazão proporcional normal (75 L/min) e para a máxima vazão de fluxo de ar (200 L/min).

Na Tabela 21, tem-se os resultados dos testes com injeção de ar, sendo TR: tempo de residência, Qs: vazão média de sólidos (zeólitas), D.P: desvio padrão e Qar: vazão de fluido (ar).

Tabela 21 – Resultados dos testes com injeção de ar

TESTES COM AR													
Q ar (L/min)	Anel (mm)	Placa 1				Placa 2				Placa 3			
		TR (s)	D.P	Qs (kg/s)	D.P	TR (s)	D.P	Qs (kg/s)	D.P	TR (s)	D.P	Qs (kg/s)	D.P
50	10	5,525	0,83	0,0059	6,00E-05	5,063	0,85	0,0065	0,0001	11,146	2,18	0,006	8,53E-05
75	11	5,243	0,23	0,0091	4,97E-05	4,794	0,28	0,0095	6,29E-05	13,379	0,64	0,009	2,72E-05
200	11	6,157	0,32	0,0091	0,00012	5,601	0,16	0,0094	2,70E-05	11,582	1,15	0,0089	1,87E-05
90	12	5,475	0,21	0,0111	2,95E-05	4,841	0,42	0,0111	3,86E-05	13,023	0,30	0,0115	7,20E-05
100	13	5,334	0,21	0,0145	7,59E-05	4,817	0,22	0,0158	9,37E-05				
200	14,3	5,001	0,13	0,0309	0,0013								

Fonte: Do autor (2020).

De forma geral, com exceção dos testes com anel dosador de 10 mm, que possui um fluxo instável como já discutido anteriormente, o desvio padrão dos demais testes, tanto para vazão média de sólidos, quanto para o tempo de residência, ficaram dentro da normalidade, ou seja, a maioria dos D.P. ficaram abaixo dos 15% de variação, sendo que a grande maioria fica bem abaixo dos 10%. As pequenas variações ocorrem devido a variáveis de processos discutidas na seção 5.1 e que também aconteceram nesses testes.

Analisando especialmente as duas linhas da Tabela 21 referentes ao anel dosador 11 mm com vazão 75 L/min e vazão 200 L/min, pode-se perceber que o aumento do tempo de residência devido à alteração do fluxo foi bastante sutil. Na placa 1, por exemplo, a diferença média de TR foi de 0,914 s a mais com uma vazão de ar quase três vezes maior. Na placa 2 essa diferença foi de 0,807 s para mais. E na placa 3, o TR médio acabou diminuindo (-1,797 s) de diferença. Em geral, os testes com uma vazão de fluido muito elevada acabam causando uma instabilidade muito grande no sistema. As zeólitas ficam completamente desordenadas, demonstrando uma anormalidade de operação devido a uma grande turbulência gerada no leito de adsorção, que acaba contribuindo para não acumular as zeólitas nas placas e diminuindo o TR. Por isso, nos dois primeiros casos essa turbulência variou muito pouco a média de TR e no último caso acabou diminuindo o tempo de residência.

Observando os testes foi possível perceber que os ganhos no aumento do TR, quando existem, são muito sutis e não compensam o gasto energético para manter altas vazões de fluidos. Além disso, ultrapassar a proporcionalidade de vazão de sólidos e vazão de fluido acarreta na não garantia de adsorção de CO₂ e, portanto, prejudica o processo de captura.

Na placa 2 e teste com anel 14,3 mm (livre) houve inundação do sistema e as zeólitas ficaram obstruindo o primeiro bloco. Na placa 3, nos testes com anel dosador 13 mm e 14,3 mm (livre) também houve obstrução e inundação no sistema.

Os demais testes tiveram um comportamento bastante similar aos testes sem injeção de ar na base quando as vazões testadas eram proporcionais as vazões de sólidos, exceto no teste com anel 14,3 mm (livre), onde a vazão de fluido foi muito alta (200 L/min) e muita poeira e desordem acabam acontecendo nos testes.

Essa manutenção e leve diminuição no TR em comparação ao aumento de vazão pode ser atribuída ao não entupimento dos furos das placas defletoras, isso por quê ar em contracorrente evita que duas ou três zeólitas obstruam os furos de passagem como ocorreu nos testes sem injeção de ar, dessa forma, contribuindo para a garantia do escoamento e não “atrasando” mais as partículas.

A obstrução no teste com 14,3 mm ocorreu devido ao exagerado fluxo de ar que não possui outra opção senão passar pelos furos e acaba impedindo a passagem das zeólitas. Como a quantidade de furos para que o ar passasse era menor em comparação à placa 1, acabou acontecendo a inundação, ou seja, o peso da zeólita não consegue vencer a força do ar.

Já na placa 3, os testes com o anel 13 mm e 14,3 mm (livre) não foram possíveis devido à inundação do sistema. Como a placa 3 possui uma maior restrição de área que a placa 2, as vazões de fluxo de ar mais altas, 100 L/min para o anel 13 mm e 200 L/min para o anel 14,3 mm (livre), fizeram com que o ar passasse de forma mais consistente pelos orifícios das placas defletoras e impediram o escoamento dos sólidos.

Uma comparação entre o tempo de residência obtido nos testes sem injeção de ar e com injeção de ar para as diferentes configurações de leito pode ser visto na Tabela 22.

Tabela 22 – Comparação dos resultados sem e com injeção de ar.

COMPARAÇÃO TESTES SEM / COM AR										
Qar	Anel	Placa 1			Placa 2			Placa 3		
		Sem Ar	Com Ar	Diferença	Sem Ar	Com Ar	Diferença	Sem Ar	Com Ar	Diferença
(L/min)	(mm)	TR(s)	TR(s)	%	TR(s)	TR(s)	%	TR(s)	TR(s)	%
50	10	4,04	5,526	26,89	4,265	5,526	22,82	12,48	11,146	-11,97
75	11	6,452	5,243	-23,06	4,817	4,794	-0,48	10,38	13,379	22,42
200	11	6,452	6,157	-4,79	4,817	5,601	14,00	10,38	11,583	10,39
90	12	5,226	5,475	4,55	6,973	4,841	-44,04	14,086	13,023	-8,16
100	13	5,021	5,335	5,89	7,396	4,817	-53,54	14,393		
200	14,3	4,177	5,001	16,48	6,516					

Fonte: Do autor (2020).

Para a Placa 1, na maioria dos casos os valores de TR sem ar ficaram, no geral, bastante próximos dos valores alcançados com os testes com ar, ou seja, com uma variação de cerca 15% que pode ser considerado o erro do experimento.

Um aumento mais considerável pode ser visto no anel 10 mm e no anel 11 mm. O anel 10 mm pode ser desconsiderado devido as variações do limite inferior.

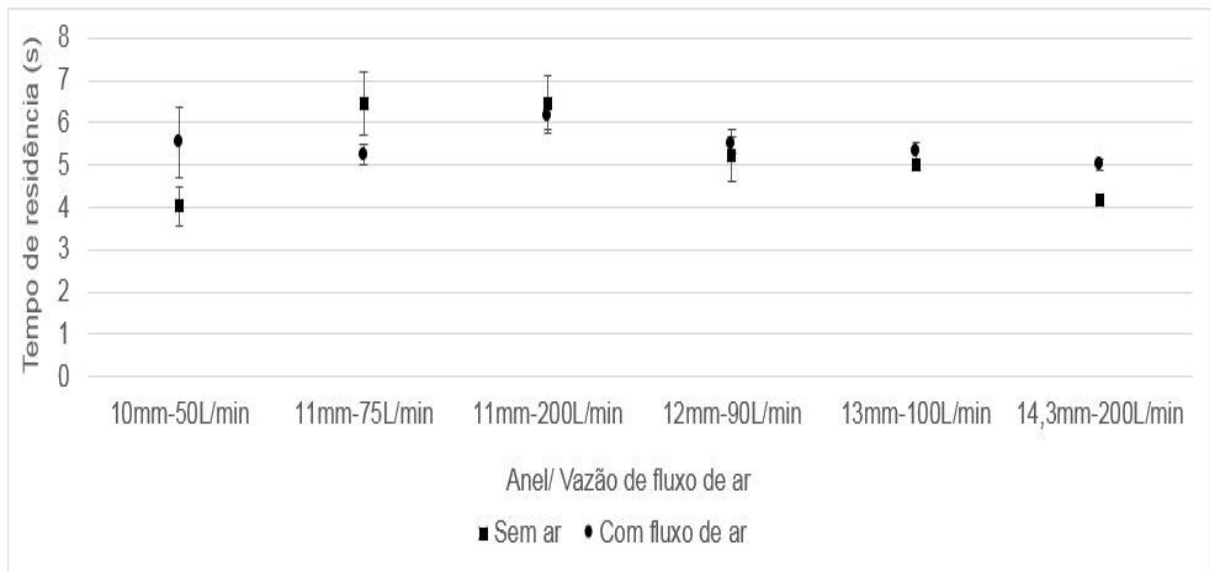
Já o anel 11 mm com vazão de 75 L/min no TR com ar, teve-se uma variação de -23% em relação ao TR sem ar, que é um pouco maior que o erro do experimento (15%) e que pode ter ocorrido devido ao menor acúmulo de zeólitas, com o ar impedindo a obstrução de furos com maior eficiência nos testes com essa vazão de sólidos.

Na vazão máxima (200 L/min) aplicada no anel dosador de 11 mm, a diferença do testes com e sem ar não foi maior que 1 segundo, com uma diferença de menos de 5%, quando comparado a vazão proporcional desse mesmo anel.

No geral, em vazões de fluxo de ar maiores, o TR foi sutilmente maior que o TR dos testes sem injeção de ar, já que o ar começa a ter mais velocidade quando passa pelos furos e cria uma leve restrição a passagem de sólidos. Entretanto, foi um aumento muito sutil e os valores no geral ficaram bastante próximos sendo praticamente desprezíveis.

Na Figura 30, tem-se o gráfico do comportamento da placa 1 sem injeção de ar (quadrado) e com injeção de ar (círculo) e suas respectivas barras de erro. Como avaliado acima os valores ficaram bastante próximos.

Figura 30 – Comparação testes sem ar e com ar – placa 1.

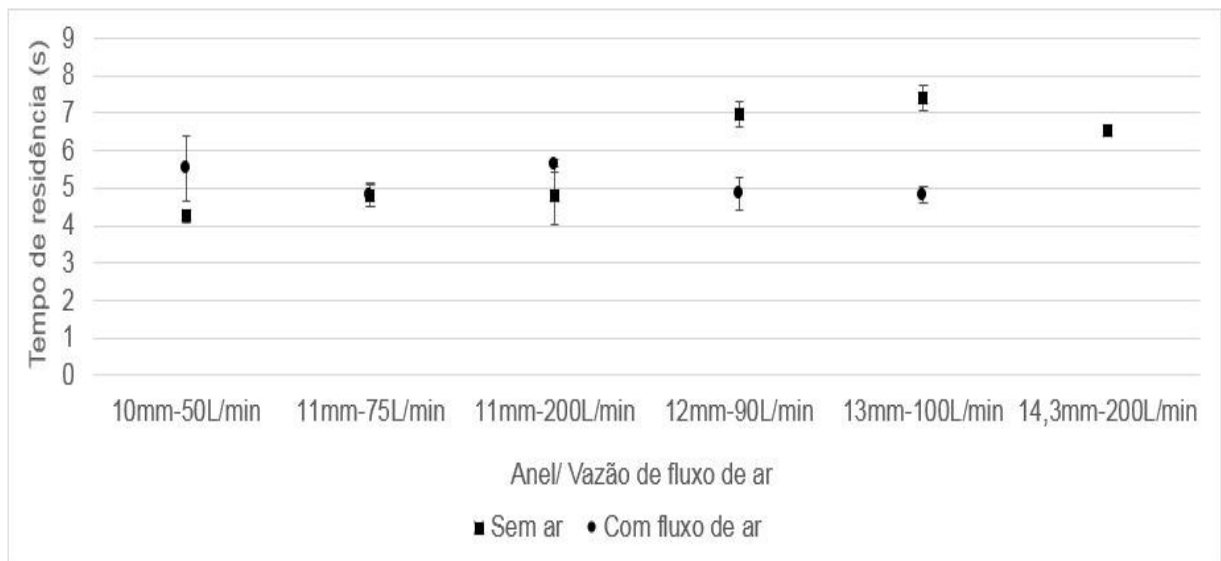


Fonte: Do autor (2020).

Para a Placa 2, foi possível perceber que nas vazões de ar menores o TR foi muito parecido com obtido nos testes sem ar ficando abaixo de 15% de diferença.

Na Figura 31, pode ser visto o comportamento geral da placa 2 com injeção de ar e sem injeção de ar.

Figura 31 – Comparação testes sem ar e com ar – placa 2.



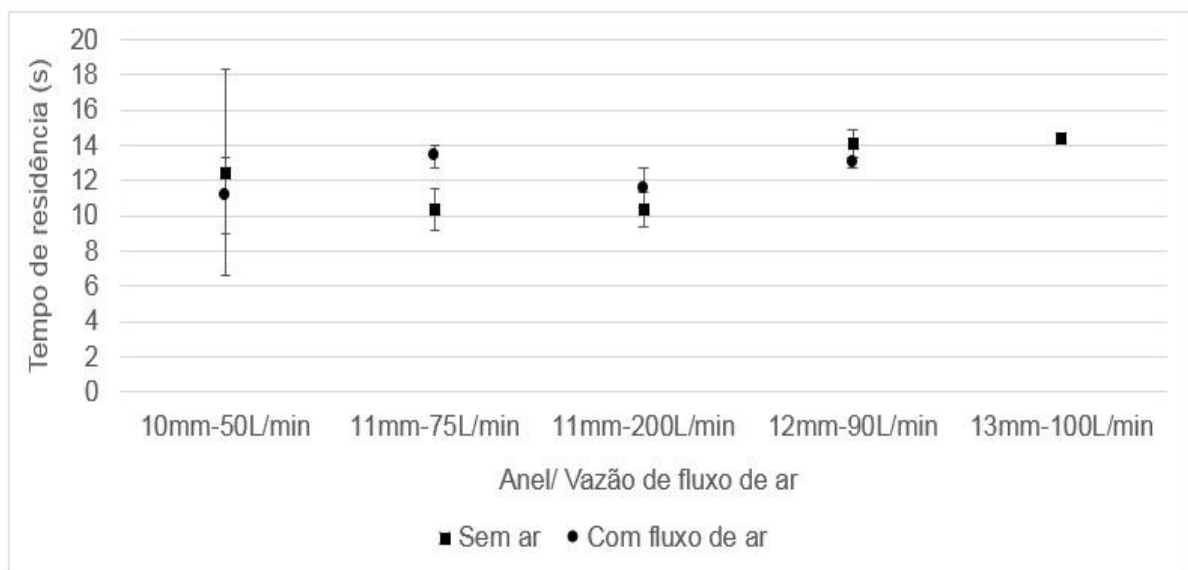
Fonte: Do autor (2020).

Já nas vazões com fluxo maior o TR diminui, pois onde ficava muitas zeólitas entupidadas, obstruindo os furos ou acumuladas em cima da placa, descem com mais facilidade graças ao escoamento de ar, agora mais forte, que impede a obstrução dos furos. E como nessa placa se tem menos furos, o ar passa com uma velocidade maior, contribuindo para com a desobstrução, e nos anéis 12 e 13 mm reduz o TR, sendo os únicos dois pontos com maior diferença entre os valores obtidos com os testes sem ar e com ar. Entretanto, no anel 14,3 mm (livre), como a vazão de sólidos é bastante grande e o acúmulo de sólidos na placa mais evidente, acaba ocorrendo a inundação e o material não desce.

Como na Placa 3, o acúmulo de zeólitas ocorre de qualquer forma, pois se trata de uma placa muito restrita, o escoamento de ar não causa tanta diferença pois existem poucos furos para a passagem e as zeólitas acabam se acumulando mesmo assim, ficando com um comportamento bem parecido com e sem injeção de ar.

Nos anéis com vazão de sólidos maiores isso passou a ser mais evidente e logo causaram inundação já com anel 13 mm e 14,3 mm (livre). Isso devido à restrição de abertura da área e conseqüente maior acúmulo de sólidos na placa. Contudo, as variações ficaram abaixo dos 15% de diferença entre os testes sem ar e com ar. A curva da placa 3 pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 – Comparação testes sem ar e com ar – placa 3.



Fonte: Do autor (2020).

Em linhas gerais, é possível traçar uma tendência dos testes sem injeção de ar e dos testes com injeção de ar que, pode ser vista na Tabela 23. Onde Q representa as vazões médias de sólidos e fluxo de ar proporcionais e TR tempo de residência médio.

Tabela 23 – Características dos testes sem ar e com ar.

Testes	Sem AR		Com AR	
	Placa 1	Q aumenta	TR diminui	Q aumenta
Placa 2	Q aumenta	TR aumenta	Q aumenta	TR diminui-inunda
Placa 3	Q aumenta	TR aumenta	Q aumenta	TR diminui-inunda

Fonte: Do autor (2020).

Nas três placas testadas, é possível perceber que existe uma tendência de que com o aumento das vazões de ar, o TR diminua.

Contudo, o escoamento de ar, de maneira geral, causa pouca interferência no tempo de residência, nas proporcionalidades testadas de vazão de sólidos e vazão de fluido, uma vez que os valores são muito próximos e na sua maioria não ultrapassam 15% de diferença, o que fica dentro da faixa que pode ser considerada como erro do experimento.

5.3 TESTES COM INJEÇÃO DE MISTURA CO₂ E N₂

Os testes com injeção de CO₂ e N₂ foram feitos em triplicata para cada configuração. Lembrando que para avaliar a influência do número de placas no tempo de residência e na adsorção, foi realizado um conjunto de testes extras, onde foi duplicado o número de placas defletoras, colocando-se placas intermediárias no protótipo. Sendo assim, foram realizados os testes com 15 placas e 30 placas para as mesmas configurações. Além disso, optou-se por utilizar os anéis 11, 12 e 13 mm excluindo-se os limites inferior e superior devido as grandes variações nos testes.

Os resultados obtidos nos testes para a placa 1, com 25% de área de abertura e 96 furos, com 15 placas podem ser vistos na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados com injeção de CO₂ e N₂ placa 1 simples

Placa 1 - 25% - 96 furos - Simples (15 placas)									
Config.	Anel 11			Anel 12			Anel 13		
	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)
T1	6,36	61	0,00815	4,3	60,00	0,01011	5,26	65	0,014997
T2	4,4	50	0,00820	5,87	54,00	0,01016	4,52	64	0,01487
T3	4,06	54	0,00809	4,62	53,00	0,01018	4,69	64	0,01492
Média	4,94	55	0,00814	4,93	55,66	0,01015	4,823	64,333	0,014929
D.P.	1,013	4,546	0,00004	0,677	3,091	0,00003	0,316474	0,471405	5,22E-05

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados para a placa 1, com 25 % de área de abertura e 96 furos, e 30 placas podem ser vistos na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados com injeção de CO₂ e N₂ placa dupla

Placa 1 - 25% - 96 furos - Dupla (30 placas)									
Config.	Anel 11			Anel 12			Anel 13		
	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)
T1	8,53	86,75	0,009126	7,71	82	0,010584	7,32	85	0,01412
T2	7,59	71	0,009079	7,63	79	0,010449	7,23	85	0,013927
T3	7,16	79	0,009087	7,09	76	0,010627	7,53	85	0,01399
Média	7,76	78,916	0,009097	7,47	79	0,010553	7,36	85	0,014012
D.P.	0,572	6,430	2,05E-05	0,275	2,449	7,58E-05	0,125	0	8,04E-05

Fonte: Do autor (2020).

Com os experimentos realizados para a placa 2, com 17% de área de abertura e 67 furos, com 15 placas, conseguiu-se os resultados que podem ser vistos na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados com injeção de CO₂ e N₂ placa 2 simples

Placa 2 - 17% - 67 furos - Simples (15 placas)									
Config.	Anel 11			Anel 12			Anel 13		
	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)
T1	9,32	80,8	0,008535	6,6	80	0,010545	6,42	77	0,01279
T2	6,84	76	0,008399	7,22	73	0,010619	6,48	81	0,01296
T3	7,89	78	0,008626	6,85	67	0,010632	6,45	79	0,01296
Média	8,016	78,266	0,00852	6,89	73,333	0,010599	6,45	79	0,01290
D.P.	1,016	1,968643	9,33E-05	0,254	5,3124	3,83E-05	0,0244	1,632	8,01E-05

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados para a placa 2, com 17% de área de abertura e 96 furos com 30 placas podem ser vistos na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados com injeção de CO₂ e N₂ placa 2 dupla

Placa 2 - 17% - 67 furos - Dupla (30 placas)									
Config.	Anel 11			Anel 12			Anel 13		
Testes	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)
T1	11,63	94	0,008538	7,79	94	0,01002	10,14	93	0,01312
T2	14,05	98	0,009786	11,64	97	0,01026	11,326	98	0,01527
T3	12,8	96	0,009162	9,8	95,5	0,01014	10,5	95,5	0,01419
Média	12,826	96	0,009162	9,7433	95,5	0,01014	10,655	95,5	0,01419
D.P.	0,988	1,632	0,000509	1,5722	1,2247	9,92E-05	0,4964	2,0412	0,00088

Fonte: Do autor (2020).

Na placa 2, com o dobro de placas (30 placas), os índices de remoção de CO₂ foram bastante altos, conseguindo uma remoção acima de 90% em pouco menos de 8 segundos.

Os testes obtidos para a placa 3, com 9% de área de abertura e 35 furos, para 15 placas, podem ser vistos na Tabela 28.

Na placa 3, com anel de 13 mm ocorreu inundação do leito, conforme nos testes sem ar e com ar, e que impediu que os testes com esse anel ocorressem.

Tabela 28 – Resultados com injeção de CO₂ e N₂ placa 3 simples

Placa - 3 - 9% - 35 furos - Simples (15 placas)									
Config	Anel 11			Anel 12			Anel 13		
Testes	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)
T1	13,7	100	0,010042	13,16	99	0,01003		inundou	
T2	17,55	99	0,008287	12	98	0,01001		inundou	
T3	14,2	99	0,009165	13,6	99	0,01003		inundou	
Média	15,15	99,333	0,009165	12,92	98,666	0,01002		-	
D.P.	1,709	0,4714	0,000716	0,67488	0,4714	9,43E-06		-	

Fonte: Do autor (2020).

Nos testes com a placa 3, com 9% de área de abertura, 35 furos com 30 placas, não houve resultados, pois em todos os casos ocorreu inundação do sistema (Tabela 29).

Tabela 29 – Resultados com injeção de CO₂ e N₂ placa 3 dupla

Placa 3 - 9% - 35 furos - Dupla (30 placas)									
Config.	Anel 11			Anel 12			Anel 13		
Testes	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)	TR(s)	Remoção de CO ₂ (%)	Qs(kg/s)
T1		inundou			inundou			inundou	
T2		inundou			inundou			inundou	
T3		inundou			inundou			inundou	
Média	-			-			-		
D.P.	-			-			-		

Fonte: Do autor (2020).

Em uma análise geral dos resultados, foi possível constatar que o desvio padrão ficou dentro da normalidade para TR, abaixo dos 15 % de variação, e na grande maioria ficando abaixo dos 10%, portanto, dentro da margem de erro. A exceção foi para a placa 1, 25% de abertura, na configuração 15 placas, onde o D.P. teve uma variação um pouco maior, por volta dos 20%.

No caso do TR, por exemplo, algumas vezes existe maior acúmulo na placa e outras vezes isso não ocorre, sendo uma particularidade que pode ocorrer no teste, onde ora as zeólitas podem obstruir alguns furos e acumular mais e em outros testes fluírem de forma mais eficaz. Entretanto, os valores não mostraram grande variação.

Na Tabela 30, pode-se ver um comparativo entre o tempo de residência nas placas na modalidade sem ar, com ar e com injeção de CO₂ e N₂ para um conjunto de 15 placas.

Tabela 30 – Comparação dos tempos de residência

Qar (L/min)	Anel (mm)	Placa 1			Placa 2			Placa 3		
		Sem Ar	Com Ar	CO ₂ e N ₂	Sem Ar	Com Ar	CO ₂ e N ₂	Sem Ar	Com Ar	CO ₂ e N ₂
		TR(s)	TR(s)	TR(s)	TR(s)	TR(s)	TR(s)	TR(s)	TR(s)	TR(s)
75	11	6,452	5,243	4,94	4,817	4,794	8,01	10,38	13,379	15,15
90	12	5,226	5,475	4,93	6,973	4,841	6,89	14,086	13,023	12,92
100	13	5,021	5,335	4,82	7,396	4,817	6,45	14,393		

Fonte: Do autor (2020).

Em relação aos resultados obtidos utilizando a placa 1, a maior diferença ocorreu no anel 11 entre os testes sem ar e com injeção de CO₂ e N₂. Isso pode ser explicado pelo fato de que o anel 11 mm ainda pode causar algumas restrições na saída do dosador devido ao tamanho das zeólitas e o estrangulamento do anel, similar ao que ocorreu no anel 10 mm (limite inferior) mas de uma forma mais sutil e pontual. Os demais valores dessa placa ficaram com valores bem próximos.

Na placa 2, também no anel de 11 mm existe uma diferença, dessa vez o TR ficou um pouco maior nos testes com CO₂ e N₂ em relação aos testes sem ar e com ar. De forma análoga à placa 1, isso pode ter ocorrido devido às limitações do anel de 11 mm. Os demais testes com essa placa apresentaram valores próximos nos testes sem ar e com injeção de CO₂ e N₂.

Um ponto que deve ser levado em consideração é que nos testes com ar a parte superior do leito era aberta para a atmosfera permitindo a saída do ar com facilidade. Já nos testes com CO₂ e N₂ a parte superior era estrangulada com apenas uma saída mais restrita para os gases que eram direcionados para análise.

Como a área de abertura da placa 2 é mais restrita, uma resistência maior pode ter ocorrido e conseqüentemente aumentando o TR com injeção de CO₂ e N₂ em relação aos testes com injeção de ar. De forma similar pode ter ocorrido na placa 3.

A média dos valores obtidos de TR para cada média do percentual de remoção de CO₂ compiladas foram apresentadas na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados de remoção de CO₂

Configuração		Anel 11mm		Anel 12mm		Anel 13mm	
Placas	nº de placas	TR (s)	Remoção de CO ₂ (%)	TR (s)	Remoção de CO ₂ (%)	TR (s)	Remoção de CO ₂ (%)
1	15	4,94	55	4,93	55,67	4,82	64,33
1	30	7,76	78,92	7,47	79	7,36	85
2	15	8,01	78,26	6,89	73,33	6,45	79
2	30	12,82	96	9,74	95,5	10,65	95,5
3	15	15,15	99,33	12,92	98,67	---	---
3	30	---	---	---	---	---	---

Fonte: Do autor (2020).

Cada configuração do leito foi testada em duas modalidades para analisar a adsorção de CO₂: Com 15 placas defletoras e 30 placas defletoras, ou seja, cada conjunto foi duplicado. Alteração essa que poderia ser executada na planta piloto com facilidade de projeto, caso seja necessário.

Analisando a placa 1 com 15 unidades, o percentual de remoção de CO₂ foi de 55% por volta dos 4,9 segundos nos anéis de 11 mm e 12 mm. Já no anel de 13 mm, apesar do tempo de residência ligeiramente menor, 4,82 segundos, a adsorção foi maior, por volta dos 64%. Isso se dá pelo fato de uma vazão de sólidos maior e o acúmulo de algumas zeólitas no canto das placas que muitas vezes levam mais tempo para escoar e adsorvem mais, mesmo o TR no geral tendo sido menor.

Com isso, pequenas variações de TR nem sempre são cruciais para alteração do valor do percentual de remoção de CO₂, o que acaba reforçando que um erro médio de cerca de 15 % para mais ou para menos é um valor aceitável dentro das condições do teste.

Na placa 1 dupla (30 placas) o TR aumentou e ficou por volta 7,5 segundos e a remoção nos anéis 11 mm e 12 mm ficaram por volta dos 79%. De forma similar, na placa 1 simples (15 placas) a adsorção no anel de 13 mm com maior vazão ficou mais alta, por volta dos 85% de remoção de CO₂.

A placa 2 simples apresentou uma remoção de CO₂ por volta dos 78% e no anel 13 mm com vazão maior, também apresentou uma remoção maior, mesmo com um TR menor, similar ao que ocorreu na placa 1 simples e dupla. Já na placa 2 dupla os índices de remoção de CO₂ atingiram os 96 % por volta dos 9 e 10 segundos.

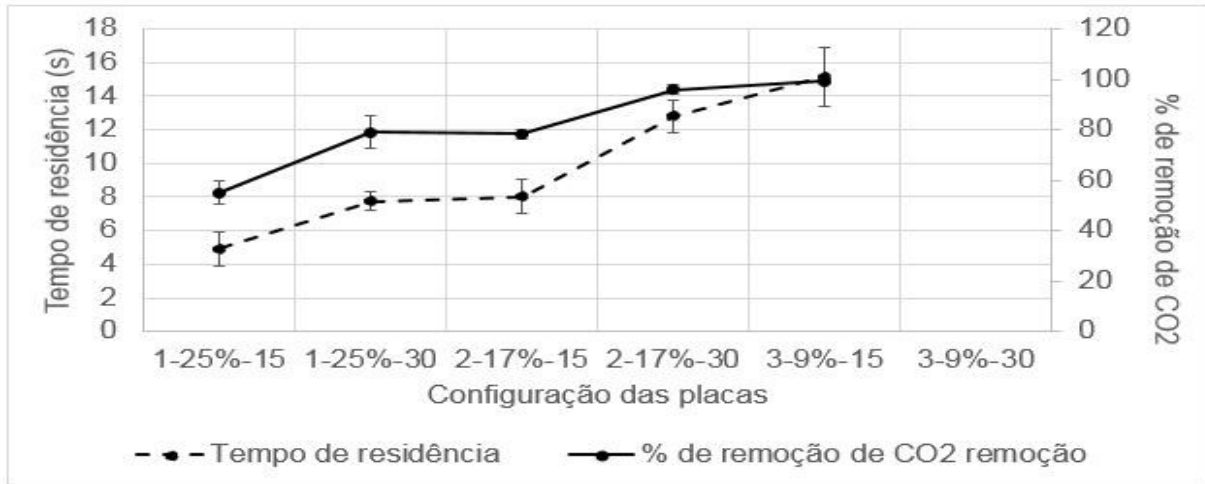
Dessa vez nos anéis de 12 mm e 13 mm, mesmo com TR menores que no anel 11 mm, alcançou-se praticamente a mesma adsorção pelo fato da placa ser mais restrita e acumular mais zeólitas nos cantos, repetindo o mesmo comportamento do anel de 13 mm nos outros testes.

Da mesma forma, na placa 3 simples com um pouco mais de 15 segundos alcançou-se 99,33% de remoção de CO₂, e com 12,92 segundos e uma vazão maior no anel de 12 mm e, conseqüentemente, o mesmo comportamento de acúmulo nos cantos de algumas zeólitas, pode-se alcançar 98,67% de remoção que são resultados apreciáveis.

Os demais testes sofreram inundação das zeólitas no sistema devido ao aumento da vazão de sólidos e a restrição das placas.

Na Figura 33, pode-se ver o tempo de residência e a adsorção de CO₂ para os testes com o anel de 11 mm.

Figura 33 – TR e remoção de CO₂ no anel de 11 mm em diferentes placas.

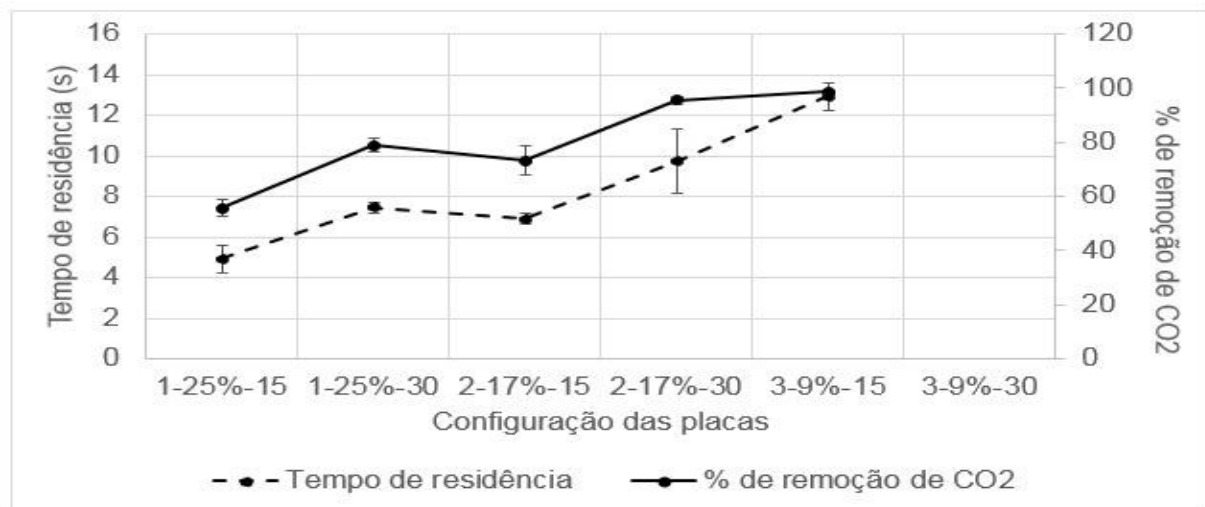


Fonte: Do autor (2020).

Na Figura 34, é possível ver o TR e a remoção de CO₂ no anel de 12 mm nas diferentes configurações de placas testadas.

Um comportamento similar entre as placas pode ser notado, obtendo uma característica comum para a remoção de CO₂.

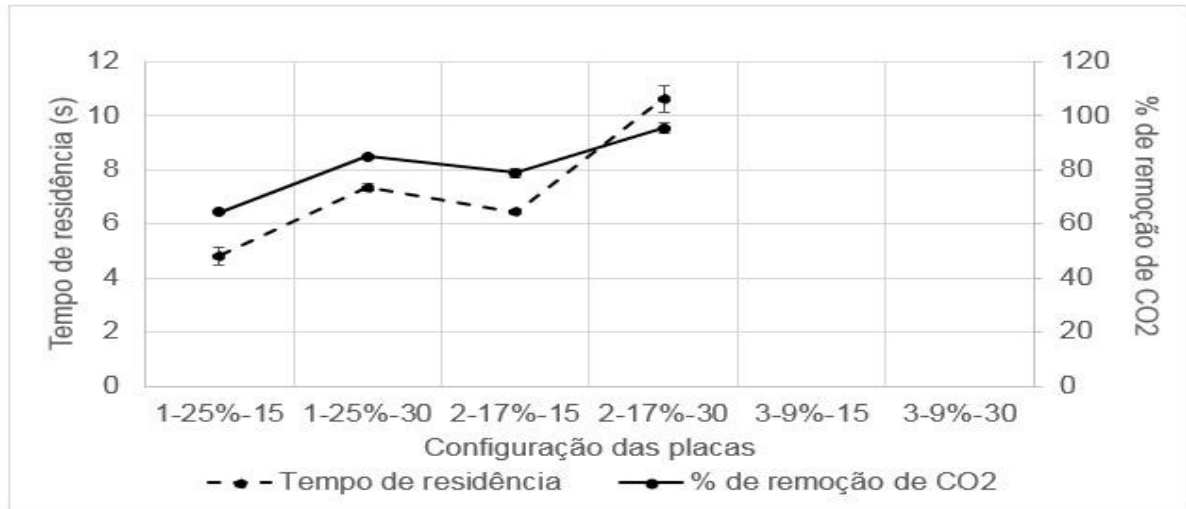
Figura 34 – TR e remoção de CO₂ no anel 12 mm em diferentes placas.



Fonte: Do autor (2020).

E na Figura 35, tem-se o gráfico de TR e o percentual de remoção de CO₂ para o anel de 13 mm para cada placa testada.

Figura 35 – TR e remoção de CO₂ no Anel 13 mm em diferentes placas.



Fonte: Do autor (2020).

Avaliando os gráficos foi possível constatar que existe uma tendência de que quando o tempo de residência aumenta, o percentual de remoção de CO₂ apresentou um crescimento e isso ocorreu até próximo ao limite de 100% de remoção, quando já não se justifica a elevação do tempo de residência.

A partir das modificações nas geometrias e inserções de placas, obteve-se o maior percentual de remoção de CO₂ possível, considerando, um gás livre de umidade. Entretanto, é preciso dizer também que essa capacidade de adsorção deve cair à medida que se tenha umidade no gás, pois a água no estado vapor compete com o CO₂ no interior dos poros das zeólitas.

Os resultados obtidos neste trabalho subsidiarão futuras modificações nas geometrias das placas da zona de adsorção da planta piloto e contribuirão para os testes de captura de CO₂, auxiliando no desenvolvimento de novas tecnologias e processos.

6 CONCLUSÕES

Ao analisar os objetivos deste trabalho, é possível concluir que os mesmos foram alcançados, tendo em vista que o tempo de residência foi medido em diferentes configurações de leito e de vazão de sólidos e conseguiu-se um aumento do tempo com placas com menor abertura e maior restrição de área.

Nos testes feitos com a injeção de ar, simulando o gás de exaustão na planta (não em termos de composição mássica, mas sim representando uma vazão de gás), foi possível delimitar as vazões que causavam muita turbulência no sistema, impedindo o fluxo das zeólitas de forma equilibrada e, conseqüentemente, o funcionamento do equipamento.

Também foi possível estabelecer os limite inferior e superior dos testes em função da vazão de sólidos e de fluidos, estabelecendo uma faixa de testes com resultados mais precisos e de acordo com a realidade da planta piloto.

Foi importante perceber que o tempo de residência não necessariamente aumenta com o fluxo de ar em relação aos testes sem ar, pois em muitos casos o ar gera turbulência no sistema e ajuda a desobstruir acúmulos de sólidos nas placas que ocorriam nos mesmos testes sem ar.

De maneira geral, pode-se dizer que o tempo de residência sem a injeção de ar fica na grande maioria muito próximo do tempo de residência com injeção de ar na base, não causando variações significativas.

Já as diferentes configurações de placas podem alterar significativamente o tempo de residência, aumentando o tempo de caminho percorrido pelas zeólitas ao longo do leito, servindo como uma barreira.

Nos testes com injeção da mistura de CO₂ e N₂, os tempos de residência, no geral, também ficaram próximos aos valores dos testes sem ar e com ar. Algumas variações ocorreram, mas que podem ser justificadas e variaram de acordo com as condições do testes e particularidades do processo. Nessa etapa o objetivo principal era analisar a influência do tempo de residência na adsorção.

Pode-se concluir, que existe uma tendência de que quanto maior o tempo de residência maior o percentual de remoção de CO₂ até uma remoção próxima a 99%.

Alguns fatores como a característica do leito, a configuração das placas e a vazão do anel dosador também contribuem para o acúmulo nas placas de algumas zeólitas que acabam sendo úteis para adsorção, mesmo em tempo de residência menores. E isso se dá pelo fato de que em maiores vazões o acúmulo de zeólitas nos cantos das placas é visível, levando mais tempo para que elas escoem até o fim do leito.

A utilização de placas duplas, alterando-se 15 para 30 placas, também teve efeito direto na variação do tempo de residência e no maior percentual de remoção de CO₂, conseguindo resultados com remoção de CO₂ próximas de 100%.

Os excelentes resultados de adsorção, com 99,33% de remoção de CO₂ em 15,15 segundos foram bastante surpreendentes e motivadores.

Para uma operação da planta piloto poderia ser utilizada a placa tipo 2, com 30 placas, sendo que com está se consegue um resultado bastante significativo e próximo dos valores conseguidos com a placa tipo 3 com 15 placas. Por segurança a placa tipo 3 deve ser evitada pois pode causar obstruções e impedir o escoamento no leito.

Esses resultados podem contribuir para reduzir as penalidades energéticas impostas as usinas termoelétricas e diminuir o custo da energia cobrada ao consumidor final.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Testar o protótipo de adsorção com placas defletoras de diferentes tipos alternadas no leito, fazendo com que os furos fiquem desencontrados.
- Avaliar a distribuição do tempo de residência no protótipo.
- Regenerar as zeólitas até a sua capacidade máxima e ver o quanto poderia ser removido de CO₂ e em quanto tempo.
- Estudos de modelagem de simulação numérica do processo, para avaliar o TR e a remoção de CO₂ com gás denso.

Há expectativas de que este trabalho contribua para a viabilização da captura de CO₂ nas termoelétricas e outras máquinas térmicas que possam vir a ser aplicadas, abrindo um leque de alternativas para reduzir as emissões de CO₂ no planeta, e dessa

vez de uma forma mais barata economicamente e com uma tecnologia de aplicação relativamente simples para aplicação nas usinas atuais e já constituídas.

Sem dúvida a contribuição para a geração de energia segura, com combustíveis consolidados, de uma forma mais sustentável pode se tornar realidade em um futuro breve utilizando tecnologias de captura de CO₂ mais simples, para minimizar as emissões de processos que já vem sendo utilizados a mais de um século com a liberação desses gases para a atmosfera sem nenhum processo de captura.

As plantas de captura de CO₂ com a utilização de sólidos em combinação com uma configuração de leito *MBTSA*, inserida em um processo de captura pós combustão se mostram como uma alternativa viável para o equilíbrio econômico dos processos de geração de energia atual e para a saúde do planeta.

7 REFERÊNCIAS

AEPH DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Célula de carga modelo spx3t**. Disponível em: www.aephbrasil.com.br. Acesso em: 11 de nov. 2019.

AĞRALI, S.; ÜÇTUĞ, F. G.; TÜRKMEN, B. A. An optimization model for carbon capture & storage/utilization vs. carbon trading: A case study of fossil-fired power plants in Turkey. **Journal of Environmental Management**, v. 215, p. 305–315, 2018.

ALVAREZ-CASTRO, H. C. et al. The influence of the fluidization velocities on products yield and catalyst residence time in industrial risers. **Advanced Powder Technology**, v. 26, n. 3, p. 836–847, 2015.

AQUINO, T. F. DE. Síntese de zeólitas do tipo X a partir de cinzas volantes e de fundos de carvão mineral para captura de CO₂. **Tese de Doutorado**, 2018 .

BAINS, P.; PSARRAS, P.; WILCOX, J. CO₂ capture from the industry sector. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 63, p. 146–172, 2017.

BHATTACHARYYA, D.; MILLER, D. C. Post-combustion CO₂ capture technologies — a review of processes for solvent-based and sorbent-based CO₂ capture. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 17, p. 78–92, 2017.

BORGERT, K. J.; RUBIN, E. S. Oxy-combustion Carbon Capture for Pulverized Coal in the Integrated Environmental Control Model. **Energy Procedia**, v. 114, p. 522–529, 2017.

BP STATISTICAL REVIEW OF WORD ENERGY. BP Statistical Review of Word Energy. **67th Edition**, 2018.

CASAS, N. et al. A parametric study of a PSA process for pre-combustion CO₂ capture. **Separation and Purification Technology**, v. 104, p. 183–192, 2013.

DEXTER INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS LTDA. **Amplificador para Célula de Carga – Versão 1.4**. Disponível em www.dexter.ind.br. Acesso em: 11 de nov. 2019.

ELIAS, R. S.; WAHAB, M. I. M.; FANG, L. Retrofitting carbon capture and storage to natural gas-fired power plants: A real-options approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 722–734, 2018.

EPE, E. DE P. E. Balanço Energético Nacional Relatório Síntese | ano base 2017 |. 2018.

GA, S.; JANG, H.; LEE, J. H. New performance indicators for adsorbent evaluation derived from a reduced order model of an idealized PSA process for CO₂ capture. **Computers and Chemical Engineering**, v. 102, p. 188–212, 2017.

GAO, Y.; MUZZIO, F. J.; IERAPETRITOU, M. G. A review of the Residence Time Distribution (RTD) applications in solid unit operations. **Powder Technology**, v. 228, p. 416–423, 2012.

GARÐARSDÓTTIR, S. Ó. et al. Investment costs and CO₂ reduction potential of carbon capture from industrial plants – A Swedish case study. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 76, p. 111–124, 2018.

GARG, A. et al. Cost-effective architecture of carbon capture and storage (CCS) grid in India. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 66, p. 129–146, 2017.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Global status of CCS - Targeting climate change**, 2019.

GRANDE, C. A. et al. Development of Moving Bed Temperature Swing Adsorption (MBTSA) Process for Post-combustion CO₂ Capture: Initial Benchmarking in a NGCC Context. **Energy Procedia**, v. 114, n. 1876, p. 2203–2210, 2017.

HARRIS, A. T.; DAVIDSON, J. F.; THORPE, R. B. Particle residence time distributions in circulating fluidised beds. **Chemical Engineering Science**, v. 58, n. 11, p. 2181–2202, 2003.

IPCC, INTERGOVERNANMETAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Carbon Dioxide Capture**. 443p, 2005.

KIM, K. et al. Moving bed adsorption process with internal heat integration for carbon dioxide capture. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 17, p. 13–24, 2013.

KNAEBEL, K. S. **Temperature Swing Adsorption System Patent**, 2009.

KNAEBEL, K. S. Assessment of CO₂ Post-Combustion Capture by Moving Bed TSA. **Adsorption Research, Inc., Dublin, Ohio 43016 USA**, p. 29, 2015.

KOEHLER, N. F. M. Simulação da captura de CO₂ por meio de pós-combustão de carvão mineral. **Trabalho de Conclusão de Curso**, 2015.

KOYTSOUMPA, E. I.; BERGINS, C.; KAKARAS, E. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 132, p. 3–16, 2018.

LEON, M. A. et al. Residence time distribution and reaction rate in the horizontal rotating foam stirrer reactor. **Chemical Engineering Science**, v. 117, p. 8–17, 2014.

LESSA, M. D. O. Avaliação da capacidade de adsorção do CO₂ em zeólita 13X com gases sintéticos. **Dissertação de Mestrado**, 2012.

LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current

status of carbon dioxide capture and storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 426–443, 2014.

LIU, Q. et al. Examining the effects of income inequality on CO₂ emissions: Evidence from non-spatial and spatial perspectives. v. 236, p. 163–171, 2019.

MARING, B. J.; WEBLEY, P. A. A new simplified pressure/vacuum swing adsorption model for rapid adsorbent screening for CO₂ capture applications. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 15, p. 16–31, 2013.

MAURICI, A. V.; DUTRA, J. C. **Importância da utilização e calibração de fluxímetros empregados na soldagem a arco com proteção gasosa (1)**. 1999.

MONDINO, G.; GRANDE, C. A.; BLOM, R. Effect of gas recycling on the performance of a moving bed temperature-swing (MBTSA) process for CO₂ capture in a coal fired power plant context. **Energies**, v. 10, n. 6, 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI USB-6001 User Guides**. Disponível em: ni.com/manuals. Acesso em: 11 de nov. 2019.

NIKOLAIDIS, G. N.; KIKKINIDES, E. S.; GEORGIADIS, M. C. A model-based approach for the evaluation of new zeolite 13X-based adsorbents for the efficient post-combustion CO₂ capture using P/VSA processes. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 131, p. 362–374, 2018.

OAHU, P. III. Natural Environment. **Environment**, v. 60, p. 6–7, 2001.

OSPINO, R. A. M. **Assessment of temperature swing adsorption configurations for CO₂ capture on zeolite 13X**. 2018.

RAMÍREZ-SANTOS, Á. A.; CASTEL, C.; FAVRE, E. A review of gas separation technologies within emission reduction programs in the iron and steel sector: Current application and development perspectives. **Separation and Purification Technology**, v. 194, p. 425–442, 2018.

RAO, A. B.; KUMAR, P. Cost implications of carbon capture and storage for the coal power plants in India. **Energy Procedia**, v. 54, p. 431–438, 2014.

REZAEI, F. et al. Modeling of rapid temperature swing adsorption using hollow fiber sorbents. **Chemical Engineering Science**, v. 113, p. 62–76, 2014.

RIBOLDI, L.; BOLLAND, O. Overview on Pressure Swing Adsorption (PSA) as CO₂ Capture Technology: State-of-the-Art, Limits and Potentials. **Energy Procedia**, v. 114, n. 1876, p. 2390–2400, 2017.

SEEG, Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Emissões de gee do setor de energia, processos industriais e uso de produtos**. 2016.

SEONGBIN, G.; JANG, H.; LEE, J. H. New Performance Indicators for Evaluation of

Adsorbents for CO₂ Capture with PSA processes. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 7, p. 651–656, 2016.

SHI, K. et al. Spatiotemporal variations of CO₂ emissions and their impact factors in China : A comparative analysis between the provincial and prefectural levels. **Applied Energy**, v. 233–234, p. 170–181, 2019.

SINGH, S. et al. China baseline coal-fired power plant with post-combustion CO₂ capture: 2. Techno-economics. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 78, p. 429–436, 2018.

SINGH, U.; RAO, A. B. Techno-Economic Assessment of Carbon Mitigation Options for Existing Coal-fired Power Plants in India. **Energy Procedia**, v. 90, n. December 2015, p. 326–335, 2015.

SINGH, U.; RAO, A. B.; CHANDEL, M. K. Economic Implications of CO₂ Capture from the Existing as Well as Proposed Coal-fired Power Plants in India under Various Policy Scenarios. **Energy Procedia**, v. 114, p. 7638–7650, 2017.

SONG, C. et al. Alternative pathways for efficient CO₂ capture by hybrid processes—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 215–231, 2018.

UPSTILL, G.; HALL, P. Estimating the learning rate of a technology with multiple variants: The case of carbon storage. **Energy Policy**, v. 121, p. 498–505, 2018.

USINAINFO ELETRÔNICA E ROBÓTICA. **Fonte de alimentação digitável regulável 30V 5A - PS 305D Bivolt 127V/220V**. Disponível em: www.usinainfo.com.br. Acesso em: 11 de nov. 2019.

WANG, L. et al. Experimental and modeling investigation on post-combustion carbon dioxide capture using zeolite 13X-APG by hybrid VTSA process. **Chemical Engineering Journal**, v. 197, p. 151–161, 2012.

WANG, Y. et al. A Review of Post-combustion CO₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. **Energy Procedia**, v. 114, p. 650–665, 2017.

WATERS, C. L. et al. Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 126, p. 380–389, 2017.

YAO, X. et al. Business model design for the carbon capture utilization and storage (CCUS) project in China. **Energy Policy**, v. 121, p. 519–533, 2018.

ZHANG, M. et al. Model provenance tracking and inference for integrated environmental modelling. **Environmental Modelling and Software**, v. 96, p. 95–105, 2017.