



UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE
BIOSSISTEMAS

ALANNA VIEIRA SILVA

**Avaliação do potencial de captura do CO₂ de processo industrial
através da adsorção com biocarvão do coco**

ALAGOINHAS - BAHIA

2023

ALANNA VIEIRA SILVA

**Avaliação do potencial de captura do CO₂ de processo industrial
através da adsorção com biocarvão do coco**

Dissertação apresentado ao Programa de
Pós-graduação em Modelagem e
Simulação de Biosistemas da
Universidade Estadual da Bahia, como
requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Ciências, M.Sc.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio
Pietrobon Costa

ALAGOINHAS - BAHIA

2023

ALANNA VIEIRA SILVA

**Avaliação do potencial de captura do CO₂ de processo industrial
através da adsorção com biocarvão do coco**

Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade do Estado da Bahia, Curso de Modelagem e Simulação de Biossistemas, como requisito para obtenção de título de Mestre em Ciências, M.Sc., em Modelagem e Simulação de Biossistemas.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Flávio Pietrobon Costa - Orientador
Universidade Estadual da Bahia – PPGMSB

Prof. Dr. Marcos Batista Figueredo
Universidade Estadual da Bahia – PPGMSB

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira Mendes da Silva
Universidade Estadual da Bahia – ESA

Prof. Dr^a. Inaura Carolina Carneiro da Rocha
Universidade Federal de Sergipe – CCET/DEAM

Sistema de Bibliotecas da UNEB
Biblioteca Carlos Drummond de Andrade –
Campus II Manoela Ribeiro Vieira
Bibliotecária – CRB 5/1768

S586a Silva, Alanna Vieira
Avaliação do potencial de captura do CO₂ de processo industrial através da
adsorção com biocarvão do coco / Alanna Vieira Silva – Alagoinhas, 2023.
76 f. : il

Orientador: Prof^o. Dr^o. Flávio Pietrobon Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado da Bahia, Departamento
de Ciências Exatas e da Terra. Mestrado em Modelagem e Simulação de
Biossistemas. Alagoinhas, 2023.

1. CO₂ 2. Adsorção. 3. Biocarvão. 4. Aquecimento Global I. Costa, Flávio
Pietrobon. II. Universidade do Estado da Bahia – Departamento de Ciências
Exatas e da Terra III. Título.

CDD – 363.73874

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por sempre ter iluminado e direcionado meus caminhos, onde hoje trabalho com algo que acredito e que tem um propósito muito grande. A Ele que me sustentou até aqui e me proporciona vivenciar maravilhas.

Aos meus pais, que são o meu Norte e meu verdadeiro exemplo de amor. São meu lar, obrigada por terem me dado a oportunidade de estudar. Dedico todas minhas conquistas a vocês. À minha irmã, que sempre foi meu suporte, porto seguro. A toda minha família, que me apoiou muito em todas decisões e sonhos. Ao meu melhor amigo e meu amor Matheus, por todo apoio, carinho e confiança depositados em mim. Aos meus amigos, que sempre me incentivam me apoiam e torcem muito pelo meu sucesso. Vocês são incríveis.

Agradeço muito a Flávio Pietrobon, meu orientador, chefe, líder e amigo. Sou grata pela confiança depositada em mim, aprendo todos os dias sobre liderança e perseverança com você. Obrigada pelas oportunidades e por ser exemplo e referência para mim. Agradeço também a Sérgio Xaud e Paulo Pietrobon, também aprendo muito com vocês e agradeço a confiança para coordenar a DeCARB. Vocês inspiram. Agradeço a Rodrigo, Maísa, Amanda e Médson que também fazem parte dos resultados obtidos. Obrigada também a HELIX, em que construímos ao longo dos últimos anos muita coisa. Agradeço o apoio de sempre.

Ao PPGMSB pela oportunidade de crescimento. Ao professor Marcos, que sempre teve muita paciência e boa vontade para solucionar diversos problemas que vão surgindo ao longo do caminho. A professora Inaura e professor Carlos, que em muito contribuíram para melhora dessa dissertação.

RESUMO

O CO₂ é considerado o principal gás de efeito estufa. Ele representa cerca de 80% das emissões mundiais, e possui um alto potencial de absorção de radiação ultravioleta, contribuindo para o aumento da temperatura terrestre. Sua concentração na superfície terrestre já quase dobrou desde a Revolução Industrial e estudos indicam o seu aumento nos próximos anos. Visando diminuir as emissões de carbono para atmosfera, tecnologias de captura de CO₂ têm sido desenvolvidas, onde a adsorção se destaca como um método promissor para aplicação industrial. O objetivo desta pesquisa é avaliar o potencial de captura do CO₂ de processo industrial através da adsorção com biocarvão do endocarpo e mesocarpo do coco. Um modelo experimental para testes em bancada no laboratório foi elaborado, utilizando o biocarvão em diferentes configurações de produção. Testou-se o biocarvão em pó e granular do coco, além de diferentes temperaturas de carbonização e ativação química, para avaliar o de melhor desempenho. Foram executados testes semi-contínuos para triar a quantidade de adsorvente produzido para selecionar apenas dois para os testes contínuos. Os testes contínuos simularam um processo industrial, com concentração definida de 3,8% de CO₂ na corrente gasosa. Em seguida, também foram conduzidos testes de dessorção, para avaliar o potencial de recuperação do CO₂. Aliado com os testes laboratoriais do sistema experimental, foram realizadas simulações computacionais no software *ANSYS*, para projetar o sistema em escala real. O biocarvão granular (BCG) do endocarpo do coco apresentou melhores resultados, tendo um percentual de remoção de 99% do CO₂, caracterizando-o como um material promissor para captura de CO₂. A dessorção foi bem-sucedida, obtendo resultados de 99,9% de recuperação do CO₂, viabilizando seu armazenamento e aplicação em outros processos, como também a sua conversão em produtos duráveis. Foi possível dimensionar através da simulação a quantidade, as dimensões físicas, e a configuração do equipamento para atender uma chaminé de uma planta industrial, sendo de quatro cilindros de captura. O trabalho apresentou resultados que indicam viabilidade da aplicação de tecnologia para remoção de CO₂ em instalações industriais, contribuindo para diminuição das emissões de GEE.

Palavras-chave: Aquecimento Global, Captura de CO₂, Biocarvão, Simulação Computacional, Gases de Efeito Estufa.

ABSTRACT

CO₂ is considered the main greenhouse gas. It represents about 80% of global emissions, and has a high potential for absorbing ultraviolet radiation, contributing to an increase in the Earth's temperature. Its concentration on the earth's surface has almost doubled since the Industrial Revolution and studies indicate its increase in the coming years. To reduce carbon emissions to the atmosphere, CO₂ capture technologies have been developed, where adsorption stands out as a promising method for industrial application. In the present work, experimental tests were developed to determine the best coconut biochar for CO₂ adsorption in industries. An experimental model for bench tests in the laboratory was elaborated, using biochar in different production configurations. Powdered and granular coconut biochar was tested, in addition to different carbonization temperatures and chemical activation, to evaluate the one with the best performance. Semi-continuous tests were performed to screen the amount of adsorbent produced to select only two for continuous tests. The continuous tests simulated an industrial process, with a defined concentration of 3.8% of CO₂ in the gas stream. Then, desorption tests were also conducted to assess the CO₂ recovery potential. Allied with the laboratory tests of the experimental model, computational simulations were carried out in the ANSYS software, to project the understanding of the behavior of the future system in real scale. The granular biochar (BCG) from the coconut endocarp showed better results, with a removal percentage of 99% of CO₂, characterizing it as a promising material for CO₂ capture. The desorption was successful, obtaining results of 99.9% of CO₂ recovery, enabling its storage and application in other processes, as well as its conversion into durable products. It was possible to size through simulation the quantity, physical dimensions, and configuration of the equipment to serve a chimney of an industrial plant. The work presented results that indicate the feasibility of applying technology to remove CO₂ in industrial plants, contributing to the reduction of GHG emissions.

Palavras-chave: Global Warming, CO₂ Capture, Biochar, Modeling, Greenhouse Gases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Captura de CO ₂ em diferentes estágios industriais.....	20
Figura 2: Estrutura com diferentes granulometrias e tamanhos de poros.	25
Figura 3: Estrutura com diferentes granulometrias e tamanhos de poros.	30
Figura 4: Mapa Conceitual.....	35
Figura 5: Pó do mesocarpo do coco utilizado para fabricação do biocarvão.....	37
Figura 6: Armazenamento do biocarvão produzido.....	38
Figura 7: Limpeza do coco para fabricação do biocarvão.	38
Figura 8: Diminuição da granulometria do endocarpo do coco.	39
Figura 9: Fabricação do carvão ativado do endocarpo.....	40
Figura 10: Lavagem do carvão para estabilização de pH.....	41
Figura 11: Sensor SprintIR®-W 100% CO ₂ - Modelo GC-0018.....	43
Figura 12: Modo de execução de testes Kunz e Oliveira (2009).	44
Figura 13: Execução de testes físico-químicos.	45
Figura 14: Teste semi-contínuo com sensor.....	46
Figura 15: Esquematização de testes de bancada.....	47
Figura 16: Esquematização de testes de bancada.....	48
Figura 17: Metalizador Kurt J. Lesker modelo 108.	50
Figura 18: Amostras em análise no MEV.	51
Figura 19: Sistema de aquecimento.	52
Figura 20: Sistema de aquecimento completo.	52
Figura 21: Testes semi-contínuos pelo método de Kunz e Oliveira (2009).....	57
Figura 22: Testes semi-contínuos com sensor.....	58
Figura 23: a) BCP 600°C e b) BCG 700°C.....	58
Figura 24: Resultado testes contínuos à 3,8% de CO ₂	59
Figura 25: Resultado testes contínuos com BCG à diferentes concentrações de CO ₂ ..	61
Figura 26: Resultados do MEV, em que em a) tem-se pó do coco; b) o biocarvão do mesocarpo do coco a 600°C e c) o biocarvão do endocarpo do coco a 700°C.	62
Figura 27: MEV do a) coco in natura, b) carvão ativado do mesocarpo do coco e c) carvão ativado do endocarpo do coco.....	62
Figura 28: Curva de dessorção.....	63
Figura 29: Simplificação do modelo para simulação. Na ordem de (a) para (b) para (c).	64

Figura 30: Domínio (a) e detalhe da malha utilizada (b).	65
Figura 31: Avanço da fração molar de CO ₂ em função do tempo.	65
Figura 32: Sistema em escala industrial.	66
Figura 33: Visão superior do sistema de captura.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre adsorção física e química.	24
Tabela 2: Resumo da produção de carvão dopado.	41
Tabela 3: Parâmetros utilizados nos testes contínuos.....	48
Tabela 4: Parâmetros utilizados para simulação.	53
Tabela 5: Dados da densidade do carvão ativado em pó e granular.....	56
Tabela 6: Gravimetria com diferentes carvões.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al ₂ O ₃	Alumina Ativada
BCG	Biocarvão granular
BCP	Biocarvão em pó
CAD	Carvão Ativado Dopado
CAG	Carvão Ativado Granular
CAP	Carvão Ativado em Pó
CEO	<i>Chief Executive Officer</i> (Diretor Executivo)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Fluidodinâmica Computacional)
COP	Conferência das Partes
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CH ₄	Metano
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EBR	Empresa de Beneficiamento de Resíduos
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
FIEMG	Federação de Indústrias de Minas Gerais
GEE	Gases de Efeito Estufa
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IPCC	<i>Intergovernmental Painel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
MVF	Método de Volumes Finitos
NaOH	Soda Cáustica
NDA	<i>Non Disclosure Agreement</i> (Acordo de Não Divulgação)
NDC	<i>Nationally Determined Contributions</i> (Contribuições Nacionalmente Determinadas)
NDIR	<i>Nondispersive Infrared Sensor</i> (Sensor Infravermelho Não Dispersivo)
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i> (Adsorção por Modulação de Pressão)
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa

SiCSeGE	Sistema de Captura e Sequestro de Gases de Efeito Estufa
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
TRL	<i>Technology Readiness Level</i> (Nível de Maturidade Tecnológica)
TSA	<i>Temperature Swing Adsorption</i> (Adsorção por Modulação de Temperatura)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Aquecimento Global.....	18
2.2 Captura de CO ₂	19
2.2.1 Métodos de Captura de CO ₂	21
2.3 Adsorção.....	22
2.3.1 Carvão ativado	26
2.3.2 Biocarvão do coco	28
2.4 Simulação computacional	31
3. METODOLOGIA	35
3.1 Estudo de caso	35
3.2 Produção dos biocarvões	36
3.2.1 Biocarvão em pó (BCP).....	36
3.2.2 Biocarvão granular (BCG)	38
3.2.3 Carvão ativado	40
3.2.4 Densidade Aparente	42
3.3 Testes de adsorção.....	42
3.3.1 Testes semi-contínuos.....	43
3.3.2 Testes contínuos	46
3.4 Tratamento dos dados.....	48
3.4.1 Dados testes semi-contínuos	49
3.4.2 Dados testes contínuos	49
3.5 Caracterizações.....	50
3.6 Dessorção	51
3.7 Simulação do modelo industrial.....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Densidade Aparente	56
4.2 Testes de adsorção	56
4.2.1 Testes semi-contínuos.....	56
4.2.2 Testes contínuos	59
4.3 Caracterização MEV.....	61
4.4 Dessorção	62

4.5	Simulação do sistema em escala industrial	64
5.	CONCLUSÕES	68
5.1	Etapas futuras.....	68
5.2	Propriedade Intelectual	69
	REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno natural para manutenção da temperatura da Terra em faixas adequadas que permitam a sustentação da vida terrestre. Esse efeito, dentro de uma determinada faixa, é de vital importância, já que, em sua ausência, a temperatura da Terra seria em média -6°C . Os chamados gases de efeito estufa (GEE), são compostos que possuem uma alta capacidade de absorção de radiação e que contribuem para o aumento da temperatura terrestre (FONTELE, 2012).

Dentre os principais GEE, o que possui maior capacidade de retenção de calor é o óxido nitroso (N_2O), onde uma molécula de N_2O equivale a 300 moléculas do CO_2 . Ele é seguido pelo metano (CH_4), que corresponde a 24 vezes o potencial de efeito estufa do dióxido de carbono (CO_2). Entretanto, apesar de ter um menor potencial quando comparado com os outros gases, o CO_2 é considerado o principal gás de efeito estufa, por representar cerca de 81% das emissões totais de GEE. O N_2O representa 7% das emissões mundiais, enquanto o CH_4 representa 10% (LEITE *et al.*, 2020).

Desde o período da Revolução Industrial, a temperatura da Terra aumentou $1,1^{\circ}\text{C}$, trazendo perturbações generalizadas no mundo, com as secas, a insegurança alimentar, o calor extremo e as inundações. As taxas de emissões de GEE apontam atualmente para um aquecimento de $3,2^{\circ}\text{C}$ até 2050, trazendo consequências devastadoras para vida na Terra (LEVIN, BOEHM e CARTER, 2022). Faz-se necessário o estudo e desenvolvimento de tecnologias de captura de carbono, de forma que seja possível alcançar a neutralidade de emissões até 2050, como estabelecido pelo Acordo de Paris em 2015 (MONTICELI e VASCONCELOS, 2021).

Dentre os métodos para captura de CO_2 , tem se destacado o uso de solventes sólidos, separação criogénica, absorção e processos de adsorção. Segundo Gaspar (2014), a captura de CO_2 por adsorção é um método considerado promissor, devido a sua facilidade de integração com outros sistemas, baixo custo e alta eficiência.

A adsorção é um processo que se baseia no princípio físico-químico de transferência de massa, onde fluidos líquidos ou gasosos se concentram na superfície porosa de um material sólido possibilitando a separação de componentes desse fluido (Nascimento *et al.*, 2020). O biocarvão ou carvão ativado como material adsorvente tem sido aplicado em soluções de tratamento de água e tratamento de ar, devido a sua elevada área superficial, sendo um material caracterizado como carbonoso e altamente poroso, que possui uma forte afinidade para adsorção de diversos contaminantes (SANTANA *et al.*, 2019).

Autores como Albuquerque Júnior (2002), Manguiera (2014) e Santos (2017) utilizaram o coco como matéria prima para produção de carvão ativado, visando a adsorção de agrotóxicos e corantes presentes em efluentes industriais, devido à dificuldade de remoção desses compostos em tratamentos convencionais. Araújo (2018) e Nascimento (2018) utilizaram o carvão ativado do coco para adsorção de CO₂ em coluna de bancada, obtendo resultados de adsorção de 76 mg.g⁻¹ de carvão e 149 mg.g⁻¹, respectivamente.

O uso do coco como carvão ativado tem demonstrado um alto potencial para aplicação nesses processos industriais. Isso acontece devido à sua composição fornecer estruturas porosas e alta área superficial quando submetida a processos de carbonização e ativação (Morais *et al.*, 2019). Esse material atualmente é descartado juntamente com resíduos urbanos, onde grande parte ainda é depositada em lixões e aterros sanitários, produzindo compostos como o metano e favorecendo a proliferação de vetores que podem ser transmissores de doenças (LACERDA e LEITÃO, 2021).

O estudo desenvolvido neste trabalho utilizou o biocarvão do coco para adsorção de CO₂, tendo como base de dados para testes em laboratório as emissões de CO₂ de uma unidade de chaminé de secadores de uma mineradora. Dentre os setores industriais mais emissores de CO₂ no Brasil, a mineração fica em segundo lugar, atrás apenas do setor de siderurgia (SEEG, 2021). A captura do CO₂ pela adsorção em biocarvão do coco tem o potencial para contribuir com o alcance das metas de neutralidade de emissões industriais, sendo um grande avanço na corrida contra o aquecimento global. Além disso, o uso do coco pode também diminuir a disposição desse resíduo no meio ambiente.

Esse estudo faz parte do desenvolvimento da tecnologia SiCSeGE (Sistema de Captura de Gases de Efeito Estufa). Ela foi originalmente desenvolvida pela startup RECICLI Reciclagem Inteligente, com fomento do CNPQ desde 2005, via bolsa de produtividade DT, em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora do professor Flávio Costa, CEO da startup. Em 2021.2 o projeto foi também financiado com recursos de Corporação Transnacional parceira, da área de mineração, no âmbito do programa de inovação FIEMG Lab 4.0, visando contribuição à maturação tecnológica da tecnologia de captura de carbono.

A nomeação desta mineradora, uma Corporação Transnacional, está restringido por NDA (Acordo de Não Divulgação), sendo os detalhes da tecnologia salvaguardados por patente já depositada e por novas patentes em processo de depósito, sob titularidade da spin-off DeCARB, gerada pela RECICLI.

O resultado deste projeto alcançou maturação da tecnologia em TRL 3 (*Technology Readiness Level*), onde a mesma Corporação Transnacional investirá no protótipo do equipamento industrial. A nova startup, a DeCARB, é responsável por operacionalizar essa tecnologia e fazê-la chegar à sociedade.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é determinar em escala experimental o melhor biocarvão para adsorção do CO₂, emitido por uma chaminé de secadores de uma planta industrial do setor de mineração, bem como simular as condições experimentais e dimensionar o equipamento.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos do trabalho, destacam-se:

- Determinar a temperatura ideal de carbonização do biocarvão do coco para adsorção de CO₂;
- Realizar testes de adsorção de CO₂, com dados industriais, para avaliar o potencial de adsorção de CO₂;
- Comparar o potencial do uso do biocarvão em pó e do granular;
- Simular computacionalmente processo de captura de CO₂ em escala industrial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aquecimento Global

O aquecimento global é conceituado por especialistas como um fenômeno climático, onde há o aumento da temperatura média superficial global. Esse aumento da temperatura pode ocorrer devido a eventos naturais, como atividades vulcânicas e tectonismo, como também devido a fatores antropogênicos. Os fatores antropogênicos incluem principalmente a emissão de gases de efeito estufa através do uso de combustíveis fósseis, como carvão e derivados do petróleo, e do desmatamento (SILVA e DE PAULA, 2009).

Kramer (2020) afirma que, as emissões de CO₂ que antes da Revolução Industrial eram de 280 ppm, hoje já atingem valores de 410 ppm, com um aumento de taxa de 2,5 ppm por ano. Zainuddin e Ahmad (2022) sinalizam uma concentração de 415 ppm. Esse aumento é resultado do salto e desenvolvimento da sociedade, característico do uso intenso de processos industriais que envolvem a queima de combustíveis fósseis e a mudança e uso do solo para plantações agrícolas e expansão agropecuária.

Tendo em vista o crescimento gradativo anual das emissões de GEE, foi criada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 1994, reunindo 195 países signatários, com o objetivo de estabelecer estratégias e metas para estabilização das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, freando o aquecimento global. A convenção se reúne anualmente na chamada Conferência das Partes (COP), para tomada de decisões, com criação de acordos e estratégias que englobem os países desenvolvidos e em desenvolvimento, com incentivos a colaboração entre eles (JOERSS, SILVA e SANTOS, 2021).

O Acordo de Paris, celebrado no ano de 2015 na COP 21, estabeleceu um marco importante com a criação de um documento onde os países se comprometem a limitar o aumento da temperatura da Terra em 2°C e continuar os esforços para limitar preferencialmente a 1,5°C (REI, GONÇALVES e DE SOUZA, 2017). Na COP 26, os países definiram suas contribuições nacionalmente determinadas (NDC), sendo um compromisso global para redução de suas emissões. O Brasil assumiu o compromisso de reduzir 50% das suas emissões de GEE até 2030, tendo como linha de base o ano de 2005 (GENIN e FRASSON, 2022).

A COP 27, que aconteceu em novembro de 2022 no Egito, celebrou um grande avanço com a criação do fundo de reparação para países vulneráveis que possuem

dificuldades de adaptação a mudanças do clima. Porém, deixou de lado um tema importante como eliminação dos combustíveis fósseis para o combate ao aquecimento global (PRIZIBISCZKI, 2022).

Segundo um estudo realizado por Pörtner *et al.* (2022) com o uso de simulação computacional, os impactos e riscos do aquecimento global aumentaria em 85% caso a temperatura da Terra atingisse 3,6 °C e não se limitasse a 1,5 °C. Os autores indicam como principais riscos e ameaças a exposição à escassez de água, estresse por calor, doenças transmitidas por vetores, inundações costeiras e fluviais, e impactos na agricultura e economia. Neste contexto, se torna essencial a evolução e aplicação de tecnologias que reduzam as emissões de GEE para que as metas estabelecidas no Acordo de Paris sejam cumpridas (FIGUEIREDO, 2021).

2.2 Captura de CO₂

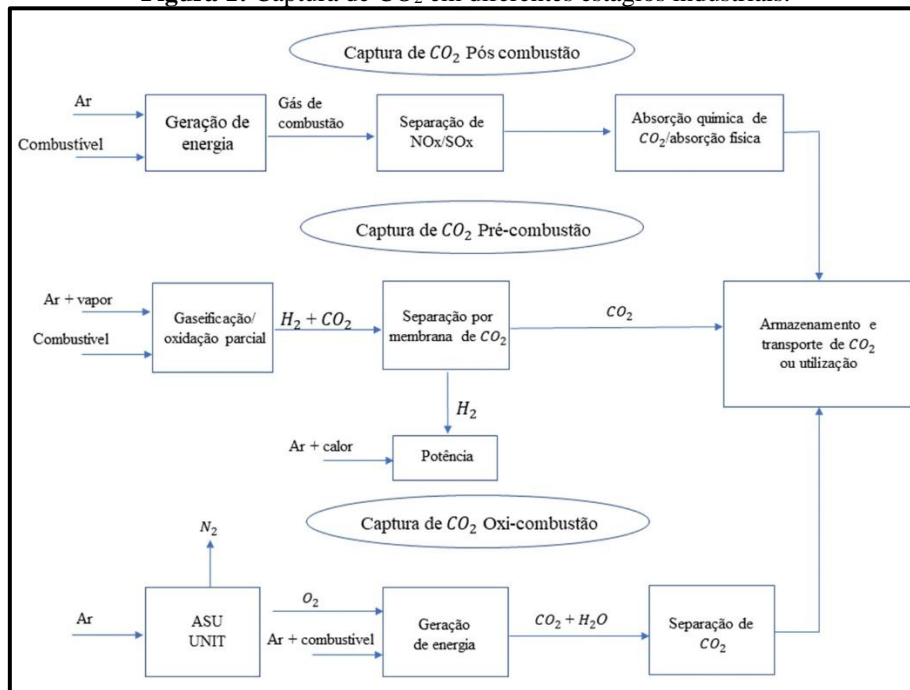
Os processos de captura de CO₂ visam produzir ao final uma corrente concentrada do gás, com taxas acima de 90%, para que seja destinado a outros usos e aplicações (BORGES, 2020). A captura está relacionada a um método que irá remover o gás da atmosfera ou de um fluxo industrial, enquanto o sequestro do gás está ligado à sua neutralização pós captura, fixando o CO₂ de forma que ele fique sem voltar para atmosfera por cerca de 1000 anos (EDX, 2018).

A captura de CO₂ pode ser realizado em três diferentes estágios dos processos industriais: pós-combustão, pré-combustão e oxi-combustão, como mostra a Figura 1. Uma vez capturado, esse gás com alto grau de pureza pode ser utilizado para outras finalidades, como por exemplo produção de ureia, de bebidas, ácido fórmico, dentre outros (RONCONI e SANTOS, 2014).

A captura pós-combustão é mais usualmente utilizada em indústrias termelétricas, indústrias fertilizantes, em processos de siderurgia e metalurgia, refinarias e indústrias de cimento. Neste tipo de atividade industrial, são utilizados altos fornos, que atuam com uma baixa pressão (< 4 bar) do gás natural ou carvão para combustão, tendo uma concentração baixa de CO₂ (3-15%) e em altas temperaturas (>500 °C). É possível identificar a presença de contaminantes nesse gás, como óxidos de enxofre e de nitrogênio, subprodutos da reação de combustão. Os desafios nesse processo estão relacionados a necessidade de resfriamento, vazões na ordem de 100 mil m³/h, que dificultam no dimensionamento de equipamentos que atendam essas necessidades. As

tecnologias mais utilizadas para a captura do CO_2 nessa etapa são a absorção química, adsorção, separação por membranas e criogenia (SPIGARELLI e KAWATRA, 2013).

Figura 1: Captura de CO_2 em diferentes estágios industriais.



Fonte: De Jesus (2022) modificado de Spigarelli e Kawatra (2013).

Na pré-combustão, o CO_2 é capturado quando o combustível passa por um pré-tratamento, sendo transformado em gás de síntese. Há um elevado fluxo de CO_2 à altas temperaturas e alta pressão (2 - 7 MPa). Nessa etapa do processo também ocorre a oxidação parcial do combustível que é utilizado, podendo ainda ser utilizado em outros processos, para produção energética combinado com um ciclo de gaseificação integrado. As tecnologias mais utilizadas para esse tipo de captura a absorção física com Rectisol ou Selexol como também no uso de membranas. O desafio de implementação da captura em plantas de gaseificação nessa etapa seriam as perdas de eficiência no processo (SOUZA, 2021).

Segundo Ronconi e Santos (2014), na oxi-combustão, o combustível fóssil é queimado na presença de oxigênio, com grau de pureza em cerca de 95%. Nesse processo de combustão em oxigênio puro, o fluxo de gás gerado contém cerca de 80% de CO_2 e água, onde o oxigênio é obtido pela destilação do ar. Há então a separação da água do dióxido de carbono, através de resfriamento e compressão, onde o CO_2 é comprimido e armazenado para ser fornecido como matéria prima. Esse processo exige uma grande demanda energética na separação do oxigênio do nitrogênio do ar, além de possuir

limitações em relação aos tanques de combustão, que devem possuir uma alta resistência térmica.

O sequestro do CO₂ é uma das etapas posteriores ao processo de captura, geralmente atribuído a sua injeção em reservatórios e poços de petróleo e gás natural, aquíferos salinos e camadas de carvão. Essas formações possuem estruturas geológicas para armazenar esse gás e não permitir que retorne para atmosfera (RAVAGNANI e SUSLICK, 2008). Ao redor do mundo, existem startups e pesquisadores visando estudar e desenvolver técnicas de sequestro do CO₂ através da fixação em materiais de construção civil, como injeção em concreto, carbonato de cálcio ou conversão em produtos, como polímeros, fibras de carbono, nanotubos e grafite, além da produção de carbono puro, denominado de carbono negro, o qual pode ser empregado para a obtenção de grafite ou fabricação de grafeno. Entretanto, ainda não se sabe o tempo de permanência do gás nesses elementos, de forma que não retorne para atmosfera (EDX, 2018).

2.2.1 Métodos de Captura de CO₂

Métodos de captura têm sido estudadas ao longo dos anos, onde se destacam processos emergentes como uso de absorção, separação criogénica, membranas e processos de adsorção (GASPAR, 2014). A seleção do melhor método irá depender de condições operacionais, como pressão e temperatura, além de fatores como concentração do CO₂, presença de impurezas, custos energéticos e impactos ambientais (BORGES, 2020).

Na captura através da absorção, solventes químicos reagem com o CO₂ presente no gás de combustão, e é regenerado com aumento da temperatura. O solvente mais utilizado é a solução de amina, que absorve o CO₂ em uma reação química, sendo mais aplicado em indústrias químicas e petrolíferas. Os processos de absorção e regeneração são realizados em dois tanques separados. A maior desvantagem nesse método é a degradação das aminas, que são compostos corrosivos, e o alto consumo energético para regeneração. Ao longo do tempo, as aminas reagem com SO₂ e NO₂ formando sais, que diminuem a eficiência do processo ao longo do tempo. Além disso, podem formar a nitrosamina como subproduto, que é um composto carcinogênico (BURGOS *et al.*, 2022).

A criogenia é utilizada para purificar fontes concentradas de CO₂, onde atua a baixas temperaturas e pressão. Esse método consiste na condensação do CO₂, que ocorre em temperaturas de -78,5°C, alcançando uma pureza de 99,99% de CO₂. Nesse processo, o CO₂ é convertido para estado líquido, não necessitando de compressão para o seu

transporte. A desvantagem do uso de tecnologias de criogenia está no alto custo operacional e energético, além de ser aplicado para correntes que possuam alta concentração de CO₂ (BORGES, 2020).

O funcionamento do uso de membranas para captura de CO₂ consiste nas interações físicas e químicas entre o componente gasoso e o material que compõe a membrana. Essas diferenças entre interações fazem com que compostos passem mais rápidos que outros, onde a escolha do material se baseia na seletividade entre o CO₂ e os outros gases. Na parte física, as membranas são escolhidas tendo em vista o tamanho das partículas, difusão, densidade capilar ou polaridade. O uso de membranas também pode ser utilizado como colunas de absorção, onde o CO₂ é absorvido pelos compostos químicos presentes. Esse método é considerado promissor, porém, o consumo de energia ainda é considerado elevado por utilizar uma diferença de pressão na sua execução (XU *et al.*, 2019).

Dentre as técnicas apresentadas, a adsorção é atualmente considerada a com maior potencial, por seu baixo custo e facilidade de integração com outros sistemas. (CARVALHO, 2018). O uso de sólidos porosos para a adsorção, mais comumente aplicada em etapas de pós-combustão, tem apresentado resultados promissores diante do uso problemático de soluções aquosas de aminas, que atualmente é a mais aplicada na indústria, devido ao nível de maturidade (RIBEIRO *et al.*, 2022).

2.3 Adsorção

A adsorção é um método que se baseia no princípio físico-químico de transferência de massa, onde fluidos líquidos ou gasosos se concentram na superfície porosa de um material sólido possibilitando a separação de componentes desse fluido (Nascimento *et al.*, 2020). O sólido que captura o fluido em sua superfície é chamado de adsorvente, e a substância que foi adsorvida é chamada de adsorvato. Para que o processo de adsorção seja eficiente, é necessário que haja a presença de sítios ativos na superfície, que irão gerar uma força de atração desequilibrada na superfície do sólido, responsável pelo processo de adsorção (PIRES, 2021).

O tipo de adsorção é caracterizado pelas forças envolvidas no processo, sua intensidade, que irá depender da natureza do sólido e os tipos de moléculas que serão adsorvidas. Fatores como pressão, temperatura e concentração também influenciam no processo, em que o tipo de adsorção pode ser classificado como adsorção física ou química (SILVA, 2020).

Na adsorção física, as moléculas são atraídas à superfície do material através das forças de Van der Waals, sem formar ligações químicas que podem modificar o material. Nesse tipo de interação, há possibilidade de reversibilidade. A dessorção é o termo utilizado para caracterizar o fenômeno inverso da adsorção, onde há a liberação do composto que foi anteriormente fixado em sua superfície (OLIVEIRA, 2010). Para ocorrer esse processo, é necessário que haja uma perturbação no sistema, onde o material adsorvente pode ser regenerado ao se aplicar um aumento de temperatura ou redução da pressão do sistema, onde há a liberação do gás dos microporos (RONCONI e SANTOS, 2014).

O processo de regeneração do material adsorvente utilizando a modulação da temperatura é conhecido como *Temperature Swing Adsorption* (TSA). No TSA, cada ciclo irá operar em condições diferentes. O fluido é adsorvido em condições de baixa temperatura, e quando atinge-se o nível de saturação do sistema, onde não há mais capacidade de captura do gás ou líquido de interesse, é iniciado o processo de dessorção com a liberação do adsorvato com aumento de temperatura. A dessorção então ocorre em temperaturas acima de 100°C. É um processo considerado vantajoso para casos em que há espécies fortemente adsorvidas, porém, possui baixa eficiência energética e pode diminuir a vida útil do adsorvente (DANTAS, 2009).

A dessorção por modulação de pressão é conhecida como *Pressure Swing Adsorption* (PSA). O método PSA funciona em ciclos de pressurização e despressurização. A etapa de adsorção ocorre a altas pressões. Para a realização da dessorção é realizada uma baixa de pressão no sistema, podendo ser aplicado o vácuo, onde o fluido preso nas estruturas microporosas é então liberado. Essa técnica é considerada promissora, já que possui um baixo custo energético e pode aumentar a vida útil do material. Sua eficiência, porém, fica comprometida caso as condições de operação do fluido variem significativamente (KELLER e STAUDT, 2005).

Na adsorção química, a interação entre as moléculas e o material adsorvente pode ser irreversível, devido a transferência de elétrons ser significativamente alta, formando uma ligação química entre a molécula e o adsorvente. As ligações formadas são ditas covalentes ou iônicas (MATTIELO, 2017). Devido à alta seletividade e a baixa capacidade dos adsorventes, a adsorção química é comumente utilizada para remoção de impurezas a baixas concentrações (SILVA, 2020). O Quadro 1 apresenta as principais diferenças entre a adsorção física e química.

Tabela 1: Comparação entre adsorção física e química.

Critério	Adsorção física	Adsorção química
Adsorvente	Todos os sólidos	Alguns sólidos
Adsorvido	Todos os vapores	Alguns gases
Zona de temperatura	Baixa (próximo do ponto de ebulição)	Geralmente alta
Quantidade adsorvida por unidade de massa	Alta	Baixa
Adsorção a baixa pressão	Baixa	Alta
Adsorção a alta pressão	Alta ($\rightarrow \infty$)	Ligeiro aumento
Especificidade	Baixa (toda a superfície disponível)	Alta (adsorção só em centros ativos)
Cobertura superficial	Camadas múltiplas	Monocamada
Reversibilidade	Reversível	Frequentemente irreversível
Calor de adsorção	Baixo (0,5-5 kcal/mol)	Alto (5-100 kcal/mol)
Energia de ativação	Baixa (< 1 kcal/mol)	Alta

Fonte: Dias (2014).

A Equação 1 representa a reação de adsorção, onde geralmente a reversibilidade é alcançada apenas na adsorção física. Quando a reação é reversível, o equilíbrio é alcançado quando a taxa de adsorção é igual a taxa de dessorção, não havendo remoção adicional do composto. Dessa forma, deve-se aplicar o processo de dessorção, para que o material adsorvente esteja apto novamente a acumular moléculas em sua superfície (FONSECA, 2019). Sendo A: substância adsorvida (adsorvato), B: adsorvente e AB: composto adsorvido.

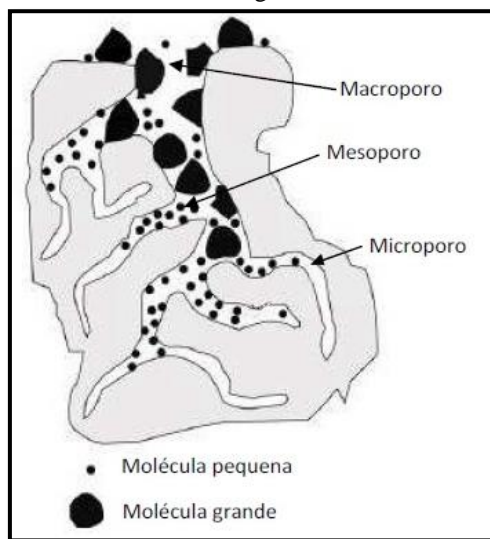


Fatores como porosidade, área superficial, propriedades do adsorvente e adsorvato e temperatura caracterizam um bom processo de adsorção. A área superficial está diretamente ligada a intensidade do processo, já que a adsorção é um fenômeno de superfície. As propriedades do adsorvente também são determinantes para o processo, já que este determina as condições de porosidade do material, taxas de adsorção e área superficial, que dependem da natureza do material escolhido. Outro fator chave é a temperatura, que afeta a velocidade de adsorção e energia cinética, influenciando na taxa de difusão. Adsorventes potenciais incluem zeólitas, óxidos metálicos, polímeros ou carvão ativado (SOUZA, 2019).

A porosidade do adsorvente é uma das características mais importantes, por ser onde ocorre o processo de ligação das moléculas de interesse com os sítios ativos do

adsorvente. Um material poroso é qualificado pela quantidade de espaços vazios que possui em sua estrutura, enquanto um material considerado denso não possui. O poro é descrito como a cavidade em uma superfície. Ele pode ser classificado como macroporo, mesoporo e microporo, como pode ser visto na Figura 2. Um macroporo possui larguras de 50 nm, enquanto o mesoporo larguras entre 2 nm e 50 nm e o microporo com larguras inferiores a 2 nm (REIS, 2013).

Figura 2: Estrutura com diferentes granulometrias e tamanhos de poros.



Fonte: Teixeira, 2014.

A aplicação mais comum para a adsorção é no tratamento de água, onde materiais como alumina ativada (Al_2O_3), óxidos metálicos, carvão ativado, sílica gel, resinas de troca iônica, são utilizados como adsorventes de compostos orgânicos e inorgânicos. A escolha do material adequado irá depender do custo de aquisição, do composto a ser adsorvido e das características operacionais do sistema de tratamento (FONSECA, 2019).

Souza (2019) estudou o uso de óxidos metálicos para adsorção do corante sintético vermelho Congo, descartado pela indústria têxtil e que possui alta toxicidade para o meio ambiente, podendo ocasionar problemas renais e cerebrais para os humanos. O resultado indicou uma eficiência elevada para remoção por adsorção do corante, podendo ser implementado em etapas de processos de tratamento de efluentes industriais. Autores como Aguiar, Novaes e Guarino (2002) e Alves (2017) também identificaram um potencial de adsorção de metais pesados e agrotóxicos presentes em efluentes industriais com o uso de aluminossilicatos e carvão ativado, respectivamente.

Para tratamento de gases, a adsorção é comumente aplicada em processos de desodorização em estações de tratamento de efluentes que utilizam reatores anaeróbicos.

Os odores são ocasionados pela liberação principalmente de compostos orgânicos sulfurados na decomposição da matéria orgânica. O material mais utilizado para a adsorção desses compostos é o carvão ativado (CABRAL, 2003). A adsorção de gases também pode ser atrelada a processos de purificação de biogás e captura de gases poluentes como CO, CO₂, NO_x e SO_x (PINHEIRO, 2012).

Dentre os materiais utilizados para adsorção gasosa, o carvão ativado ou biocarvão se destacam devido a sua estabilidade, ao seu alto potencial de captura e baixo custo. Além disso, a diversidade de matérias primas para o carvão ativado gera grandes variações de tamanho do poro, área superficial e estrutura do material. Entretanto, para sua aplicação em processos de adsorção de CO₂, é necessário o tratamento de impurezas, como óxidos de enxofre, nitrogênio e água, que podem competir pelos sítios ativos presentes na superfície. Outra desvantagem na adsorção física é a sua temperatura de operação, devendo estar próxima da temperatura ambiente (25°C), em que temperaturas altas podem interferir na eficiência de adsorção. Isso dificulta sua aplicação em alguns processos industriais de pós-combustão, que possuem uma liberação de gases com temperaturas acima de 100°C, necessitando de etapas de redução (SPIGARELLI e KAWATRA, 2013).

2.3.1 Carvão ativado

O carvão ativado consiste em um material carbonoso, com elevada área superficial e porosidade, amorfo ou cristalinos, que sofreram um processo térmico afim de aumentar a sua porosidade. Ele é obtido pela carbonização da matéria prima, com temperaturas que variam de 400-1000 °C. É utilizado por muitos anos para tratamento de efluentes líquidos e gasosos (SANTANA *et al.*, 2019).

No processo de carbonização, há uma degradação da matéria orgânica onde são removidos os compostos voláteis, em um ambiente com ausência de oxigênio. Diferentes compostos podem ser emitidos, dependendo da temperatura utilizada, o tempo de carbonização, taxa de aquecimento, fluxo de gás e temperatura final a ser atingida. Para temperaturas muito elevadas, os compostos voláteis são convertidos em monóxido e dióxido de carbono, metano e hidrogênio. Em temperaturas mais baixas, os componentes são alcatrão, ácido pirolenhoso, dentre outros (SONOBE, 2018).

O pré-tratamento da biomassa para a produção do carvão é importante para obtenção de melhores resultados. Devido ao alto teor de água presente na biomassa, que

pode chegar a 85% da base da matéria-prima, é necessária secagem do material em estufa antes de sua carbonização (FIORENTIN *et al.*, 2010).

As principais características de um carvão ativado dependem das propriedades da matéria prima que o originou, além dos processos para sua fabricação, como temperatura de carbonização e os tipos de ativação química ou física. O carvão originado pode estar na sua forma granular, conhecido como CAG, ou na forma em pó (CAP). Eles se diferenciam pelo tamanho das partículas, onde o CAG possui partículas de diâmetros de 0,6 a 3,0 mm e o CAP de 0,01 a 0,03 mm (ANTONIETI, 2022).

A ativação do material tem como objetivo aumentar o volume de poros e área superficial do carvão. A ativação física consiste na reação de gaseificação controlada do carvão, a temperaturas entre 800 e 1000°C, onde ao atingir a temperatura final são utilizados agentes oxidantes, como vapor de água, CO₂ ou a mistura dos dois gases (MEDEIROS *et al.*, 2019). Esse processo é realizado após a carbonização. A difusão completa do vapor utilizado no material é importante para a formação dos poros, que está relacionada com a quantidade de vapor e a temperatura utilizada. Esse tipo de ativação tem um potencial de geração de microporos na estrutura, que reflete em uma boa adsorção de compostos orgânicos e minerais em fluxos líquidos ou gasosos (CARVALHO, 2018).

O processo de ativação química é realizado antes da carbonização do matéria-prima, que consiste na desidratação inicial do material. Para isso, são utilizados agentes químicos impregnados no material, onde os mais utilizados são o ácido fosfórico, cloreto de zinco, hidróxido de potássio ou de sódio. Após a impregnação na matéria-prima, sob condições metodológicas específicas de acordo com agente químico utilizado, o material é levado para posterior ativação em ambiente controlado, com ausência de oxigênio, em temperaturas entre 400 e 700°C (ANTONIETI, 2022).

O maior uso do carvão ativado atualmente se encontra no tratamento de águas de abastecimento e águas residuárias, para retirada de contaminantes. O CAG e CAP geralmente são aplicados em colunas de leito fixo de adsorção, removendo moléculas de alto peso molecular (MACIEL, 2016).

Crittenden *et al.* (2012) apresentou em seu livro as principais diferenças entre o CAG e CAP quanto a sua aplicação em tratamento de água. Segundo o autor, o carvão granular possui maiores vantagens relacionadas a sua facilidade de regeneração e menor volume necessário para tratar determinado volume de água, quando comparado ao carvão em pó. Entretanto, possui desvantagens em necessitar de tubulações para distribuição do

fluxo e substituição do carvão saturado. A escolha do CAP ou CAG irá depender do processo ao qual será destinado.

O carvão conhecido como carvão ativado comercial é derivado: de materiais naturais e renováveis, como o exemplo de madeiras, cascas, fibras; ou de origem mineral, como o carvão mineral, coque de petróleo ou de origem sintética, como é o caso do uso de fibras rayon. Como alternativa, há a produção do carvão de origem agrícola, tendo baixo custo e alto teor de carbono, com o uso de bagaço de cana de açúcar, resíduos de eucalipto, casca de macadâmia, caroços de abacate e açaí e resíduos de coco (ARAÚJO *et al.*, 2019).

Alves *et al.* (2015) produziu carvão ativado do endocarpo do coco a uma temperatura de 780°C, impregnado com ácido fosfórico, para adsorção de gás natural, obtendo resultados superiores ao da adsorção com carvão comercial. Silva *et al.* (2017) por sua vez, produziu um carvão ativado obtido de resíduos do coco à 350°C, e constatou que os poros desenvolvidos apresentaram obstruções de materiais de decomposição formados durante a carbonização. Porém, ainda com as obstruções presentes, o material apresentou boas características para adsorção do corante Rodamina B.

Araújo *et al.* (2018) produziu carvão ativado do coco à 700°C com ativação química utilizando o ácido fosfórico, com objetivo de promover a adsorção de CO₂, obtendo resultados promissores de captura. Moraes *et al.* (2019) utilizou uma temperatura de 800°C para carbonização do coco, produzindo um carvão ativado para adsorção do corante azul dimetileno. Os estudos apresentados acima possuem o mesmo material como precursor, porém, utilizam temperaturas diferentes de carbonização. Esse fato demonstra a importância de investigação da temperatura aliada ao seu uso, aos compostos que serão adsorvidos e condições de ativação química ou física.

Em sua aplicação para adsorção de CO₂, o carvão ativado do coco tem demonstrado alto potencial. Huang, Chen e Lin (2015) produziram o carvão ativado do coco em temperaturas de 600°C, 700°C, 800°C, 900°C e 1000°C, para avaliar melhor temperatura de carbonização em um processo de adsorção de CO₂. Os autores notaram que, com o aumento da temperatura há maior remoção de impurezas e hidrocarbonetos que obstruem os poros do carvão. O aumento entre 600°C e 800°C foi o mais significativo, indicando maior área superficial com o aumento da temperatura. Acima de 800°C, o efeito da temperatura não foi tão efetivo no aumento da porosidade do material.

2.3.2 Biocarvão do coco

O biocarvão ou biochar, é o termo utilizado para caracterizar um material que é rico em carbono obtido da biomassa, em ambiente fechado com ausência de oxigênio, em temperaturas que variam desde 400°C a 800°C (LEHMANN e STEPHEN, 2009). Também pode ser definido como um material sólido proveniente da biomassa submetido a um processo térmico de conversão, em um ambiente com ausência total ou parcial de oxigênio (BARRETO, 2018). Normalmente, a oxidação parcial durante a carbonização pode envolver níveis de oxigênio que variam de cerca de 5% a 20% da quantidade de oxigênio necessária para a combustão completa (TAY *et al.*, 2010)

O uso de resíduos da biomassa para produção de biocarvão é considerado como uma oportunidade para destinação sustentável dos resíduos, devido a sua contribuição na redução da poluição gerada pelos mesmos, contribuindo também para condições saúde pública. Além disso, reduz a disposição de contaminantes no solo, que possuem elevada toxicidade. Dentre as aplicações do biocarvão, destacam-se o sequestro do carbono, melhoria na fertilização do solo, remediação de poluentes e reciclagem de produtos agrícolas (AHMAD *et al.*, 2014).

O resíduo de biomassa do coco (*Cocos nucifera L.*) tem sido estudado ao longo dos anos, devido a sua grande escala de produção e alto potencial de reaproveitamento. O Brasil é o quinto maior produtor de coco no mundo, onde produz cerca de 1,6 bilhão de frutos, cocos, anualmente, que são utilizados para produção de copra, tendo como derivados óleo de coco e farinha de coco. O Nordeste concentra 71,2% da produção nacional (BRAINER E XIMENES, 2020).

A geração desse resíduo anualmente é de cerca de 8,6 milhões de toneladas ao ano, que são destinados para aterros sanitários e lixões, onde demoram cerca de oito anos para se decompor completamente. O descarte desses resíduos pode contribuir para o aumento da poluição ambiental, devido a decomposição da matéria, que gera metano e chorume, além de atrair vetores que o utilizam como fonte de alimento (TEXEIRA, 2020). Em regiões litorâneas, cerca de 70% do lixo gerado é composto por coco verde, podendo aumentar em períodos de alto fluxo de turistas, como no verão (SENHORAS, 2003 *apud* NASCIMENTO e SEDANO, 2021)

O coco é basicamente composto por lignina, celulose, hemicelulose e água, além de possuir como elementos básicos o carbono, hidrogênio e oxigênio (ARENA, LEE e SHIFT, 2016). Ele é constituído pelo mesocarpo, sendo a parte fibrosa e espessa do coco, pelo epicarpo, que representa a superfície ou epiderme, e pelo endocarpo, considerada a

parte mais dura do coco. A Figura 3 apresenta a estrutura do coco verde (MATTOS *et al.*, 2014).

Figura 3: Estrutura com diferentes granulometrias e tamanhos de poros.



Fonte: Mattos *et al.* 2014.

O endocarpo do coco é a parte mais rígida, possuindo um alto poder calorífico. Possui um teor de 50% de lignina, que é responsável pela durabilidade do material e sua alta dureza, evitando assim que partículas do carvão ativado se rompam, tornando-o um excelente precursor do carvão ativado (TEXEIRA, 2020). Segundo Arena, Lee e Clift (2016), o uso do coco para transformação em biocarvão tem relação com a sua abundância, alta densidade e pureza, e devido a sua pegada ambiental mais sustentável quando comparada aos carvões minerais.

Reis (2020) produziu o biocarvão do coco com uma temperatura de carbonização de 450°C, visando o reaproveitamento do resíduo de coco. Dentre as aplicações identificadas pelo autor, estão o aumento de fertilidade do solo, fixação de carbono e aumento da umidade e qualidade do solo. Silveira (2018) também estudou a produção de biocarvão, bio-óleo e biogás, atingindo um aproveitamento de 100% do coco. O autor obteve como resultados um maior ganho energético do processo em relação a matéria-prima na fração mesocarpo, com uma temperatura de carbonização de 400°C e na fração endocarpo com uma temperatura de 600°C.

Estudos para remoção de poluentes encontrados em ambientes aquáticos também apontam para o biocarvão como agente promissor. Jesus (2016) utilizou o biocarvão do coco para remediação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) em água,

obtendo um percentual entre 90,64% e 86,9% de adsorção do HPA. O resultado foi superior ao biocarvão obtido da casca da laranja, que obteve eficiências de remoção entre 40,12% e 85,32%.

Panchal *et al.* (2019) produziram biocarvão do coco e da casca de ovo, para identificar melhores condições para adsorção de CO₂. Os autores verificaram uma temperatura de carbonização de 800°C como a de melhor desempenho na adsorção, com formação de microporos e mesoporos na superfície do biocarvão. Ello *et al.* (2013) utilizou a biomassa do endocarpo do coco para produção de um carvão microporoso, à 800°C. Eles constataram que a produção do biocarvão poderia ser seguida de uma etapa de ativação física, resultando em um carvão microporoso com alta capacidade de adsorção de CO₂.

Araújo (2018) ativou quimicamente o biocarvão do coco para adsorção de CO₂. O autor impregnou o ácido fosfórico como agente químico no endocarpo do coco, seguido por uma carbonização a 700°C, obtendo uma área superficial de 268,32 m²/g. Hauchhum e Mahanta (2014) utilizaram as fibras do mesocarpo do coco para produção do carvão ativado, obtendo uma área superficial de 214 m²/g, similar ao encontrado por Araújo (2018) em sua dissertação.

Os autores Arena, Lee e Clift (2016) realizaram um estudo para avaliar os principais impactos do uso do coco como carvão ativado. Suas maiores limitações incluem: alto consumo de energia na sua produção, o que implica em emissões de GEE quando não há o uso de energia renovável; toxicidade humana potencial, devido aos GEE emitidos pela demanda energética na produção, que afetam a qualidade do ar e a saúde da população local; e o potencial de acidificação de ecossistemas, quando não há o tratamento dos gases de combustão, que quando liberados como efluentes, podem afetar os ecossistemas aquáticos e terrestres locais. Uma forma de superar esses desafios seria o uso de energias renováveis para produção do carvão ativado e uma boa gestão ambiental do local de produção com um processo integrado eficiente.

2.4 Simulação computacional

A modelagem e simulação de processos é uma ferramenta de grande importância na compreensão de mecanismos causais, processos de desenvolvimento de sistemas ambientais e como eles se relacionam com diferentes cenários e quadros socioeconômicos, políticos e ambientais. Além de contribuir no entendimento de processos, a simulação computacional também permite a reprodução de processos já

ocorridos (construção de séries históricas), a compreensão de fenômenos complexos *just-in-time*, ou seja, no momento presente em que ocorrem, e a previsão e projeções futuras de eventos, com: (i) a adequada utilização de equações que descrevem e caracterizam comportamentos (modelagem matemática computacional); (ii) o estabelecimento de processos e fluxos de interrelação em sistemas complexos (modelagem conceitual), e; (iii) a programação e execução de ensaios laboratoriais ou campanhas de campo (modelagem experimental). Essa previsão é importante no auxílio do desenvolvimento de planejamentos, seja territorial, de uso de recursos naturais ou outros processos (SILVA *et al.*, 2019).

O processo de modelagem tem se desenvolvido ao longo dos anos, onde atualmente já é possível a solução de problemas complexos mais próximos da realidade. Isso também é possível devido ao desenvolvimento de computadores, como maior velocidade no processamento, memória com mais capacidade de armazenamento de dados e computação gráfica (SANTOS e COSTA, 2015).

A fluidodinâmica computacional, conhecida como *Computational Fluid Dynamics* (CFD), é um campo de estudo para resolução de modelos matemáticos que descrevem escoamento de fluidos, transformações químicas, transporte de massa e de calor, sendo amplamente utilizado pela engenharia. Segundo Shen *et al.* (2020), a técnica CFD traz um grande benefício principalmente para as indústrias, na descrição de seus processos, tendo um rápido desenvolvimento e amplas aplicações ao longo dos anos.

Além da sua larga aplicação em áreas industriais, a fluidodinâmica computacional também é utilizada em áreas não industriais, como por exemplo aerodinâmica de espaçonaves e veículos, combustão em motores e turbinas a gás, fluxo em difusores, dentre outros (JUSTI, 2012). Equações diferenciais parciais (EDP) são utilizadas para descrever as características de movimento dos fluidos, que são convertidas em algébricas utilizando um pacote de software e linguagens de programação (ZAWAWI *et al.*, 2018).

É possível solucionar equações de conservação de momento, massa e energia através da fluidodinâmica, sendo necessário a aplicação de um método de resolução de equações diferenciais parciais. Um dos métodos mais utilizados é o Método dos Volumes Finitos (MVF). Nesse método, há uma divisão do domínio em volumes de controle, trabalhando-se com número discreto de pontos, onde as leis de conservação são as mesmas para todos os pontos. Dessa forma, é possível trabalhar com sistemas de geometrias irregulares. Para discretizar um domínio geométrico, ele deve ser subdividido em um número menor de volumes. Essa subdivisão é chamada de malhas. O número de

malhas garante a precisão das soluções em CFD. Para isso, deve-se evitar a distorção de elementos, e obter uma variação suave de espaçamentos entre eles (MALISKA, 2017).

Para simular um processo em CFD, são necessárias três etapas: pré-processamento, processamento de dados e pós-processamento. No pré-processamento, a geometria do elemento é definida, juntamente com fenômenos físicos e químicos. Há a geração da malha e seleção de condições de contorno. No processamento, o sistema irá solucionar as equações algébricas. Na etapa final, é possível obter os gráficos, visualizar a geometria com seu domínio e com as malhas geradas, o comportamento do fluido e propriedades de interesse, como por exemplo, tempo de saturação de uma coluna de adsorção (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

A CFD tem sido uma metodologia largamente aplicada para descrição de processos de adsorção em colunas de leito fixo, promovendo resultados referentes a velocidades, perfis de concentração e saturação ao longo da coluna. As equações utilizadas para descrever esse processo fluidodinâmico são equações de transferência de massa, conservação de momento e conservação e energia (JRIBI *et al.*, 2016).

As equações de transferência de massa são definidas pela taxa de transferência e equilíbrio de adsorção, que juntas, geram a equação (2), sendo S_m = termo fonte de massa correspondente ao adsorvato, ρ_f = densidade do fluido, ε = porosidade, v = velocidade superficial e t = tempo (ZHENG, LIU e LIU, 2010).

$$-S_m = \frac{\partial \varepsilon \rho_f}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho_f v) \quad (2)$$

O balanço da conservação de momento em meios porosos é definido pela adição de um termo fonte de momento na equação padrão para escoamento laminar de Navier-Stokes, gerando a equação (3). Nessa equação, \mathbf{F} = termo fonte (vetorial) de momento homogêneo, μ = viscosidade do fluido e α e C_2 = coeficientes de Ergun (ZHENG, LIU e LIU, 2010), e \mathbf{n} o vetor unitário direcional.

$$\mathbf{F} = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v + \frac{1}{2} \rho_f C_2 |v| v_i + S_m v\right) \mathbf{n} \quad (3)$$

Considerando um leito adiabático, ou seja, onde não há transferência de calor com a vizinhança, o balanço de energia pode ser descrito pela equação (4). Os termos k_{ef} = coeficiente de transferência de massa, E_p e E_f = energias potenciais das partículas porosas

e do fluido, ΔH = calor de adsorção, ρ_p = densidade do adsorvente, T = temperatura, p = pressão estática e τ = tensor de tensão (ZHENG, LIU e LIU, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon \rho_f E_f (1 - \varepsilon) \rho_p E_p] + \nabla \cdot [v(\rho_f E_f + p)] = \nabla \cdot (k_{ef} \nabla T + (\tau \cdot v) + (1 - \varepsilon) \rho_p \Delta H) \quad (4)$$

Silva (2020) aplicou as equações descritas acima no desenvolvimento da sua dissertação, para simular um processo de adsorção de CO₂ por uma coluna de leito fixo, avaliando a temperatura e concentração do gás e sua influência na capacidade de adsorção. O autor obteve sucesso em sua simulação, descrevendo o processo de adsorção de forma coerente com resultados da literatura, obtendo um modelo 3D transiente através do software ANSYS.

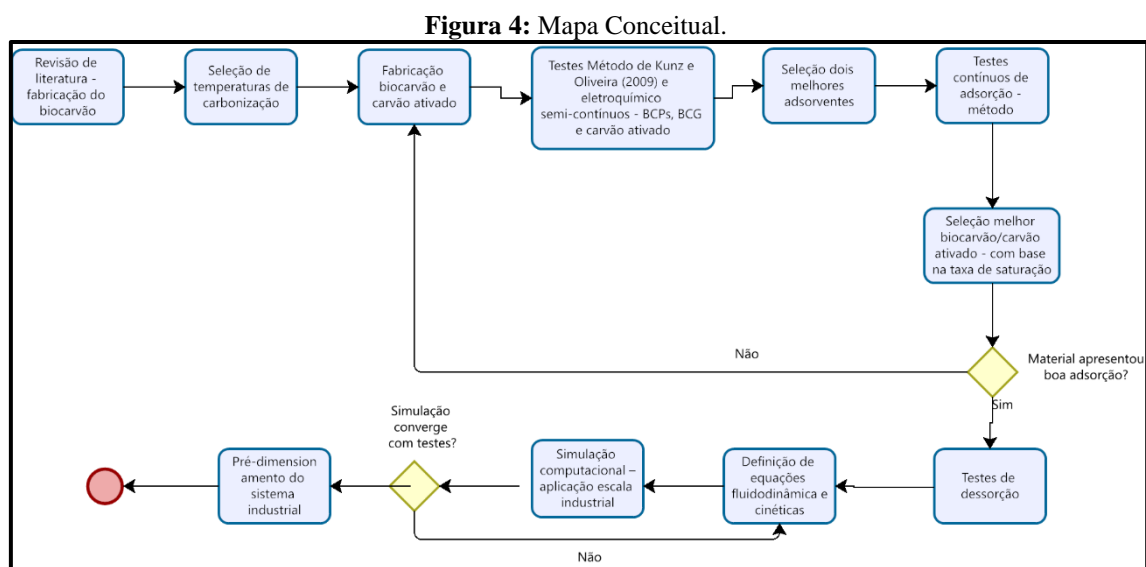
O ANSYS é um *software* de elementos finitos de uso geral para a solução de análises estruturais e de engenharia, em processos transferência de massa e de calor. Os recursos da solução ANSYS incluem uma grande variedade de sistemas e ferramentas para análises estáticas, elásticas e plásticas, tensão térmica, análise de transferência de calor, de condução e convecção, acoplado ao escoamento de fluidos e acoplado ao escoamento elétrico. As análises podem ser feitas em uma, duas ou três dimensões, incluindo opções de elementos assimétricos e harmônicos. O ANSYS também contém um pacote gráfico completo e recursos extensivos de pré e pós-processamento (MATSSON, 2022).

Sylvia *et al.* (2019) comparou a eficiência de adsorção de CO₂ por uma coluna de leito fixo preenchida de carvão ativado do coco e com zeólitas, através da simulação computacional, utilizando o ANSYS. Os autores identificaram uma superioridade da adsorção pelo carvão ativado do coco em relação as zeólitas, tendo uma eficiência de 63,13% de captura do CO₂, enquanto na zeólitas a eficiência foi de 57,86%.

Autores como Sztékler *et al.* (2021), Zulkifli *et al.* (2021), Qasem e Mansour (2018) também estudaram processos de adsorção de diferentes compostos, como CO₂, utilizando a fluidodinâmica computacional, utilizando o software e simulação computacional ANSYS. Essa aplicação se mostra promissora para descrição de processos de adsorção, com diferentes finalidades, seja por busca de dimensões adequadas de colunas, temperaturas ideais, interferência de contaminantes, concentrações, visualização do processo em escala industrial, dentre outros.

3. METODOLOGIA

Para alcance do objetivo geral desta dissertação, com a realização dos testes laboratoriais e computacionais, foi estabelecido um fluxo de processos, conforme apresentado no mapa conceitual na Figura 4. A revisão de literatura foi essencial para definição de etapas a serem seguidas no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Dessa forma, seguindo-se o mapa conceitual apresentado, foram levantados artigos e teses que utilizaram o coco como matéria prima para a produção de biocarvão. Para essa pesquisa, foi utilizada a base de dados do Google Scholar, Periódico Capes e Scielo, com período de publicação entre 2010-2023. Foram selecionados cerca de 24 estudos, que variaram entre dissertações de mestrados e artigos publicados em revistas científicas indexadas, tendo como palavras chaves o biocarvão do coco, carvão ativado e adsorção de CO₂. Esse material foi importante para seleção de temperaturas experimentais de fabricação do material, como também o agente químico utilizado na ativação do carvão. Será apresentada a metodologia adotada para produção dos biocarvões, os testes de adsorção, caracterização do material, regeneração e simulação do sistema industrial.

3.1 Estudo de caso

A pesquisa desenvolvida teve a parceria do programa de inovação FIEMG Lab 4.0 (Federação das Indústrias de Minas Gerais) e de uma indústria madrinha do programa.

O programa tem o propósito de acelerar o futuro da indústria, conectando-a com soluções inovadoras de startups e fomentando o desenvolvimento de pesquisas voltadas para áreas sustentáveis, de otimização de processos e gestão (FIEMG LAB, 2023). O FIEMG Lab 4.0 financiou a prova de conceito da tecnologia, com o objetivo atingir o TRL 3 em escala de maturidade, com experimentos laboratoriais para comprovar o potencial de captura de CO₂. O projeto teve um período estabelecido pelo programa de 4 meses de duração, com entrega de resultados e relatórios técnicos.

A indústria madrinha da pesquisa é da área de mineração de ferro-níquel, onde atua nos processos de extração do minério, tratamento, calcinação e refinamento. O ponto escolhido para realização de um estudo do potencial de adsorção de CO₂ foi no processo de tratamento do minério, onde a etapa de secagem com tambores rotativos gera emissões significativas de CO₂. A escolha do ponto foi baseada em seus parâmetros de emissões, onde possuem uma porcentagem de emissão de 3,3% a 4,4% de CO₂, ausência de contaminantes, vazão de 187.095,00 Nm³/h e temperatura de 60°C. O outro ponto emissor de CO₂ é no processo de calcinação. Porém, os parâmetros de emissões na calcinação possuem condições que dificultam o processo de adsorção, como a temperatura, que chega a 265°C, a presença de contaminantes, como óxidos de enxofre e de nitrogênio, e a vazão elevada, chegando a 363.101,33 Nm³/h. Por este motivo, optou-se por trabalhar em um ponto com menos etapas de pré-tratamento do gás necessária.

Dessa forma, para execução dos testes de adsorção, a concentração de CO₂ do estudo foi de 3,3% a 4,4%, de forma que se assemelhe as concentrações emitida pela chaminé dos secadores. Para garantir a escolha do melhor material para adsorver o CO₂ nessas concentrações, foram estudadas diferentes formas de fabricação do biocarvão e carvão ativado do coco. Estudos disponíveis na literatura apontaram para o uso de diferentes temperaturas de carbonização, como também o agente químico utilizado para ativação do biocarvão. A simulação computacional também foi realizada considerando este ponto de emissão de CO₂, com dados de entrada de vazão, concentração e dados do biocarvão de melhor potencial.

3.2 Produção dos biocarvões

3.2.1 *Biocarvão em pó (BCP)*

Para a produção do biocarvão em pó do mesocarpo do coco, foi prospectado um fornecedor de produtos derivados de coco com o intuito de realizar os ensaios de fabricação do biocarvão a partir da matéria-prima. Este procedimento permite que o

desenvolvimento da tecnologia tenha um fornecedor que viabilize suprimento de altos volumes do material base de fabricação do carvão ativado, à aplicabilidade industrial. Para isso a Empresa de Beneficiamento de Resíduos (EBR) foi contactada, empresa que recebe e processa resíduos da casca de coco de uma indústria de envase de água de coco verde, localizada em Salvador-BA. É possível observar na Figura 5 o pó obtido do mesocarpo do coco.

Figura 5: Pó do mesocarpo do coco utilizado para fabricação do biocarvão.



Fonte: Próprio autor, 2021.

A fabricação do BCP foi realizada então, em diferentes condições de temperatura. Não foram encontrados estudos que avaliaram a melhor temperatura de carbonização para adsorção de CO_2 com o mesocarpo do coco em pó. As temperaturas adotadas nesta pesquisa foram de 600°C , 700°C e 800°C , adaptada dos estudos de Huang, Chen e Lin (2015), que testaram diferentes temperaturas de carbonização do endocarpo do coco, para avaliar potencial para adsorção de CO_2 . Santos (2017) também produziu carvão ativado do mesocarpo do coco em diferentes temperaturas de carbonização, para avaliar a adsorção de corantes e de agrotóxicos em águas residuárias.

O processo de fabricação foi conduzido em bateladas. A mufla foi configurada para atingir a temperatura final de interesse, tendo uma taxa de aquecimento de 25°C por minuto. Ao atingir a temperatura determinada, a mufla fica em condição constante por uma hora. Após esse período, a mufla é desligada e resfriada, até atingir 100°C , onde pode ser aberta e o material retirado. As amostras de cada tratamento foram juntas, peneiradas e em seguida distribuídas nos recipientes de armazenamento, sendo

identificadas e separadas de acordo com a temperatura utilizada, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Armazenamento do biocarvão produzido.



Fonte: Próprio autor, 2021.

3.2.2 *Biocarvão granular (BCG)*

Para fabricação do biocarvão granular do endocarpo do coco, foram coletados resíduos de cocos de empreendimentos em Aracaju, fornecedores também de grandes volumes, que seriam destinados para o lixo comum. Inicialmente, foi realizado um processo de limpeza no coco, onde todo resíduo da polpa e fibras presentes foram retiradas, como mostra a Figura 7, para destinar apenas o endocarpo para fabricação do carvão. Para maior eficiência, utilizou-se de lixas para otimizar o processo de retirada de fibra.

Figura 7: Limpeza do coco para fabricação do biocarvão.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Após o processo de limpeza, o endocarpo foi triturado mecanicamente, sendo convertido em granulados, pedaços menores, que têm como destino o forno de alta temperatura (mufla) para ser carbonizado. Antes do processo de carbonização na mufla, os pedaços do coco foram colocados em estufa a 80°C por um período de uma hora, para retirada de umidade das amostras.

Figura 8: Diminuição da granulometria do endocarpo do coco.



Fonte: Próprio autor, 2021.

As amostras foram então pesadas em cadinhos e encaminhadas para a mufla por um período de 1 hora a uma temperatura de 700°C para sua carbonização, em ambiente controlado, com ausência de oxigênio. A escolha de apenas uma temperatura tem relação com o estudo realizado por Araújo (2018), que obteve resultados positivos de adsorção do CO₂ com o carvão granular nessas condições experimentais, obtendo eficiência de adsorção de 99%. Em seguida o material foi resfriado na mufla até 100°C. Ao atingir 100°C, o material foi retirado da mufla para redução de sua temperatura até a ambiente, em um dessecador, para não adquirir umidade do ambiente.

Figura 9: Fabricação do carvão ativado do endocarpo.



Fonte: Próprio autor, 2021.

3.2.3 Carvão ativado

A fabricação do carvão ativado quimicamente tomou como base duas matrizes iniciais, o mesocarpo e o endocarpo do coco. A metodologia utilizada foi a mesma que o Araújo (2018) utilizou em sua dissertação, sendo adaptada para o processo com o mesocarpo. Para a produção a partir do mesocarpo do coco, 200g de pó de coco foram separados em um béquer, e em seguida foi adicionado 300 ml de ácido fosfórico (80%). A mistura foi levada para um agitador à 80°C por 1 hora, e em seguida para uma estufa de secagem por 12 horas, também à 80°C. Após a secagem, uma vez que o pó absorveu todo o líquido, a amostra foi levada diretamente para mufla com configuração de 700°C. Esse carvão foi denominado carvão ativado dopado 1 (CAD 1).

Já para a produção do carvão dopado a partir do endocarpo do coco, 200 g de pedaços do endocarpo foram separados em um béquer, e em seguida foi adicionado 300 ml de ácido fosfórico (80%). A mistura foi levada para um agitador à 80°C por 1 hora, e em seguida para uma estufa de secagem por 12 horas também à 80°C. Após o período, as lascas do endocarpo do coco foram filtradas, e em seguida foram levadas para a mufla com a configuração de 700°C. Após 1 hora na temperatura máxima a mufla foi desligada, e foi aguardado chegar na temperatura ambiente para poder remover as amostras. As lascas de carvão ativado dopado, que em seguida foram maceradas até atingir um aspecto granular. As amostras foram lavadas com água destilada até atingir pH estável. Esse carvão foi denominado CAD 2. A Tabela 2 abaixo resume as diferentes metodologias adotadas.

Tabela 2: Resumo da produção carvão dopado.

Carvão ativado com ácido fosfórico	Matéria-prima	Metodologia
CAD 1	Mesocarpo do coco	12 horas na estufa com ácido fosfórico 80% (adaptada de Araújo, 2018)
CAD 2	Endocarpo do coco	12 horas na estufa com ácido fosfórico 80% (Araújo, 2018)

Fonte: Adaptado de Araújo, 2018.

Após o processo de aquecimento, as amostras de carvão foram submetidas a lavagens sequenciais, como ilustrado na Figura 10, até atingir temperatura ambiente, 25°C, para a remoção do excesso de ácido. Para isso foram adicionadas amostras de água destilada à temperatura ambiente ao carvão ativado, o material foi homogeneizado, e em seguida filtrado. Após a filtragem, foram realizadas análises do pH da água de saída do processo, até a obtenção de um valor constante. Por se tratar de um procedimento envolvendo produtos químicos, seguiu-se a NBR 14725 - Produtos químicos, com o uso de EPIs adequados (jaleco, máscaras e luvas) e o manuseio do produto respeitando suas especificidades.

Figura 10: Lavagem do carvão para estabilização de pH.

Fonte: Próprio autor, 2021.

3.2.4 Densidade Aparente

A determinação da densidade aparente das amostras de pó de carvão ativado de pó de coco e de endocarpo foi realizada de acordo com a NBR 12076-91. Esta determinação foi feita com secagem, inicialmente, em estufa, na temperatura de $150 \pm 2^\circ\text{C}$, (durante um período de 2 horas). Após o resfriamento da amostra em dessecador até a temperatura ambiente, a massa da proveta foi determinada e zerada da balança para que fosse medido apenas a massa de carvão. Preencheu-se a proveta com carvão até uma marca conhecida em mL e foi determinada sua massa. O fundo da proveta foi batido em superfície até a compactação do volume do pó de serragem. O procedimento foi realizado em triplicata. Anotou-se o volume correspondente ao nível ocupado pelo carvão ativado (mL) após a compactação e foi feito o cálculo de densidade aparente por meio da equação (4) abaixo:

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Onde ρ_a é a densidade aparente (g/mL ou g/cm³), m a massa do carvão ativado (g) e V o volume determinado após a compactação do pó de serragem (mL ou cm³). Foi realizado o cálculo do desvio padrão a partir da equação (5), para verificar a uniformidade dos dados. Dp indica o desvio padrão, ma a média aritmética e ρ_{a1} , ρ_{a2} e ρ_{a3} as medidas das densidades aparentes calculadas, respectivamente.

$$Dp = \sqrt{\frac{(\rho_{a1}-ma)^2 + (\rho_{a2}-ma)^2 + (\rho_{a3}-ma)^2}{3}} \quad (5)$$

3.3 Testes de adsorção

Os testes de adsorção de CO₂ foram executados em duas etapas. A primeira etapa consistiu em testes semi-contínuos para identificação de dois adsorventes com maior capacidade de adsorção de CO₂, devido a grande quantidade de material produzido em diferentes condições. Após a seleção dos dois adsorventes iniciou-se a segunda etapa, com a realização de testes contínuos em bancada, que são testes mais longos, simulando um processo contínuo industrial, até a saturação do material. Como a pesquisa teve duração de 4 meses, foi importante reduzir a quantidade de adsorventes para os testes contínuos.

O sensor utilizado para os testes de adsorção foi o Sensor SprintIR®-W 100% CO₂ - Modelo GC-0018, com tecnologia NDIR (infravermelho não dispersivo), resposta imediata e faixa de detecção de 0-100% de CO₂ (Figura 11). A tecnologia NDIR presente no sensor, faz com que o sinal produzido seja proporcional a energia infravermelha absorvida pelo CO₂, onde o sinal gerado é convertido eletronicamente para as unidades de concentração apresentadas.

Figura 11: Sensor SprintIR®-W 100% CO₂ - Modelo GC-0018.



Fonte: CO₂ Meter, 2021.

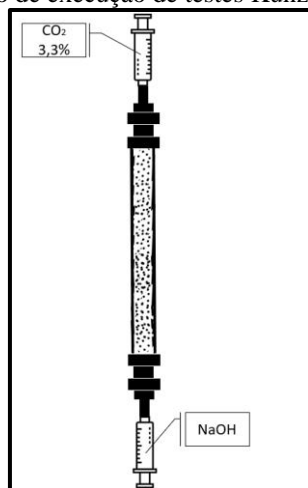
3.3.1 Testes semi-contínuos

Foram realizados testes de adsorção com todos os biocarvões e carvão ativado produzidos, no modo semi-contínuo, a fim de selecionar apenas dois para avançar para etapa de testes contínuos. Essa etapa foi necessária para triar os materiais, devido a quantidade produzida e à complexidade dos testes contínuos. Foram utilizados dois métodos para validação dos testes semi-contínuos. Os métodos foram o físico-químico, proposto por Kunz e Oliveira (2009), e o eletroquímico, com uso de sensores de detecção de CO₂. Este tipo de sensor eletroquímico foi escolhido devido a rápida resposta, com possibilidade de visualização dos dados de forma instantânea. Como fonte de CO₂, adquiriu-se um cilindro de 6 kg com CO₂ a 99,9% de pureza, sendo controlado por uma válvula de pressão e vazão.

Antes da execução dos testes com todos os tipos de adsorventes produzidos, eles foram submetidos à estufa a 150°C por um período de 1 hora para retirada da umidade presente nas amostras. Ao sair da estufa, eles resfriaram dentro de um dessecador contendo sílica. Foi utilizada uma coluna de vidro com diâmetro de 5/8", com 5g do adsorvente.

Nos primeiros ensaios de quantificação da capacidade de captura do CO_2 foi utilizada uma metodologia de fixação do carbono em uma solução saturada com soda cáustica (KUNZ e OLIVEIRA, 2009). A soda cáustica reage com o gás carbônico presente na parte gasosa da amostra, reduzindo o volume de gás do sistema, e o volume de CO_2 presente na amostra inicial é calculado através da diferença do volume de gás inicial e final. O método pode ser observado na Figura 12.

Figura 12: Modo de execução de testes Kunz e Oliveira (2009).



Fonte: Próprio autor, 2021.

Após a passagem pela coluna com o adsorvente, a amostra do gás é coletada em um recipiente e misturado por cerca de 2 minutos com uma solução saturada de NaOH, no qual é feita uma homogeneização. Ao promover o contato do CO_2 com a solução de soda cáustica, o gás carbônico reage com a solução de soda passando da fase gasosa para a fase líquida, e o volume de CO_2 presente na amostra é calculado a partir da diferença de volume de gás inicial e final. A Figura 13 apresenta a configuração de bancada para realização dos testes com este método. Apenas um operador realizou todos os testes, para minimizar as incertezas de leitura dos resultados.

Figura 13: Execução de testes físico-químicos.

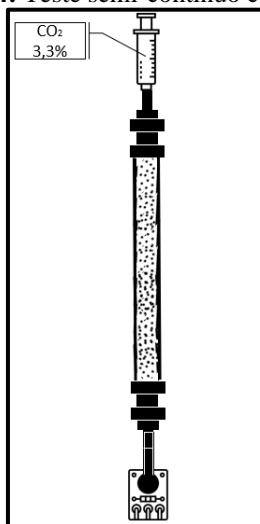


Fonte: Próprio autor, 2021.

De forma a reproduzir e validar os resultados obtidos pelo método físico-químico, a mesma configuração foi adotada, com um sensor eletroquímico na saída do sistema para avaliar em tempo real a concentração de saída da coluna. Os testes ocorreram da seguinte forma:

- Em uma seringa de 60 mL, uma mistura de ar + CO₂ à 3,3% foi injetada na coluna de leito fixo;
- Após cada injeção, o sensor ao final da coluna registrava a concentração de CO₂ que passava pela coluna;
- Caso o valor registrado apresente um resultado acima de 70% de adsorção, mais uma seringa seria injetada, seguindo assim sucessivamente;
- Ao atingir os 70% de adsorção, os testes encerravam;
- Foram realizados testes nesse modelo com todos os biocarvões e carvão ativado produzidos.

A Figura 14 apresenta a forma de execução dos testes semi-contínuos com o sensor ao final da coluna. Após a realização dos testes, os resultados foram comparados e os dois melhores adsorventes foram selecionados para os testes contínuos.

Figura 14: Teste semi-contínuo com sensor.

Fonte: Próprio autor, 2021.

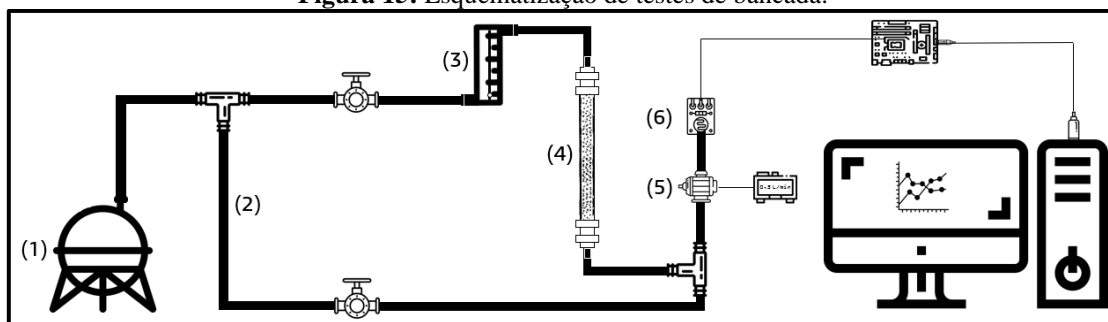
3.3.2 Testes contínuos

O sistema para realização de testes contínuos em bancada foi concebido através da experiência da equipe envolvida no processo com testes em bancadas utilizando sensores eletroquímicos. Vários testes foram realizados com diferentes montagens, para chegar na configuração final utilizada. Adotou-se o modelo de testes de coluna de leito fixo, por apresentarem ser mais econômicos, mais eficazes para tratamento com grandes volumes e ciclos de adsorção/dessorção (Nascimento *et al.*, 2020).

A Figura 15 mostra o desenho esquemático do sistema final para os testes em bancada. (1) representa o recipiente ao qual uma mistura de CO₂ a 3,8% foi realizada, de forma que o gás obtivesse concentração constante para avaliação da saturação da coluna de adsorção. Em (2) foi definido um sistema by-pass, de forma que o fluxo do gás antes de ser direcionado pela coluna de adsorção, pudesse ser medido diretamente no sensor. Após atingir a concentração constante, o fluxo então foi direcionado para a coluna de adsorção. Em (3) está posicionado um rotâmetro, para determinação da vazão de entrada do gás na coluna, de forma que pudesse haver um controle para uma vazão constante de 0,5 L/min. Foram testadas diferentes vazões até definir a vazão de trabalho. Em (4) tem-se a coluna de leito fixo preenchida com biocarvão, possuindo um diâmetro de 5/8". Na entrada e saída da coluna foram posicionadas lãs de vidro, material inerte, para evitar carreamento de partículas de carvão durante os experimentos e evitar a entrada de partículas indesejadas. Na base da coluna, em (5), uma minibomba de vácuo foi acoplada, para puxar o ar do recipiente de volume conhecido no modo inicial do by-pass, e

posteriormente o gás ao passar pela coluna em fluxo descendente. Ao final, o sensor GC-0018 foi posicionado (6), registrando os resultados instantaneamente.

Figura 15: Esquemática de testes de bancada.



Fonte: Próprio autor, 2021.

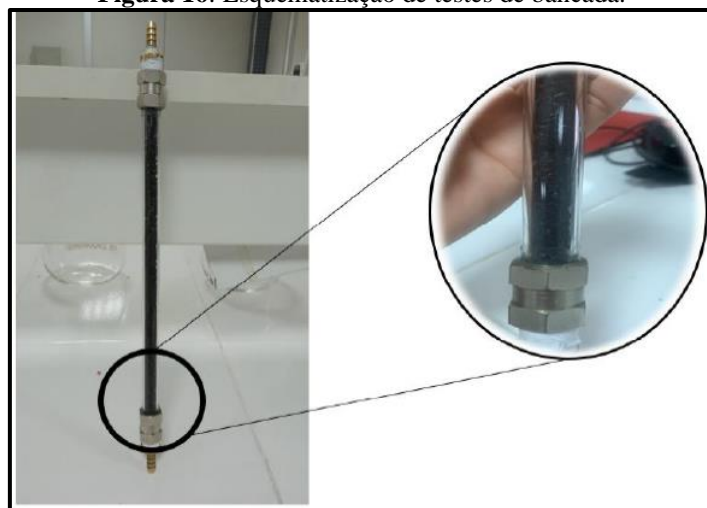
O sensor usa, por recomendação do fabricante, o software GasLab® 2.3.1.4 para configuração, calibração, registro de dados e análise de resultados em tempo real. Ele é capaz de processar até 20 medições por segundo, com uma precisão de $\pm 300 \text{ ppm} \pm 5\%$ da leitura, e uma resolução de 100 ppm. Ele foi conectado juntamente com uma placa arduino para ajuste da tensão elétrica (5V) no sistema.

Para a mistura do gás a concentrações de interesse, o recipiente com volume conhecido utilizado foi uma câmara de ar, com desempenho otimizado e possibilidade de mistura constante. Antes de estar apta para o seu uso, a câmara foi lavada para retirar qualquer impureza presente no seu interior e depois seca, eliminando qualquer umidade. Para garantir um volume conhecido, ela foi esvaziada com a bomba a vácuo, retirando todo ar presente. Após esse processo, a bomba foi acionada para encher a câmara, com rotâmetro, válvula para controlar a vazão de entrada e um cronômetro para determinar o tempo de enchimento. O ar, antes de entrar na câmara de ar, passou por uma coluna de sílica para diminuição da umidade. Foi determinada concentração específica de CO_2 no volume inserido de ar e à concentração de CO_2 desejada, para que fosse inserida na câmara. Para que não houvesse escape do gás presente na câmara em seu enchimento, uma válvula de antirrefluxo foi adicionada, de forma que a mistura gasosa apenas entrasse e não saísse da câmara, a menos com bombeamento específico.

O volume de CO_2 adicionado foi especificado por cálculo, para mimetizar os teores da referida planta industrial da área de mineração. Para avaliar a concentração calculada e a real na câmara de ar, o fluxo de gás sempre foi direcionado para o sensor antes de passar pela coluna com biocarvão.

O biocarvão foi seco em estufa a 150°C por 1 hora, para retirada de umidade e de possíveis moléculas de CO₂ adsorvidas do ar atmosférico. Ao sair da estufa, o material foi colocado para esfriar em um dessecador, sendo depois pesado e inserido na coluna de vidro. Os testes contínuos foram executados com dois tipos de carvão: biocarvão do mesocarpo e endocarpo do coco. A Figura 16 apresenta a coluna adotada nos experimentos, preenchida com o biocarvão granular.

Figura 16: Esquematização de testes de bancada.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Os parâmetros de entrada para o sistema de testes contínuos estão dispostos na Tabela 3. Apesar da temperatura de saída dos gases da chaminé ser 60°C, para os testes em laboratório a temperatura utilizada foi de 25°C, já que a adsorção física não é favorecida em temperaturas acima de 28°C, devido às forças intermoleculares de Van der Waals no processo da adsorção, que são quebradas com o aumento da temperatura (KELLER e STAUDT, 2005). Para aplicação industrial, na fase de prototipação, será efetuado o dimensionamento de um trocador de calor, para que a temperatura de entrada no sistema seja a ideal.

Tabela 3: Parâmetros utilizados nos testes contínuos.

Dados operacionais	
Temperatura	25°C
Umidade	20%
Vazão	0,5 L/min
Teor de dióxido de carbono	3,8%

Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.4 Tratamento dos dados

Para geração dos gráficos experimentais, foi realizado o tratamento dos dados obtidos nos testes semi-contínuos e contínuos, utilizando as equações apresentadas abaixo. Os gráficos foram gerados em planilhas do Excel. Os dados foram tratados após a execução de cada teste, contribuindo na tomada de decisões ao longo da pesquisa.

3.4.1 Dados testes semi-contínuos

Os gráficos gerados nos testes semi-contínuos com o método de Kunz e Oliveira (2019) e com o uso do sensor foram tratados de forma similar. Foi calculado o número de seringas de 60mL que foram aplicadas na coluna de adsorção. Dessa forma, uma seringa de 60mL, com 3,3% de CO₂, possui um volume de aproximadamente 2mL de CO₂. A quantidade de CO₂ adsorvida então foi calculada a partir da equação (9) abaixo, sendo Q a quantidade em mL de CO₂ adsorvido e N o número de seringas:

$$Q = N \times 2mL \quad (9)$$

3.4.2 Dados testes contínuos

O software GasLab® 2.3.1.4, ligado ao sensor que foi utilizado nos testes contínuos apresenta dados em tempo real, por segundo, em unidades de partes por milhão (ppm). Esses dados, entregues pelo programa no formato txt., foram inseridos no Excel. Adotou-se como concentração inicial do CO₂ (C₀) a concentração medida pelo software no momento que o fluxo do gás passou pelo by-pass direto para o sensor, sem passar pela coluna de adsorção. Essa concentração apresenta um dado constante até ser direcionada para a coluna de adsorção.

A construção dos gráficos apresentados nos resultados foi realizada utilizando os dados de concentração (C) variável com o tempo a partir do momento em que o gás passou pela coluna de adsorção, calculando assim a eficiência de adsorção do processo. Dessa forma, foi utilizada para determinação do percentual de adsorção de CO₂ a equação (10):

$$E (\%) = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \times 100 \quad (10)$$

Sendo, E (%) a eficiência de adsorção de CO₂, C₀ a concentração inicial, a qual apresenta valor constante ao longo do tempo e C a concentração de CO₂ após passar pela coluna de adsorção, variável ao longo do tempo.

No momento em que $C=Co$, temos que a coluna atingiu a sua saturação completa, não sendo possível capturar nenhuma molécula de CO_2 passando pela corrente gasosa. Os testes de adsorção encerram quando a saturação acontece, para que haja então a regeneração da coluna. O biocarvão foi pesado antes e após o processo de adsorção, para cálculo gravimétrico.

3.5 Caracterizações

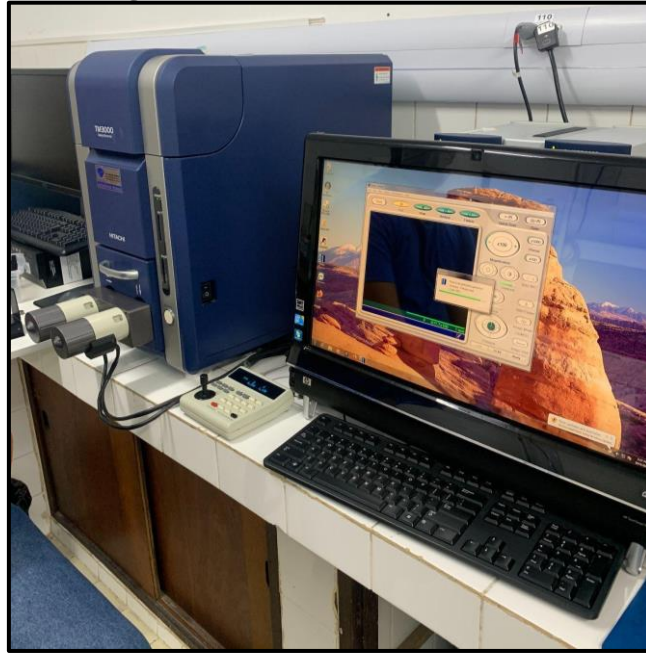
As caracterizações do material adsorvente foram realizadas na Universidade Federal de Sergipe, com apoio do Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM) da Universidade Federal de Sergipe. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica utilizada para análise da morfologia do material. Foram selecionadas amostras do pó do coco antes de sua carbonização, do biocarvão em pó selecionado, e biocarvão granular. Para a determinação das morfologias, primeiro foi realizada a metalização das amostras com prata, a fim de melhorar a resolução no equipamento. Para isso, foi utilizado um metalizador Kurt J. Lesker modelo 108, como mostra a Figura 17. Após a metalização, as amostras foram encaminhadas para o microscópio eletrônico da marca EXPRESS, do modelo Asper, conforme Figura 18. As imagens foram obtidas sob vácuo, tendo aceleração de feixes de elétrons de 15 kV.

Figura 17: Metalizador Kurt J. Lesker modelo 108.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Figura 18: Amostras em análise no MEV.



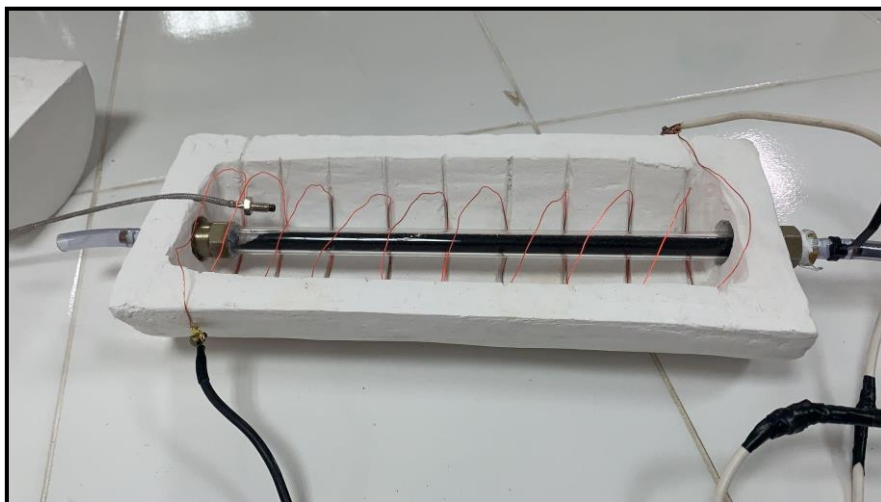
Fonte: Próprio autor, 2021.

3.6 Dessorção

Adotou-se o processo de dessorção pelo aumento da temperatura, conhecido como TSA, onde foi construído um sistema para simular uma estufa in loco. Para sua construção, utilizou-se argamassa adiabática em gesso, sendo a estufa modelada de acordo com as características necessárias para encaixar os equipamentos do sistema, conforme Figura 19. O sistema foi composto por:

- Resistências térmicas para aumento da temperatura do sistema;
- Termopar para medição da temperatura;
- Potenciômetro com dimmer;
- Controlador de temperatura.

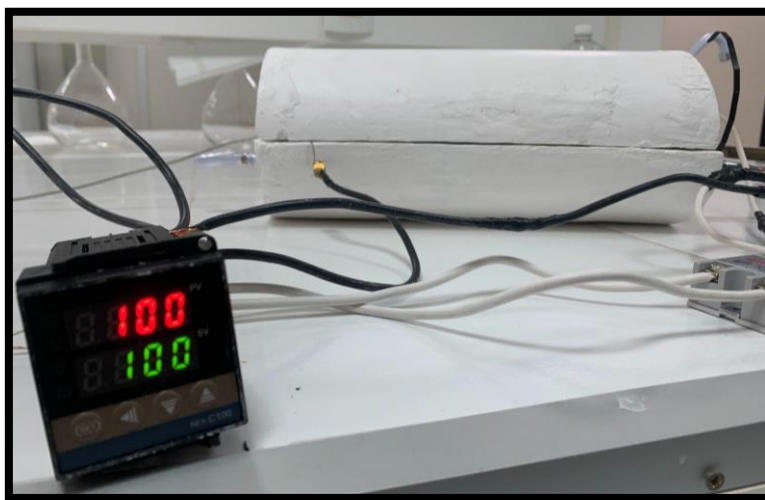
Figura 19: Sistema de aquecimento.



Fonte: Próprio autor, 2021.

A Figura 20 mostra o sistema completo, onde o visor do controlador de temperatura apresenta a temperatura desejada em verde e a temperatura real dentro do sistema em vermelho. As resistências são conectadas com o potenciômetro e dimmer, e o controlador de temperatura, o que permite o ajuste até a temperatura desejada.

Figura 20: Sistema de aquecimento completo.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Os testes de dessorção foram então executados nas temperaturas de 100°C, 125°C e 150°C de forma a avaliar a eficiência energética, dada em termos da temperatura, para a reversão, por dessorção, de processo (ARAÚJO, 2018). Para realização dos testes, a coluna de carvão granular saturada foi inserida dentro do sistema, até atingir a temperatura selecionada. O sensor foi conectado juntamente com a bomba a vácuo, para que o CO₂ durante a dessorção fosse puxado para fora da coluna, e não permanecesse

internamente, saindo lentamente e possivelmente evitando que fosse adsorvido novamente quando a temperatura diminuísse.

3.7 Simulação do modelo industrial

Para simulação, via modelagem computacional, empregou-se um software multifísica *ANSYS FLUENT®*. Foi determinado o modelo que seria correspondente ao sistema em escala real, com parâmetros calculados na Tabela 4, de acordo com a necessidade de aplicação na planta industrial em foco da pesquisa. A simulação permitiu determinar o tempo de saturação do sistema em uma planta industrial que possui em suas emissões gasosas um CO_2 à 3,80% e dimensionar os cilindros de adsorção em escala industrial. Os dados de vazão foram fornecidos pela indústria estudada no projeto.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para simulação.

Parâmetros		Fonte
Densidade aparente do biocarvão (g/cm^3)	0,62	Autor
Vazão de saída da indústria (Nm^3/h)	187.095,00	Indústria
% de CO_2	3,80	Indústria
Diâmetro externo total (m)	1,80	Autor
Diâmetro do leito interno (m)	0,28	Autor
Quantidade de cilindros	2	Autor
Quantidade de leitos	19	Autor
Capacidade adsortiva (g de CO_2 /g de Carvão)	0,10	Autor
1 mol de CO_2 (g de CO_2)	44	Russell (1994)
Volume molar (L/mol)	25	Russell (1994)
Volume de CO_2 por ciclo (m^3)	561,3	Autor
Capacidade adsortiva ($\text{L de CO}_2/\text{g de Carvão}$)	0,06	Autor
Toneladas de carvão (ton)	9,88	Autor
Volume de carvão por Cilindro (m^3)	3,03	Autor
Altura do cilindro (m)	2,68	Autor

Fonte: Próprio autor, 2021.

Na etapa de pré-processamento, foi realizada a discretização do processo de adsorção com biocarvão do coco, onde a abordagem do acoplamento das equações de

balanço de massa, conservação de momentum e conservação de energia por meio da pressão e velocidade, SIMPLE, foi utilizado. A geometria foi desenvolvida tendo como base o modelo físico já construído, sendo de forma cilíndrica. Para criação de malha estruturada composta por elementos quadriláteros, dividiu-se o cilindro, resultando em números de nós e elementos.

Na etapa de processamento, foi realizada a simulação em regime transiente com resíduos, definidos como $10E^{-4}$, ou seja, da ordem de 0,0001 através da análise *Computational Fluid Dynamic* (CFD) no *software* comercial de modelagem e simulação computacional ANSYS®. O modelo foi simulado em um computador desktop com processador AMD Ryzen® 3 2200g, com velocidade de 3.5 GHz e 4 núcleos físicos, placa gráfica AMD Radeon® Vega 8, sistema 64-bits, 16 GB de memória RAM e disco rígido de 250 GB e sistema operacional Windows® 10.

As seguintes condições de contorno foram consideradas na aplicação das equações no software de modelagem:

a) Condição de não deslizamento na superfície da parede: o fluido próximo à parede do cilindro assume a velocidade da mesma, desta forma a velocidade do fluido tende a ser nula junto a parede;

b) As paredes em contato (adsorvente e coluna de vidro) foram consideradas isotérmicas. Assim, apenas o domínio do adsorvente foi simulado neste estudo e qualquer variação de temperatura ao longo do adsorvente e das paredes do tubo foi desprezada;

c) O modelo de Darcy-Forchheimer, equação (8), para fluxo através de meios porosos foi adotado e o leito de adsorção é considerado isotrópico:

$$i = a.v + bv^2 \quad (8),$$

Onde, i = gradiente hidráulico, a = parâmetro de Darcy, b = parâmetro Não-Darciniano, v = velocidade volumétrica.

d) O modelo de equilíbrio térmico para o meio poroso foi adotado, i.e, a mistura e o adsorvente (biocarvão) foram assumidos como estando à mesma temperatura;

e) As propriedades térmicas e físicas como a porosidade do meio, condutividade térmica, densidade e calor específico são considerados constantes ao longo do processo de adsorção;

f) Na saída foi empregada a condição de pressão equivalente à pressão atmosférica, e o regime de fluxo também foi definido como subsônico;

No pós-processamento foram avaliados os resultados obtidos, como tamanho do equipamento em escala industrial, tempo de saturação da coluna de adsorção em tamanho

real e quantidade necessárias de cilindros para atender a chaminé industrial de estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da pesquisa experimental, com a realização de testes laboratoriais e simulação computacional estão apresentados nos tópicos a seguir.

4.1 Densidade Aparente

Os ensaios de densidade aparente dos dois carvões forneceram as magnitudes que estão descritos na Tabela 4. Estes testes foram realizados em triplicata, sendo adotada uma média aritmética do valor final e calculado o desvio padrão. A densidade aparente do biocarvão granular é consideravelmente maior do que a do biocarvão em pó. Isso é visivelmente notado no preenchimento da coluna de adsorção, em que a massa do granular para seu preenchimento total é cerca de três vezes maior do que a do biocarvão em pó. O desvio padrão apresentou resultado uniforme dos testes, apresentando um valor próximo de zero.

Tabela 5: Dados da densidade do carvão ativado em pó e granular.

Biocarvão em pó (600°)	Biocarvão granular (700°)
$\rho_{a1} = 0,20 \text{ g/cm}^3$	$\rho_{a1} = 0,66 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{a2} = 0,21 \text{ g/cm}^3$	$\rho_{a2} = 0,62 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{a3} = 0,21 \text{ g/cm}^3$	$\rho_{a3} = 0,59 \text{ g/cm}^3$
Média - $\rho_a = 0,20 \text{ g/cm}^3$	Média - $\rho_a = 0,62 \text{ g/cm}^3$
$D_p = 0,005$	$D_p = 0,026$

Fonte: Próprio autor, 2021.

Mesmo possuindo uma densidade aparente maior do que o BCP, o BCG, por possuir material com diferentes granulometrias, possui maior quantidade de espaços vazios entre as suas estruturas, diminuindo a densidade de empacotamento do leito de coluna fixa. Isso favorece a difusão do gás, com maior movimentação em diferentes direções entre as moléculas gasosas, em função também da superfície irregular, o que aumenta seu potencial de difusão para os poros, que é onde ocorre o princípio da transferência de massa e adsorção (KELLER e STAUDT, 2005).

4.2 Testes de adsorção

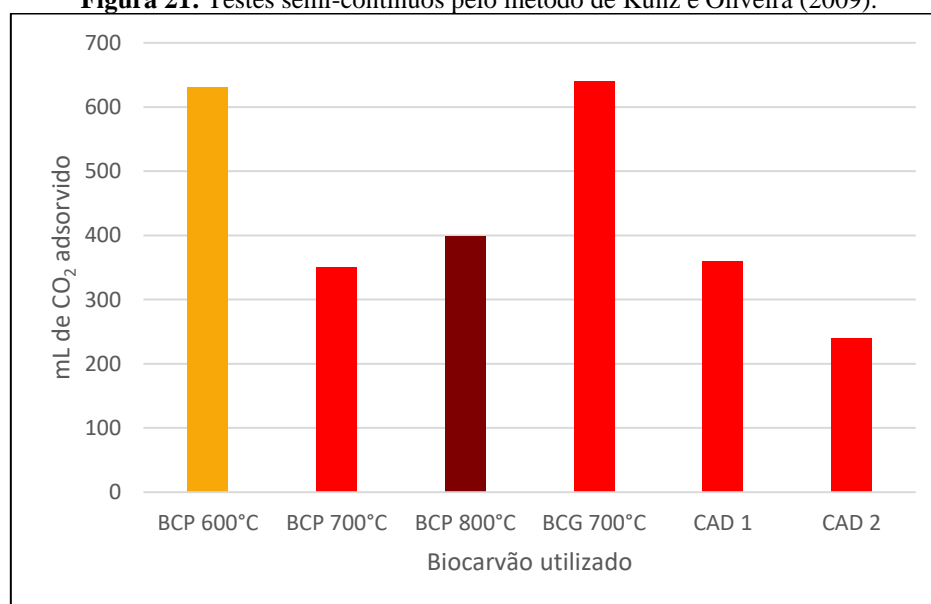
4.2.1 Testes semi-contínuos

A Figura 21 apresenta os resultados dos testes realizados pelo método de Kunz e Oliveira (2009). O biocarvão granular apresentou melhores resultados preliminares de

adsorção de CO₂. Já quanto ao biocarvão em pó o que apresentou melhores resultados foi o fabricado na temperatura de 600°C. As cores do gráfico estão relacionadas a temperatura utilizada para carbonização do material, sendo amarelo referente a 600°C, vermelho 700°C e a cor vinho relacionado a temperatura de 800°C.

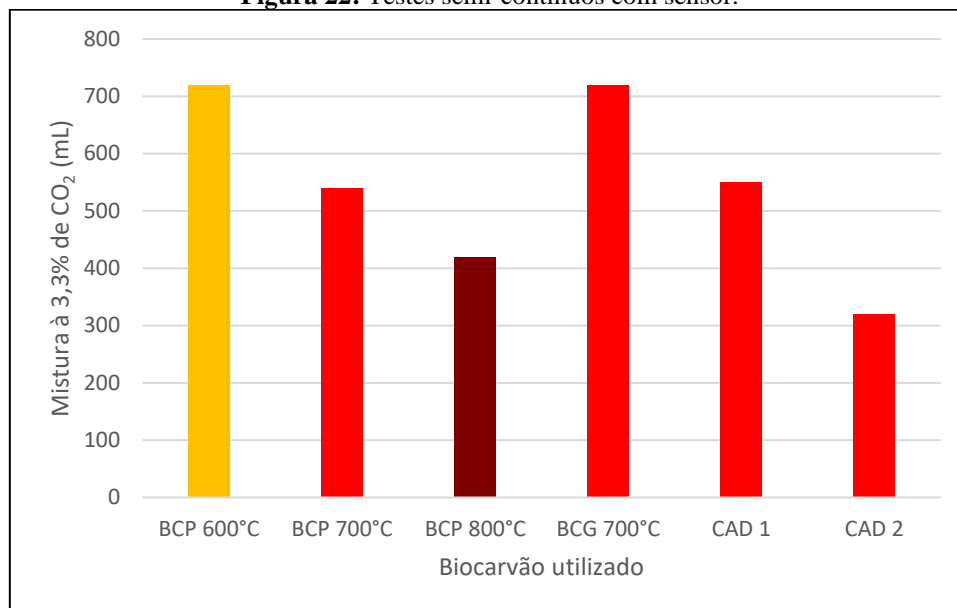
O resultado encontrado para o BCP foi similar com o de Schena (2019) em sua tese de doutorado, que apresentou resultados otimizados da produção do biocarvão e bio-óleo do mesocarpo do coco em diferentes temperaturas, apresentando ser a ideal de 600°C. Silveira (2018) também identificou melhores propriedades na produção do BCP em temperatura acima de 500°C, avaliando o ganho energético na sua produção. Os carvões ativados quimicamente (CAD1 e CAD 2) apresentaram as menores capacidades de adsorção de CO₂ quando comparado com os outros materiais, tendo um resultado de 240 mL de CO₂ adsorvido para o CAD 1 e 360 mL para o CAD 2.

Figura 21: Testes semi-contínuos pelo método de Kunz e Oliveira (2009).



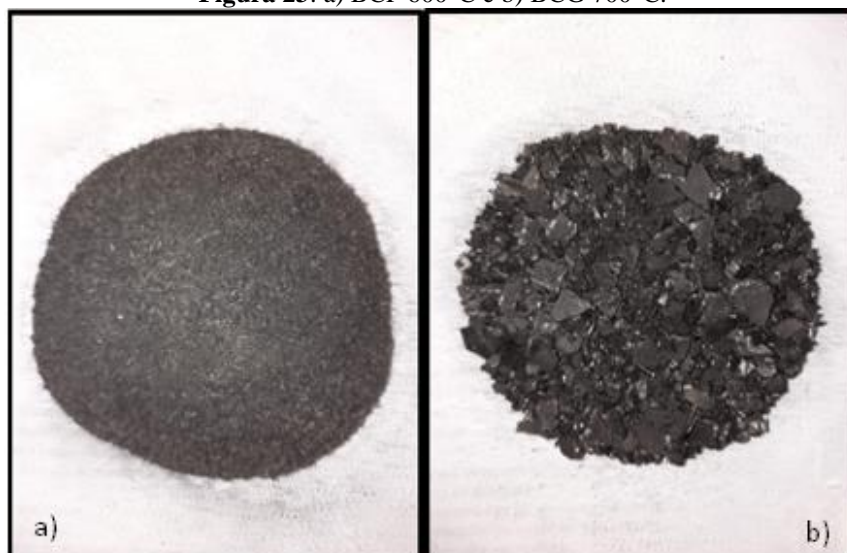
Fonte: Próprio autor, 2022.

É possível observar os resultados dos testes semi-contínuos conduzidos com sensores na Figura 22. O resultado é similar com o obtido pelos testes semi-contínuos, onde há divergência apenas entre o BCP 700°C e o BCP 800°C. Essa divergência pode ser atribuída a precisão do processo experimental, onde os sensores eletroquímicos apresentam menor incerteza de medição.

Figura 22: Testes semi-contínuos com sensor.

Fonte: Próprio autor, 2022.

Tendo em vista um melhor resultado nos testes semi-contínuos do BCP 600°C e do BCG 700°C, eles foram selecionados para etapa de testes contínuos. A Figura 23 apresenta os aspectos visuais destes BCP e BCG, sendo que ambos apresentaram potencial similar para adsorção do CO₂.

Figura 23: a) BCP 600°C e b) BCG 700°C.

Fonte: Próprio autor, 2021.

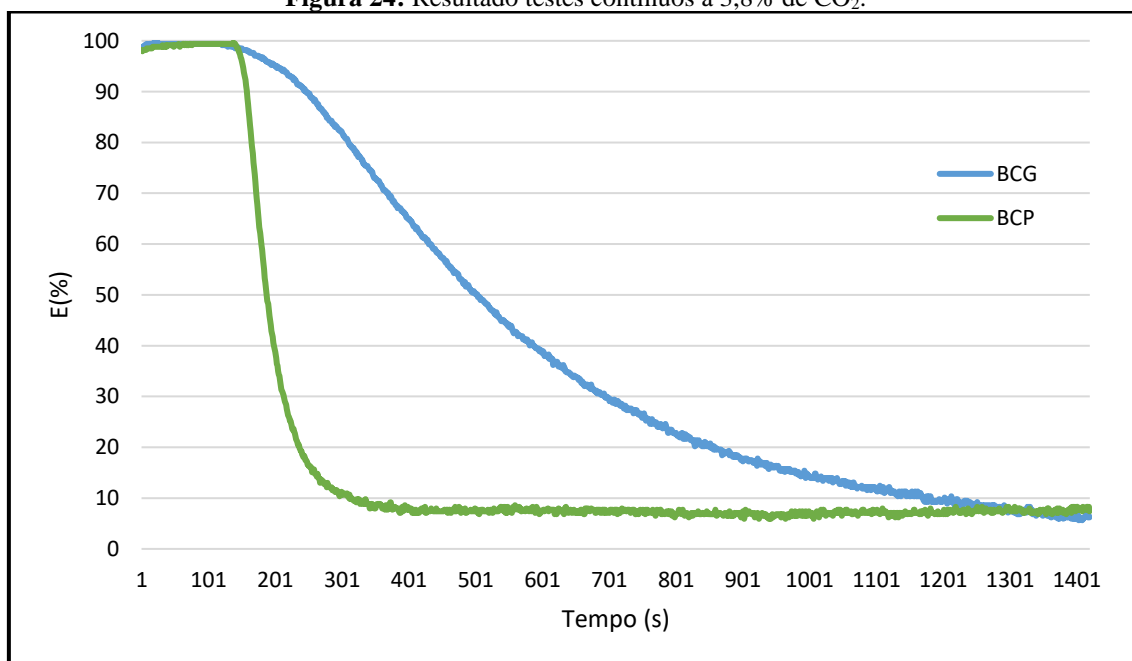
Percebe-se visualmente, o que também foi comprovado nas análises físico-químicas, apresentadas no item 4.2.3 a seguir, o menor empacotamento volumétrico do BCG em relação ao BCP, e a maior densidade volumétrica de poros do BCG em relação ao BCP.

4.2.2 Testes contínuos

Os resultados dos testes contínuos são apresentados no gráfico da Figura 24. Os dois experimentos contaram com a coluna cheia de carvão, em que as massas que foram necessárias para o enchimento total das colunas de teste estão dispostas na Tabela 6. O BCP possui um decaimento muito rápido do processo de adsorção, perdendo sua eficiência de remoção de forma abrupta, tendo a saturação da coluna em 5 minutos. Já o BCG apresenta performance de adsorção superior a 90% nos primeiros 5 minutos de atividade, apresentando um patamar de adsorção ótima bem definido, e possui um decaimento mais suave ao longo do tempo, mantendo a capacidade adsorviva ao longo de 900 segundos.

O BCG apresenta uma zona de transferência de massa bem definida ao longo da coluna de carvão, em que a saturação completa do adsorvente acontece em cerca de 20 minutos de testes contínuos. Como mostra a Tabela 5, através da diferença de massa antes e após o processo de adsorção, a massa adsorvida de CO_2 no BCG foi superior, de 0,33g, enquanto o BCP foi de 0,15g.

Figura 24: Resultado testes contínuos à 3,8% de CO_2 .



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tabela 6: Gravimetria com diferentes carvões.

Carvão utilizado	Concentração de CO₂	Massa antes do processo (g)	Massa depois do processo (g)	Massa de CO₂ adsorvida (g)
BCP	38700 ppm	6,64	6,79	0,15
BCG	38800 ppm	18,68	19,01	0,33

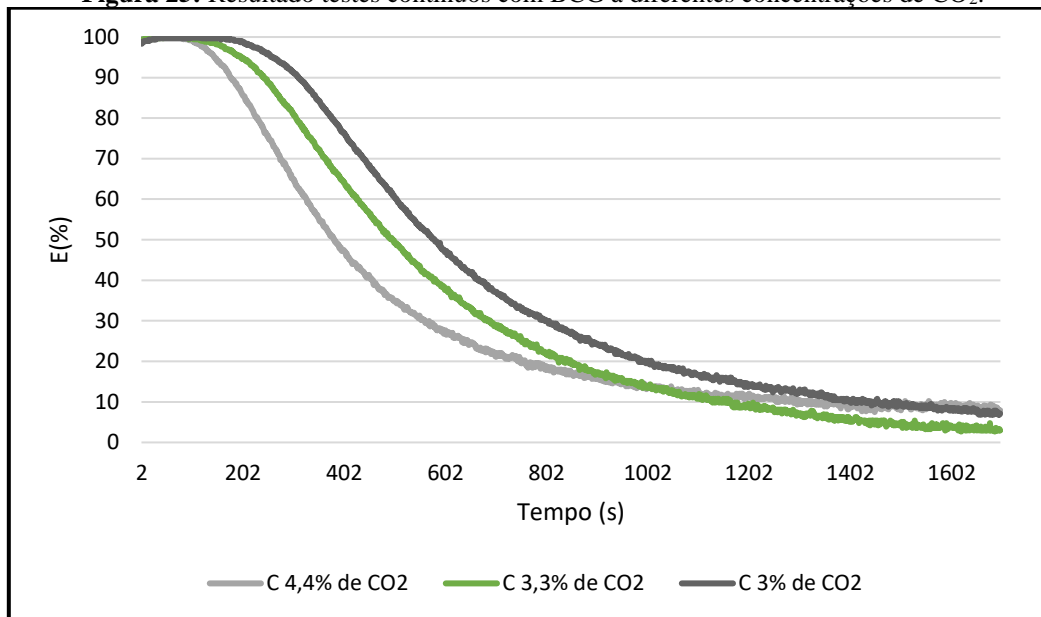
Fonte: Próprio autor, 2021.

Os resultados de desempenho do BCG são similares ao encontrando por Nascimento (2018), em que a autora compara o carvão granular e em pó advindo do coco verde para adsorção de CO₂. A autora afirma que, em mesmas condições operacionais, as capacidades adsorptivas dos carvões em pó e granular não podem ser as mesmas, já que os sítios ativos formados são distintos, mesmo advindos do mesmo precursor.

Além dos resultados inferiores nos testes contínuos, o uso do biocarvão em pó não se mostrou o mais adequado para utilização com adsorção de correntes gasosas devido à alta perda de carga associada ao processo, devido ao seu alto coeficiente de empacotamento. Nas diversas configurações testadas para os experimentos, o carvão em pó demonstrou não se adequar facilmente. As configurações variaram com a presença ou não de válvulas no sistema e a posição da bomba e do sensor nos testes.

De acordo com Teixeira (2014), o carvão granular em colunas de leito fixo permite que o sistema atinja maiores capacidades de adsorção, tendo-se um maior aproveitamento do carvão ativado e proporcionando um sistema com maior controle operacional. Segundo Nascimento *et al.* (2020), o carvão na forma granular é o mais adequado para adsorver soluto em fase gasosa. Araújo (2018) também constatou um alto potencial de adsorção do CO₂ a partir do carvão ativado granular do endocarpo do coco.

Sendo o biocarvão granular do endocarpo selecionado com o de maior potencial, também foram realizados testes com este material com diferentes concentrações de CO₂, como mostra a Figura 25. O objetivo de realizar esses testes foi para verificar experimentalmente se haveria mudanças no comportamento da curva de adsorção ao aumentar-se a concentração. Como a indústria do estudo possui uma média da concentração de CO₂ em seu processo contínuo, este pode sofrer aumento e diminuição da concentração de acordo com o tempo, podendo atingir valores de 4,4%, como também valores de 3%. Por este motivo, realizou-se testes com essa faixa de variação. Os resultados são proporcionais, em que o perfil de adsorção se mantém, reduzindo o tempo de saturação com aumento de concentração de CO₂ na corrente gasosa.

Figura 25: Resultado testes contínuos com BCG à diferentes concentrações de CO₂.

Fonte: Próprio autor, 2021.

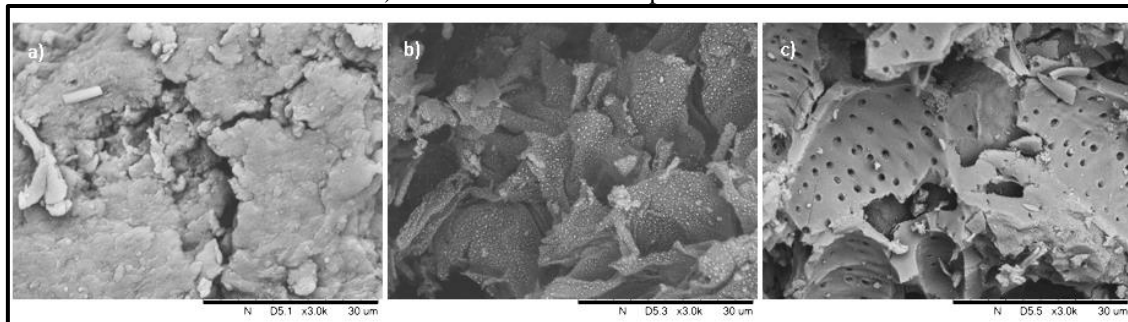
4.3 Caracterização MEV

Na Figura 26 estão os resultados referente ao MEV para o pó do coco *in natura*, BCP 600°C e BCG 700°C, respectivamente. As imagens do MEV estão em modo de aproximação de 3.000 vezes. É possível observar que o pó do coco antes de ir para o processo de carbonização possui uma estrutura homogênea, com partículas maiores e ausência de porosidade, Figura 26 (a). A imagem relacionada ao biocarvão em pó possui estruturas menores, com pontos brancos na sua superfície, Figura 26 (b), o que pode indicar quantitativo de cinzas nas amostras como também outros grupos funcionais. Já o biocarvão granular, do endocarpo do coco possui visivelmente uma estrutura porosa em sua superfície, Figura 26 (c), diferenciando do biocarvão em pó, em que os poros não são visíveis. Os resultados do MEV validam os melhores resultados do BCG nos testes de adsorção, mostrando a alta porosidade do material; poros, nos quais ocorrem os processos de adsorção.

Na Figura 27 a) é possível observar o MEV realizado por Lima (2013) para o mesocarpo do coco *in natura*. A estrutura é homogênea, similar ao MEV encontrado no pó do coco, em que a aproximação utilizada no microscópio foi de 330x. É possível que com uma aproximação maior do microscópio, o perfil se assemelhe ao encontrado na Figura 26 a). O MEV do BCP realizado por Alves *et al.* (2015) na Figura 27 (b), apresenta também pontos de coloração diferente, similar ao encontrado na Figura 26 b). O autor afirma que esses pontos podem significar presença de cinzas, que quando aplicado a

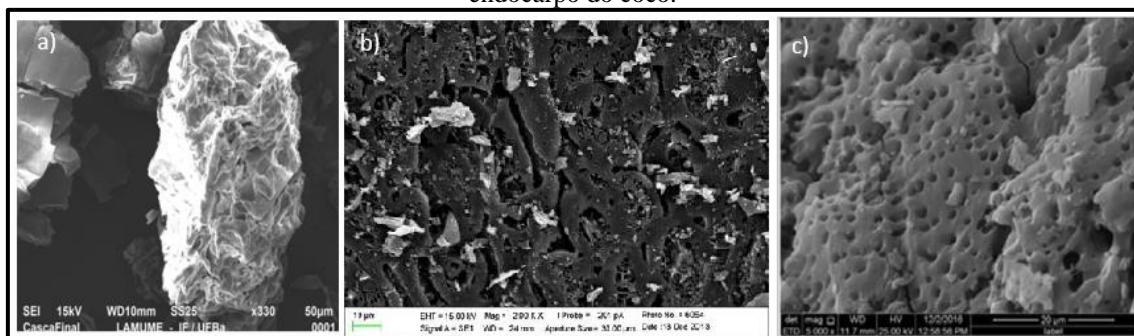
processos de fertilização de solo, podem fornecer bons nutrientes. O resultado do MEV do BCG apresentado na Fig. 26 (c) possui uma característica visual muito similar ao apresentado por Moraes *et al.* (2019), que produziu o carvão ativado do endocarpo do coco a 800°C, com processo de ativação física. É possível observar claramente na Figura 27 (c) os poros formados na superfície, onde a visualização é possível com aproximação do microscópio em 5.000x.

Figura 26: Resultados do MEV, em que em a) tem-se pó do coco; b) o biocarvão do mesocarpo do coco a 600°C e c) o biocarvão do endocarpo do coco a 700°C.



Fonte: Próprio autor, 2021.

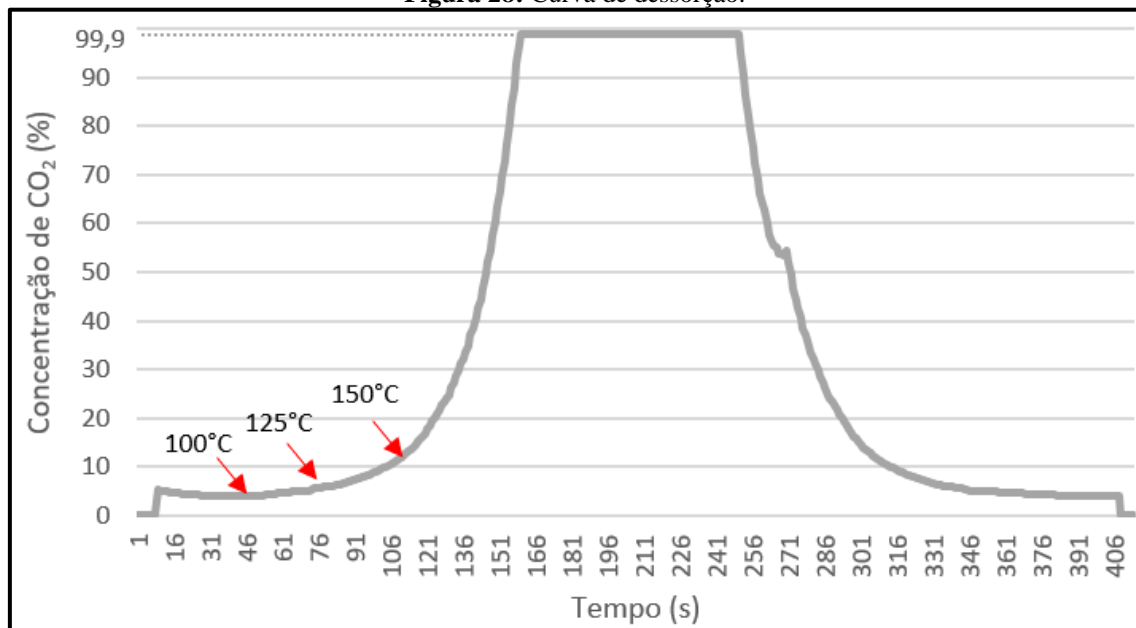
Figura 27: MEV do a) coco *in natura*, b) carvão ativado do mesocarpo do coco e c) carvão ativado do endocarpo do coco.



Fonte: a) Lima, 2013, b) Alves *et al.*, 2015 e c) Moraes *et al.*, 2019.

4.4 Dessorção

O processo de dessorção do CO₂ foi bem-sucedido a partir dos experimentos realizados. Através da medição do sensor, a pureza de saída do gás registrada foi de 99,9%. O gráfico abaixo, na Figura 28, apresenta o resultado dos testes de dessorção. É possível observar que, o crescimento do gráfico na faixa de temperatura de 125°C (76 segundos do gráfico) e anteriormente em 100°C ocorre de forma mais lenta; e, a partir da temperatura de 150° (110 segundos do gráfico) o processo de dessorção apresenta um alto crescimento das taxas de CO₂, atingindo rapidamente o patamar de 99% de recuperação.

Figura 28: Curva de dessorção.

Fonte: Próprio autor, 2022.

O processo de dessorção ocorreu de forma mais rápida que a adsorção, com a liberação gradual de CO_2 , até atingir um percentual de 99,9% ao atingir a temperatura de 150°C, sendo indicada como temperatura ótima nesse processo. Esse resultado indica um bom potencial do biocarvão para ciclos de adsorção/dessorção, onde os ciclos operacionais completos atingem um tempo de cerca de 10 minutos, sendo 5 minutos de adsorção à 90% e 5 minutos para completar o processo de dessorção.

Araújo (2018) testou também a temperatura de 180°C no seu processo de dessorção. Essa temperatura não foi testada em laboratório, devido aos resultados de rápida dessorção na temperatura de 150°C. Foi avaliado tecnicamente pela equipe da pesquisa que aumentar para 180°C, realizando testes sucessivos, poderia diminuir a vida útil do adsorvente futuramente, como também demanda de mais energia, o que, quando aplicado a escalas industriais pode indicar um alto consumo energético.

O gráfico apresenta um leve pico em 271 segundos, no processo de decaimento da dessorção, que pode ser resultado de alguma perturbação no sistema de bancada no momento da realização do teste. O sensor pode apresentar algumas variações caso haja uma movimentação no cabeamento que o conecta ao computador.

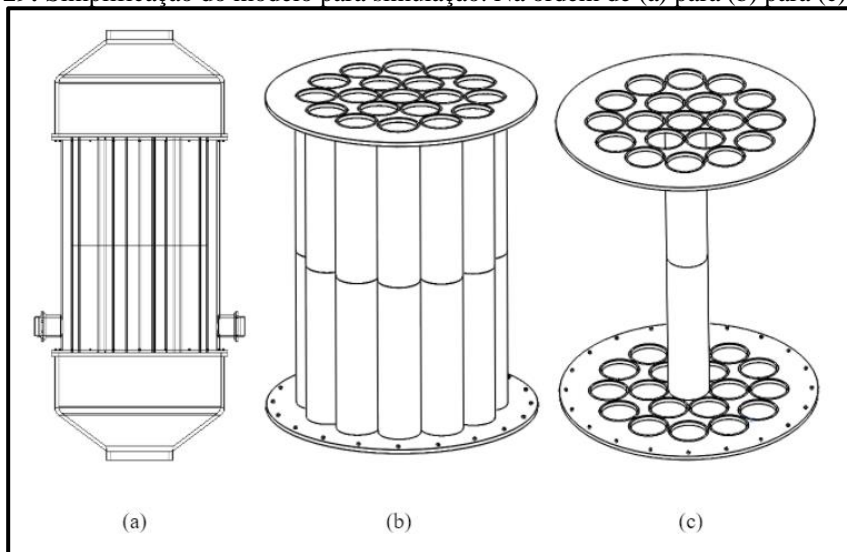
É importante destacar que os testes em laboratório foram executados dentro de um período de 4 meses, tendo operações diárias com os biocarvões ativados, onde eles não perderam a sua capacidade adsorvida. Esse resultado indica um bom potencial de vida útil do material, que não diminuiu sua capacidade de captura de CO_2 .

4.5 Simulação do sistema em escala industrial

O resultado da simulação obteve como um modelo industrial um sistema como mostrado na Figura 29. É possível observar que o modelo completo da unidade de adsorção, projetada para uso industrial (a) possui um “cartucho” com 19 cilindros preenchidos por material adsorvente, como mostrado em (b). Esses tubos são idênticos e sujeitos às mesmas condições de atuação. Logo, para fins de simplificação e análise, foi-se isolado apenas um cilindro (c) para análise.

Esse modelo de cartuchos foi adotado devido a possibilidade de aplicação de um fluido de aquecimento e resfriamento no interior do sistema, prevendo aplicação do modelo de dessorção por aumento de temperatura, TSA. Dessa forma, o fluido pode permear igualmente entre os cilindros, obtendo um perfil de aquecimento distribuído igualmente. Assim como no modelo de bancada, por se tratar de uma geometria simétrica, pode-se considerar apenas uma fatia bidimensional dessa coluna do leito, para desenvolvimento da simulação computacional das colunas dessa unidade de captura de CO₂.

Figura 29: Simplificação do modelo para simulação. Na ordem de (a) para (b) para (c).

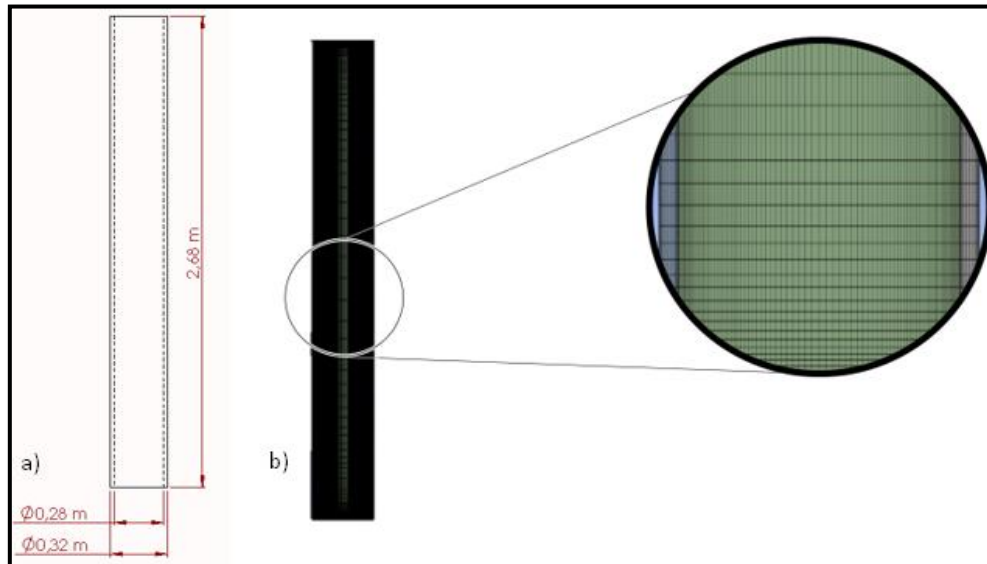


Fonte: Próprio autor, 2022.

Para fins de simulação da operação real dessa coluna preenchida pelo BCG, foi desenvolvido seu modelo computacional, na forma de uma fatia bidimensional, considerando seu diâmetro correspondendo no eixo horizontal e sua altura em alinhamento ao eixo vertical. Os elementos discretos são quadrangulares, com refinamento de malha nas bordas laterais da coluna, ou seja, na fronteira vertical do modelo computacional. A discretização da coluna, na malha de elementos finitos, resulta

em 330.240 elementos, com 336.329 nós. É possível observar a malha e o refinamento do modelo de malha refinado nas bordas na Figura 30, adotado para otimização dos resultados.

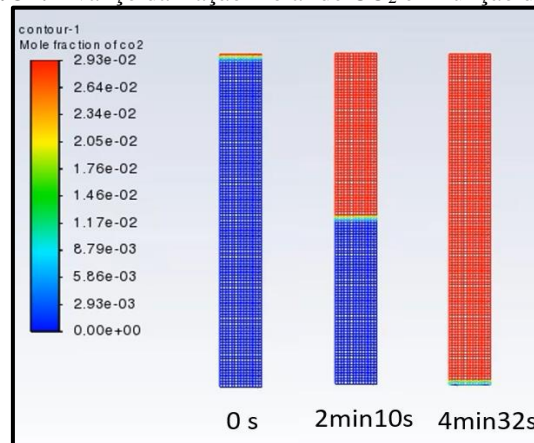
Figura 30: Domínio (a) e detalhe da malha utilizada (b).



Fonte: Próprio autor, 2021.

O resultado do processo de adsorção simulado em escala real é indicado na Figura 31, apresentando um tempo de ciclo completo de 4:32 min. O tempo é menor do que o encontrado no laboratório, devido a escala da vazão industrial ser muito maior do que a utilizada. Para aumentar a duração dos ciclos, foi previsto a adição de de duas unidades de adsorção, ambas na forma dos cartuchos de feixes de 19 colunas de captura do CO_2 , atuando em série, otimizando o processo e aumentando o tempo de ciclo total, passando a ser de 9:04min no modelo industrial dimensionado.

Figura 31: Avanço da fração molar de CO_2 em função do tempo.



Fonte: Próprio autor, 2022.

A Figura 32 é resultado da simulação do equipamento industrial de adsorção de CO_2 , que está projetado para implantação nos secadores da indústria de mineração. O funcionamento do sistema se dá pela entrada do gás em 1, remoção de material particulado nos aero ciclones em 2, e adsorção nos cilindros em série em 3. Quando o cilindro 3 atinge sua capacidade e satura, há uma mudança de válvulas e todo o fluxo é direcionado para os cilindros em 4. Acontece então o processo de dessorção em 3 e o gás é direcionado para a bala de armazenamento E, implementado para conter o CO_2 por compressão 6, de forma que viabilize a sua aplicação posterior em outros processos, realizando seu sequestro *a posteriori*. Ocorrem então ciclos de adsorção e dessorção, com funcionamento em paralelo dos cilindros C e D.

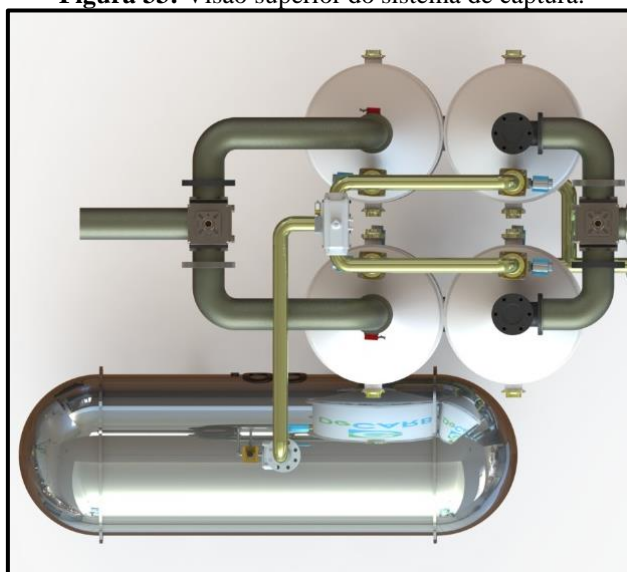
Figura 32: Sistema em escala industrial.



Fonte: Próprio autor, 2022.

O aero ciclone é uma etapa customizável, de forma que, indústrias que já possuam um tipo de filtro instalado, ou que não possuam material particulado em suas emissões, não necessitará dessa etapa. A Figura 33 apresenta uma visão superior do equipamento, sem os aero ciclones, com dimensões de 6,5 metros de comprimento, 4 metros de largura e tendo 8 metros de altura. Essas dimensões são compactas para instalação em linha de processos industriais, especialmente quando comparadas com tecnologias existentes.

Figura 33: Visão superior do sistema de captura.



Fonte: Próprio autor, 2022.

5. CONCLUSÕES

O estudo realizado orientou a escolha do melhor biocarvão para captura do CO₂, em alinhamento com resultados anteriores da literatura, aperfeiçoando-os, além de permitir a análise da sua aplicação em plantas industriais. Foram realizados testes semi-contínuos para definição dos dois melhores adsorventes, que foram selecionados para etapa de testes contínuos, simulando um processo industrial.

O BCP e o BCG foram utilizados nos testes contínuos, sendo possível comparar o desempenho em um fluxo contendo CO₂. O BCG obteve um maior desempenho de adsorção, possuindo um decaimento linear até sua saturação, de 20 minutos, enquanto o BCP saturou abruptamente em cerca de 6 minutos. Apesar de existirem muitos estudos que utilizam o biocarvão em pó do mesocarpo do coco para adsorção de contaminantes, sua aplicação ficou mais evidenciada para efluentes líquidos do que gasosos, onde autores como Moraes *et al.* (2019), Santos (2017) e Teixeira (2020) utilizaram esse material para adsorção de poluentes presentes na água, obtendo êxito em seus experimentos.

O uso do biocarvão granular do endocarpo do coco converge com estudos anteriormente realizados para captura de poluentes gasosos, especialmente o CO₂, que foi evidenciado por Araújo (2018). Diferente de Araújo (2018), o biocarvão obteve melhores resultados sem sofrer processo de degradação química com o ácido fosfórico. Porém, o autor não realizou experimentos sem ativação química. Essa diferença de desempenho pode ser resultado dos sítios ativos que são formados pós degradação química. Esses sítios podem não possuir uma alta atratividade com a molécula do CO₂, o que influencia na capacidade adsortiva.

Os testes executados levaram em conta dados de uma planta real do setor de mineração, para uma chaminé de secador, o que aproxima os dados de simulação da realidade. Foi possível estimar o tempo de saturação das colunas de adsorção em escala industrial, ficando evidenciado a necessidade de dois pares de feixes de múltiplas colunas internas de adsorção para aumentar o tempo entre ciclos de adsorção/dessorção. O tamanho do equipamento influencia na disponibilidade de espaço para sua instalação nas plantas industriais, sendo o modelo obtido considerado compacto, em relação especialmente a soluções existentes hoje no mercado para alternativas de captura de CO₂.

5.1 Etapas futuras

O projeto desenvolvido possui um potencial de aplicação em escala, em que etapas de prototipação visando otimizações e ajustes do sistema, para que fique

operacional e atinja-se modelo de comercialização. A indústria parceira do projeto já realizou a contratação do protótipo, que contará com o apoio de um centro especializado em biomassa do SENAI, o ISI Biomassa, e teve seu início em janeiro de 2023, com previsão para término em outubro de 2024. Essa alternativa como equipamento de captura direta do CO₂ é promissora, sendo uma captura preventiva e essencial para que se atinjam as metas de diminuição de emissões, freando assim os impactos negativos do aquecimento global.

Para trabalhos futuros, tem-se como sugestão adotar o sistema de adsorção por modulação de pressão, conhecido como PSA. É possível que o BCP e o BCG aumentem seu potencial de adsorção ao aplicar-se uma pressão no sistema. Além disso, de forma a aumentar o desempenho de adsorção, recomenda-se testar modos de ativação física, com o uso de vapor d'água ou CO₂, para aumentar a estrutura porosa do material.

5.2 Propriedade Intelectual

A presente pesquisa contou com apoio do FIEMGLab 4.0 e da mineradora parceira, a Corporação Transnacional ANGLO-AMERICAN, bem como de subsídio de bolsa de mestrado da UNEB. Agradecemos estes aportes de recursos que viabilizaram a execução deste trabalho.

Todas as informações e conhecimentos compartilhados nessa dissertação estão sob salvaguarda de Proteção Intelectual e Industrial, sob a forma de patentes depositadas no INPI, Instituto Nacional de Propriedade Intelectual, não podendo ser compartilhados com terceiros, girando sob NDA (Termos de Sigilo) específico.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12076: **Carvão Ativado Pulverizado** – Determinação da Massa Específica Aparente. Código Secundário: MB 341 Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT NBR 14725: **Produtos Químicos** – Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente. Rio de Janeiro, 2009.
- AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C.; GUARINO, A. W. S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química nova**, v. 25, p. 1145-1154, 2002.
- AHMAD, M. *et al.* Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, n. 99, pp.19 – 33, 2014.
- ALBUQUERQUE JÚNIOR., E. C. **Carvão ativado do mesocarpo do coco verde-produção, otimização e aplicação na adsorção do corante Remazol black B**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.
- ALVES, A. A. A. **Emprego de tecnologia de adsorção em leito fixo de carvão ativado granular para remoção de agrotóxicos carbamatos da água de abastecimento público**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- ALVES, R. F. *et al.* Produção de carvão ativado a partir de endocarpo de coco da baía visando o armazenamento de gás natural. In: **I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural E Biocombustível**. 2015.
- ANTONIETI, C. C. **Remoção de cilindropermopsina por adsorção em carvão ativado granular, seleção de carvões e estimativa de tempo de operação da coluna**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais e Recurso Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022.
- ARAÚJO, L. S. *et al.* Caracterização e avaliação de fatores que determinam a remoção de microcistina-LR em carvão ativado granular produzido a partir de diferentes matérias-primas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, p. 1131-1142, 2019.
- ARAÚJO, P. C. C. *et al.* Uso de carvão ativado na remoção de CO₂. **Scientia Plena**, v. 14, n. 5, 2018.
- ARAÚJO, P. C. C. **Adsorção de CO₂ em carvão ativado produzido a partir de endocarpo de coco (Cocos nucifera L)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.
- ARENA, N.; LEE, J.; CLIFT, R. Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 68-77, 2016.

BARRETO, M. B. **Adsorção de metais em biocarvão: uma revisão de estudos envolvendo o uso de radiotraçadores**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

BORGES, C. B. **Perspectivas para a aplicação da tecnologia BECCS para a captura de CO₂ na indústria de papel e celulose no Brasil**. 2020. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, 2020.

BRAINER, M. S. C. P.; XIMENES, L. F. Produção de coco – soerguimento das áreas tradicionais do Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE 2020.

BURGOS, D. T. *et al.* Tecnologias de captura, transporte, sequestro e armazenamento de CO₂: implicações para o uso de energia sustentável. **Fuentes: El reventón energético**, v. 20, n. 1, p. 31-44, 2022.

CABRAL, F. A. S. **Biofiltração para desodorização de reatores anaeróbios**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CARVALHO, R. S. **Produção e caracterização de biocarvão de bagaço de laranja para utilização no pós-tratamento de água residuária**. 2018. Tese (Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

CO₂METER. **CO₂ sensors: 100 percent CO₂ sensors**. Disponível em: <<https://www.co2meter.com/collections/100-percent-co2-sensors>> Acesso em: 12 de julho de 2021.

CRITTENDEN, J. C. *et al.* **MWH's water treatment: principles and design**. John Wiley & Sons, ed. 3, 1869p. 2012.

DANTAS, T. L. P. **Separação de dióxido de carbono por adsorção a partir de misturas sintéticas do tipo gás de exaustão**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

DE JESUS, C. O. **Revisão sistemática da literatura: uma análise de tecnologias ccs utilizando a ferramenta StArt**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022.

DIAS, C. M. F. **Estudos de adsorção de CO₂ gasoso em biocarvão (biochar)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Coimbra, Coimbra, 2014.

EDX, **Climate Change: Carbon Capture and Storage**. EdinburghX CCSx, 2018. Disponível em: <<https://learning.edx.org/course/course-v1:EdinburghX+CCSx+3T2020/home>> Acesso em: 30 de outubro de 2022.

ELLO, A. S. *et al.* Coconut shell-based microporous carbons for CO₂ capture. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 180, p. 280-283, 2013.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, L. **Sistema e método de análise química qualitativa e quantitativa de gás**. PI 0706174-9 A2, 2009.

GASPAR, H. A. C. **Captura e armazenamento de CO₂**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

GENIN, C.; FRASSON, C.M. O saldo da COP26: o que a Conferência do Clima significou para o Brasil e o mundo. **WRI Brasil**, 2021. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-saldo-da-cop26-o-que-conferencia-do-clima-significou-para-o-brasil-e-o-mundo#>> Acesso em: 10 de julho de 2022.

HAUCHHUM, L.; MAHANTA, P. Carbon dioxide adsorption on zeolites and activated carbon by pressure swing adsorption in a fixed bed. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 5, p. 349-356, 2014.

FONSECA, C. G. M. **Remoção de micropoluentes de interesse emergente em matriz aquosa por adsorção em carvão ativado em pó e superfino**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

FIEMG. **Federação de Indústrias de Minas Gerais**. Disponível em: <https://fiemglab.com.br/#quem_somos> Acesso em: 15 de janeiro de 2023.

FIGUEIREDO, I. F. L. **Avaliação da tecnologia de captura direta de CO₂ como opção de mitigação climática**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, 2021.

FIORENTIN, L. D. *et al.* Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço da laranja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, V. 14, n. 6, pp. 635-659, 2010.

FONTELE, S. F. A. **Efeito estufa: o futuro da homeostase atmosférica em risco**. 2012. Monografia (Graduação em Biologia). Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

JESUS, J. H. F. **Uso de biocarvão e suas biomassas precursoras para remediação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em água**. 2016. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

JOERSS, O.; SILVA, C. R. da; SANTOS, M. A. dos. Mudanças climáticas na agenda global: O que aprendemos com as Conferências das Partes (COP) e o que está em jogo na COP 26. **Revista C&Trópico**, v. 45, n. 2, p. 37-54, 2021.

JRIBI, S. *et al.* Corrected adsorption rate model of activated carbon–ethanol pair by means of CFD simulation. **International Journal of Refrigeration**, v. 71, p. 60-68, 2016.

JUSTI, G. H. **Aplicação da fluidodinâmica computacional na avaliação da hidrodinâmica de estágio em colunas de destilação**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

KELLER, J.; STAUDT, R. **Gas Adsorption Equilibria**: experimental methods and adsorption isotherms. Boston: Spring Science, 2005. 422 p. ISBN 90-387-23598-1.

KRAMER, D. Negative carbon dioxide emissions. **American Institute of Physics**, v. 73, n. 1, p. 44-57, 2020.

LACERDA, M. S.; LEITÃO, F. O coco verde no contexto da economia circular: uma revisão sistemática da literatura. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 3, p. 1-16, 2021.

LEITE, V. P. *et al.* Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde. **Vitalle - Revista de Ciências da Saúde**, v. 32, n. 3, p. 143-153, 2020.

LEHMANN, J.; STEPHEN, J. **Biochar for environmental management: an Introduction**. In: *Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscans, UK, 2ed., pp. 1–13, 2015.

LEVIN, K.; BOEHM, S.; CARTER, R. Impacto das mudanças climáticas: 6 descobertas do relatório do IPCC de 2022 sobre adaptação. **WRI Brasil, 2022**. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/impacto-das-mudancas-climaticas-6-descobertas-do-relatorio-do-ipcc-de-2022-sobre-adaptacao>> Acesso em: 10 de junho de 2022.

MACIEL, T. A. R. **Avaliação da adsorção com carvão ativado produzido a partir da planta jurema preta (mimosa tenuiflora (willd.) Poiret)**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos) – Universidade Federal De Campina Grande, Sumé, 2016.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Grupo Gen-LTC, 2 ed., 2017.

MANGUEIRA, E. S. V. **Produção de carvão ativado a partir de endocarpo de coco da baía (Cocos nucifera) aplicado ao processo de adsorção do herbicida metribuzin**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

MATTIELO, S. **Avaliação da eficiência de um filtro de adsorção com carvão ativado na purificação de biogás proveniente da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2017.

MATTOS, A. L. A. *et al.* Beneficiamento da casca de coco verde. **Embrapa Agroindústria Tropical**, v. 25, 2014.

MATSSON, J. E. **An Introduction to ANSYS Fluent 2022**. Sdc Publications, 2022.
MEDEIROS, R. M. *et al.* Produção de carvão ativado a partir de Eucalyptus dunnii para adsorção de corante azul de metileno. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 10, n. 1, 2019.

- MONTICELI, I. S.; VASCONCELOS, R. C. A. **Captura de CO₂**: viabilidade, aplicações e relevância ambiental. 2021. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.
- MORAIS, R. M. *et al.* Produção de carvão ativado microporoso com vapor d'água preparado a partir de endocarpo de coco (Cocos nucifera). **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 3, p. 699-703, 2019.
- NASCIMENTO, O. A. **Avaliação da interferência da porosidade do carvão ativado na captura de CO₂ em coluna de adsorção de bancada**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Formiga, Formiga, 2018.
- NASCIMENTO, P. H. M.; SEDANO, C. T. S. Estudo experimental para estimação da temperatura da combustão de resíduos urbanos de coco verde. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 86608-86624, 2021.
- NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. 257 p. ISBN 978-65-990722-7-7.
- OLIVEIRA, V. M. **Estudo de porosidade de pelotas de minério de ferro para altos fornos através da adsorção física**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- PANCHAL, M. *et al.* A single step process to synthesize ordered porous carbon from coconut shells-eggshells biowaste. **Materials Research Express**, v. 6, n. 11, p. 115613, 2019.
- PINHEIRO, H. S. **Síntese e caracterização de Zeólita a dopada com cobre para adsorção de gases poluentes**. 2012. Programa de Iniciação Científica. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.
- PIRES, M.G. **Adsorção de dióxido de carbono em zeólita NaY "binder-free"**. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Politécnico de Bragança, 2021.
- PÖRTNER, H. O. *et al.* **Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2022.
- PRIZIBISCZKI, C. Fim de jogo: a repercussão dos resultados da COP 27 no Brasil. **O eco**, 2022. Disponível em: < <https://oeco.org.br/reportagens/fim-de-jogo-a-repercussao-dos-resultados-da-cop27-no-brasil/> > Acesso em: 25 de novembro de 2022.
- QASEM, N. A.; MANSOUR, R. B. Energy and productivity efficient vacuum pressure swing adsorption process to separate CO₂ from CO₂/N₂ mixture using Mg-MOF-74: A CFD simulation. **Applied Energy**, v. 209, p. 190-202, 2018.
- RAVAGNANI, A. T. F. S. G.; SUSLICK, S. B. Modelo dinâmico de sequestro geológico de CO₂ em reservatórios de petróleo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 39-60, 2008.

REI, F. C. F.; GONÇALVES, A. F.; DE SOUZA, L. P. Acordo de Paris: reflexões e desafios para o regime internacional de mudanças climáticas. **Veredas do Direito: direito ambiental e desenvolvimento sustentável**, v. 14, n. 29, p. 81-99, 2017.

REIS, D. C. N. S. P. **Importância do estudo da área superficial específica e porosidade do estearato de magnésio para o setor farmacêutico**. 2013. Monografia (Especialização em Tecnologias Industriais Farmacêuticas) – Instituto de Tecnologias e Fármacos, Farminguinhos, 2013

REIS, E. N. **Biocarvão e bio-óleo de cascas de coco (*Cocos nucifera* L.) sob diferentes temperaturas de pirólise**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2020.

RIBEIRO, M. G. *et al.* Tecnologias Sustentáveis de Captura de CO₂: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 3, 2022.

RONCONI, T. C.; SANTOS, C. M. Captura de CO₂ em materiais híbridos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, p. 112-130, 2014.

RUSSELL, J. B. **Química Geral**. Editora Pearson Universidades, 1994. 822 p. ISBN-13-978-8534601924.

SANTANA, G. M. *et al.* Activated carbon from bamboo (*Bambusa vulgaris*) waste using CO₂ as activating agent for adsorption of methylene blue and phenol. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 769-778, 2019.

SANTOS, D. R. **Características, variáveis de produção e aplicação do carvão ativado fisicamente de mesocarpo do coco verde da baía**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SANTOS, M. S.; COSTA, F. P. O Método de Crank-Nicolson aplicado ao Modelo de Difusão de Conhecimento: Uma Simulação para o Processo de Transmissão de Conhecimento. **International Journal of Knowledge Engineering and Management (IJKEM)**, v. 4, n. 9, p. 129-146, 2015.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <<https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/processos-industriais>> Acesso em: 27 de setembro de 2022.

SENHORAS, Elói. **Estratégia de uma Agenda para a Cadeia Agroindustrial do Coco**. Campinas: Ed. ESC, 2003

SHEN, R. *et al.* Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 67, p. 104252, 2020.

- SILVA, E. S. C. A. *et al.* Equilíbrio de adsorção do corante rodamina B em carvão ativado obtido dos resíduos do coco verde. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 8, p. 1051-1058, 2017.
- SILVA, L. L. I. **Modelagem e simulação de adsorção em leito empacotado usando fluidodinâmica computacional**. 2020. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.
- SILVA, L. P *et al.* Modelagem Dinâmica da Cobertura Vegetal e Mudanças Climáticas na Bacia do Rio Taperoá para o Ano de 2055. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. p. 1-11, 2019.
- SILVA, R. W. C.; DE PAULA, B. L. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terræ Didactica**, v. 5, n. 1, p. 42-49, 2009.
- SILVEIRA, A. J. M. **Viabilidade técnica da pirólise da biomassa do coco: produção de bioóleo, biocarvão e biogás**. 2018. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2018.
- SPIGARELLI, B. P.; KAWATRA, S. K. Opportunities and challenges in carbon dioxide capture. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 1, p. 69-87, 2013.
- SONOBE, H. G. **Remoção de microcistina por filtros de carvão ativado: aplicação de modelo matemático para obtenção de parâmetros de dimensionamento**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- SOUZA, A. A. **Efeito do tipo de metal da estrutura perovskita nas características estruturais e na utilização como adsorvente na remoção do corante vermelho congo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.
- SOUZA, J. S. **Revisão bibliográfica das principais tecnologias de captura do CO₂**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Católica de Salvador, Salvador, 2021.
- SYLVIA, N. *et al.* A computational fluid dynamic comparative study on CO₂ adsorption performance using activated carbon and zeolite in a fixed bed reactor. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012042.
- SZTEKLER, K. *et al.* CFD Analysis of Elements of an Adsorption Chiller with Desalination Function. **Energies**, v.14, n. 22, 2021.
- TAY, J. H. *et al.* Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment: Integration of Adsorption and Biological Treatment. **Environmental Science and Technology**, 2010.
- TEIXEIRA, J. L. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde**. 2020. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

TEIXEIRA, M., B. **Remoção de carbono orgânico dissolvido de águas de abastecimento por adsorção em carvão ativado granular**. 2014. Dissertação (Mestrado em Recurso Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson education, 2 ed., 2007.

XU, J. *et al.* Post-combustion CO₂ capture with membrane process: Practical membrane performance and appropriate pressure. **Journal of Membrane Science**, 195-213, 2019.

ZAWAWI, M. H. *et al.* A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). In: AIP conference proceedings. **AIP Publishing LLC**, 2018. p. 020252.

ZAINUDDIN, M. I. F.; AHMAD, A. L. A. Mixed matrix membrane development progress and prospect of using 2D nanosheet filler for CO₂ separation and capture. **Journal of CO₂ Utilization**, v.62, 2022.

ZHENG, X.; LIU, Y.; LIU, W. Two-dimensional modeling of the transport phenomena in the adsorber during pressure swing adsorption process. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.49, n. 22, 2010.

ZULKIFLI, M. Z. A. *et al.* CFD Simulation of CO₂ and Methane Adsorption at Various Temperature for MOF-5 using Dual-site and Single-site Langmuir Model. **CFD Letters**, v. 13, n. 10, p. 1-10, 2021.