

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE  
CAMPUS DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS  
RENOVÁVEIS

Marcelo Saura

**Sistema de captura de CO<sub>2</sub> em caldeiras de biomassa para a produção de precipitado de carbonato de cálcio (PCC): Uma revisão sistemática e análise teórica**

Sorocaba

2025

Marcelo Saura

**Sistema de captura de CO<sub>2</sub> em caldeiras de biomassa para a produção de precipitado de carbonato de cálcio (PCC): Uma revisão sistemática e análise teórica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, para a obtenção do título de Mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

Orientação: Prof. Dr. Fabio Minoru Yamaji

Sorocaba

2025

Saura, Marcelo

Sistema de captura de CO<sub>2</sub> em caldeiras de biomassa para a produção de precipitado de carbonato de cálcio (PCC): Uma revisão sistemática e análise teórica / Marcelo Saura -- 2025. 200f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Fabio Minoru Yamaji  
Banca Examinadora: Elias Ricardo Durango Padilla, Gabriela Bertoni Belini  
Bibliografia

1. Captura de CO<sub>2</sub>. 2. Redução de emissões. 3. Gases de combustão. I. Saura, Marcelo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Marcelo Saura, realizada em 28/02/2025.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji (UFSCar)

Prof. Dr. Elias Ricardo Durango Padilla (Anhanguera)

Profa. Dra. Gabriela Bertoni Beljini (CBA)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

## AGRADECIMENTO

A chegada até aqui, na conclusão dessa pós-graduação, representa a realização de um sonho que não teria sido possível sem o apoio e a dedicação de pessoas muito especiais em minha vida.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, cuja presença constante e benevolência me guiaram por todos os desafios e abriram portas em momentos cruciais. Sua força e graça são o alicerce de todas as minhas conquistas e aprendizados.

Agradeço profundamente aos meus pais, Lourdes e Rubens, por todo o esforço e sacrifício que fizeram ao longo da vida. Como tecelões, trabalharam incansavelmente para nos proporcionar, a mim e ao meu irmão Rubens, uma educação digna, apesar das muitas dificuldades financeiras. Nunca esquecerei os dias em que, com muita dificuldade, mantiveram-nos na escola, mesmo quando era necessária ajuda financeira da saudosa tia Joana, para a compra dos materiais escolares para posteriormente pagarem parcelado. Hoje, compreendo e valorizo ainda mais esse gesto de amor e dedicação, e agradeço-lhes por nunca terem desistido de nós.

Agradeço meu irmão, Rubens, que hoje está ao lado Pai eterno, que mesmo sem saber, me deu uma chacoalhada nos momentos em que mais eu precisava.

Minha gratidão também se estende à minha esposa Aline, que abdicou de sua vida profissional para cuidar da nossa família. Seu apoio incondicional, seu carinho e sua dedicação permitiram que eu me concentrasse nos estudos e no trabalho, sabendo que nossos filhos, Anderson e Pedro, estavam bem cuidados. Sua presença constante ao meu lado e seu amor foram e são fundamentais para que eu pudesse buscar o sustento da nossa família e o conhecimento acadêmico de forma mais tranquila e equilibrada. Aline, saiba que eu te amo, e tenho gratidão por ter preparado o caminho para que nós pudéssemos alcançar este objetivo juntos.

Agradeço ao Diego, o Texugo, que me incentivou a buscar o título de mestrado e tanto vem me ajudando e mostrando os caminhos que um verdadeiro pesquisador deve seguir. Sua orientação e apoio têm sido inestimáveis, e sou profundamente grato por sua amizade e sabedoria.

Ainda, agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Fabio Minoru Yamaji, que, de tão humano que é em suas relações, às vezes me confundo se realmente é professor, me remetendo à época da graduação em engenharia. Sua abordagem única e compreensão têm sido essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal, e sou imensamente grato por isso.

Por fim, agradeço aos meus filhos, Anderson e Pedro, cuja alegria e amor me inspiram a ser uma pessoa melhor todos os dias. Vocês são a razão pela qual me esforcei tanto para chegar até aqui, e dedico esta conquista a vocês.

*“Não contavam com minha astúcia.”*  
**Chapolin Colorado**

## RESUMO

SAURA, Marcelo. Sistema de captura de CO<sub>2</sub> em caldeiras de biomassa para a produção de precipitado de carbonato de cálcio (PCC): Uma revisão sistemática e análise teórica. 2025.200f. Dissertação (Mestrado em “Planejamento e Uso de Recursos Renováveis”) – Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2025.

A crescente preocupação com as emissões de gases de efeito estufa tem impulsionado pesquisas sobre tecnologias viáveis para a captura e aplicação dos gases de efeito estufa, em especial para o CO<sub>2</sub>. Este trabalho está estruturado em três capítulos, sendo que o primeiro, uma revisão bibliográfica, das tecnologias de captura e reutilização de CO<sub>2</sub>, incluindo absorção, adsorção, SARC, membranas e oxí-combustão, em sistemas geradores de energia térmica com fontes de combustíveis renováveis, enfatizando viabilidade econômica e redução da pegada de carbono na produção de PCC para a indústria de papel. O segundo capítulo aborda-se uma revisão bibliométrica e sistemática que permitiu identificar tendências científicas e avanços tecnológicos na captura de CO<sub>2</sub>, bem como avaliar a viabilidade econômica e operacional do sistema SARC para reduzir a pegada de carbono no setor industrial. Foram analisados 6.228 documentos, extraídos da plataforma Web of Science (período de 1997 a 2023), utilizando os termos “CO<sub>2</sub> capture”, “Captura de CO<sub>2</sub>”, “Flue gas” e “Gases de combustão”, dos quais 362 artigos foram selecionados para a revisão sistemática. Observou-se que 52,68% das publicações globais ocorreram entre 2018 e 2023, enquanto 43,03% dos estudos brasileiros foram publicados entre 2021 e 2023. As áreas mais relevantes englobaram engenharia, combustíveis e energia, e química, com ênfase em tecnologias como absorção química, adsorção, membranas, oxí-combustão e o sistema SARC, o qual se destaca pela menor demanda por vapor e facilidade de integração à indústrias já em operação. No terceiro capítulo, foi desenvolvido um cenário teórico de captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de PCC em uma indústria de celulose e papel, empregando o sistema SARC como tecnologia de captura. Para isso, três cenários operacionais de produção de PCC foram simulados com os softwares ASPEN Plus V.14 e Vulcano 2.5: a produção atual de PCC de fontes não renováveis de CO<sub>2</sub>, a produção de PCC utilizando os dados simulados da geração de CO<sub>2</sub> proveniente de uma caldeira hipotética de biomassa sem sistema de captura, e a produção de PCC com CO<sub>2</sub> capturado pelo sistema SARC. Embora a eficiência do sistema de captura tenha sido estimada em 80%, gargalos nos hidratadores da planta de PCC foram encontrados, reduzindo essa eficiência para 27,2%. Mesmo assim, a simulação prevê um aumento na produção teórica diária de PCC, passando de

301,4 para 701,4 toneladas, o que representa um acréscimo de 204% na margem de contribuição. Além disso, a substituição de celulose por PCC na produção de papel apresentou um potencial econômico adicional, estimado em aproximadamente R\$ 3,02 milhões por mês para cada aumento de 1% no teor de PCC, desde que a qualidade do papel não seja comprometida. Esses achados fornecem subsídios para o desenvolvimento de abordagens mais eficientes e sustentáveis no setor industrial, embora as limitações observadas, especialmente relacionadas aos adsorventes, indiquem a necessidade de investigações futuras.

*Palavras-chave:* Captura de CO<sub>2</sub>; aspen plus; sistema SARC; redução de emissões; gases de combustão

## ABSTRACT

The growing concern with greenhouse gas emissions has driven research into viable technologies for capturing and utilizing these gases, particularly CO<sub>2</sub>. This work is structured into three chapters. The first presents a literature review of CO<sub>2</sub> capture and reuse technologies, including absorption, adsorption, SARC, membranes, and oxycombustion, applied to thermal energy generation systems using renewable fuel sources. It emphasizes economic feasibility and carbon footprint reduction in PCC production for the paper industry. The second chapter covers a bibliometric and systematic review that helped identify scientific trends and technological advancements in CO<sub>2</sub> capture, as well as evaluate the economic and operational feasibility of the SARC system for reducing carbon footprints in the industrial sector. A total of 6,228 documents were analyzed from the Web of Science platform (1997–2023), using the terms “CO<sub>2</sub> capture,” “Captura de CO<sub>2</sub>,” “Flue gas,” and “Gases de combustão,” from which 362 articles were selected for systematic review. It was observed that 52.68% of global publications occurred between 2018 and 2023, while 43.03% of Brazilian studies were published between 2021 and 2023. The most relevant fields included engineering, fuels and energy, and chemistry, with emphasis on technologies such as chemical absorption, adsorption, membranes, oxy-combustion, and the SARC system, which stands out for its lower steam demand and ease of integration into existing industrial facilities. The third chapter presents a theoretical scenario for CO<sub>2</sub> capture and utilization in the production of PCC in a pulp and paper mill, using the SARC system as the capture technology. For this, three operational PCC production scenarios were simulated using ASPEN Plus V.14 and Vulcano 2.5: current PCC production from non-renewable CO<sub>2</sub> sources, PCC production using simulated data from CO<sub>2</sub> generation by a hypothetical biomass boiler without a capture system, and PCC production using CO<sub>2</sub> captured by the SARC system. Although the capture system efficiency was initially estimated at 80%, bottlenecks in the PCC plant’s hydrators reduced this efficiency to 27.2%. Even so, the simulation predicts a theoretical daily PCC production increase from 301.4 to 701.4 tons, representing a 204% increase in contribution margin. Moreover, replacing cellulose with PCC in paper production demonstrated additional economic potential, estimated at approximately R\$ 3.02 million per month for each 1% increase in PCC content, provided that paper quality is not compromised. These findings provide a foundation for developing more efficient and sustainable approaches in the industrial sector, although the observed limitations, especially those related to adsorbents highlight the need for further research.

*Keywords:* CO<sub>2</sub> capture; aspen plus; SARC system; emission reduction; flue gases.



## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1 - Concentração de tecnologias de captura de CO <sub>2</sub> .....  | 24  |
| Figura 2 - Sistema de captura com Aminas .....  | 25  |
| Figura 3 - Exemplo de um sistema de adsorção .....  | 26  |
| Figura 4 - Exemplo de um sistema SARC.....  | 28  |
| Figura 5 - Exemplo de sistema de captura de CO <sub>2</sub> por membranas .....                                     | 29  |
| Figura 6 - Exemplo de sistema de captura de CO <sub>2</sub> por oxi-combustão.....                                  | 30  |
| Figura 7 - Grafo de co-ocorrência das palavras-chave dos 6.228 artigos.....   | 42  |
| Figura 8 - Distribuição dos 6.228 artigos publicados sobre captura de CO <sub>2</sub> nos últimos 27 anos<br>.....  | 45  |
| Figura 9 - Distribuição dos 362 artigos sobre captura de CO <sub>2</sub> nos últimos 27 anos. ....                  | 46  |
| Figura 10 - Grafo de co-ocorrência .....  | 47  |
| Figura 11 - Fator de impacto x publicações .....  | 50  |
| Figura 12 - Mapa coroplético dos 10 países com maior número de publicações, incluindo o<br>Brasil.....              | 51  |
| Figura 13 - Co-autoria entre países.....  | 52  |
| Figura 14 - Co-autoria entre países com detalhe para média de publicações em relação ao....                         | 52  |
| Figura 15 - 10 principais agencias de financiamento de pesquisa de captura de CO <sub>2</sub> da China<br>.....     | 54  |
| Figura 16 - Distribuição de artigos nacionais publicados sobre captura de CO <sub>2</sub> .....                     | 55  |
| Figura 17 - Distribuição de artigos nacionais publicados por instituições sobre captura de CO <sub>2</sub><br>..... | 56  |
| Figura 18 - Grafo de co-ocorrência de palavras considerando os 79 arquivos filtrados para o<br>Brasil.....          | 58  |
| Figura 19 - Comparação dos valores de consumo específico de energia por CO <sub>2</sub> evitado. ....               | 70  |
| Figura 20 - Fluxograma da metodologia utilizada para as simulações .....  | 93  |
| Figura 21 - Fluxograma da simulação do processo de produção de PCC (CaCO <sub>3</sub> ) .....                       | 95  |
| Figura 22 - Simulação dos dados da queima da caldeira biomassa.....   | 97  |
| Figura 23 - Simulação dos gases de escape/exaustão.....   | 98  |
| Figura 24 - Diagrama demonstrativo da rota do CO <sub>2</sub> , desde a sua geração até a aplicação...              | 102 |
| Figura 25 - Ilustração da simulação, sem erros na geração dos dados. ....   | 103 |
| Figura 26 - Dados da hidratação inseridos no ASPEN PLUS V.14.....   | 104 |
| Figura 27 - Dados da carbonatação inseridos no ASPEN PLUS V.14.....   | 104 |
| Figura 28 - Comparação entre as concentrações de PCC .....  | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 29 - Comparação entre as produções de PCC .....                                   | 109 |
| Figura 30 - Comparação de captura de CO <sub>2</sub> equivalente.....                    | 110 |
| Figura 31 - Aumento de PCC e potencial receita adicional de venda de celulose excedente. | 111 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Critérios para busca sistematizada. ....   | 41 |
| Tabela 2 - Palavras de co-ocorrência dos 6.228 artigos. ....  | 43 |
| Tabela 3 - Categorias com maior número de publicações para o tema captura de CO <sub>2</sub> .....  | 46 |
| Tabela 4 - Informações obtidas sobre os clusters de ocorrência de palavras formados, principais termos e áreas relacionadas. ....   | 48 |
| Tabela 5 - Dez principais periódicos que publicam sobre a captura de CO <sub>2</sub> , no cenário mundial, e suas respectivas classificações nas áreas de conhecimento. ....    | 49 |
| Tabela 6 - Distribuição das publicações sobre o tema nos países do mundo. ....  | 50 |
| Tabela 7 - Informações obtidas sobre os clusters formados para coautoria entre países. ....   | 53 |
| Tabela 8 - Principais entidades de financiamento chinesas.....  | 53 |
| Tabela 9 - Classificação dos artigos encontrados no Brasil em relação as áreas de conhecimento. ....  | 57 |
| Tabela 10 - Informações obtidas sobre os clusters de co-ocorrência de palavras formados para o cenário nacional: principais termos e áreas relacionadas. ....                   | 58 |
| Tabela 11 - Dez principais periódicos onde estão localizados os 79 artigos brasileiros sobre a captura de CO <sub>2</sub> e suas classificações nas áreas de conhecimento. .... | 59 |
| Tabela 12 - Subtemas de trabalhos sobre absorção química com aminas.....  | 62 |
| Tabela 13 - Subtemas de trabalhos sobre adsorção e SARC.....  | 66 |
| Tabela 14 - Autores e subtemas das pesquisas sobre membranas.....   | 68 |
| Tabela 15 - Parâmetros assumidos para a obtenção de vazão e concentração de CO <sub>2</sub> dos gases de combustão.....   | 87 |
| Tabela 16 - Composição do combustível sólido – Eucalipto (Com 40% de umidade).....  | 87 |
| Tabela 17 - Produção de papel e consumo de PCC por dia.....   | 89 |
| Tabela 18 - Valores de consumo médio de energia elétrica e vapor (jan-out/24).....  | 92 |
| Tabela 19 - Variáveis de processo.....  | 93 |
| Tabela 20 - Identificação dos componentes.....  | 94 |
| Tabela 21 - Método de interação entre os componentes.....   | 94 |
| Tabela 22 - Bloco de reatores disponíveis no ASPEN PLUS V.14.....   | 95 |
| Tabela 23 - Dados da composição e algumas propriedades dos gases de escape.....   | 98 |
| Tabela 24 - Demonstração da quantidade de CO <sub>2</sub> contida nos gases de escape da caldeira de biomassa.....  | 99 |
| Tabela 25 - Produção teórica da planta de PCC, com CO <sub>2</sub> disponível de 1.134 t/dia.....   | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 26 - Dados de produção de PCC teóricos – Cenários atual, sem e com captura de CO <sub>2</sub><br>..... | 101 |
| Tabela 27 - Dados simulação CaO .....   | 103 |
| Tabela 28 - Dados simulação Água.....   | 103 |
| Tabela 29 - Dados simulação gases de escape .....   | 103 |
| Tabela 30 - Dados simulação reator de hidratação.....   | 104 |
| Tabela 31 - Dados simulação reator de carbonatação .....  | 104 |
| Tabela 32 - Dados simulação demanda de calor e fração de vapor do reator de carbonatação<br>.....             | 104 |
| Tabela 33 - Comparação entre as das margens de contribuição.....  | 105 |
| Tabela 34 - Utilização das utilidades.....  | 106 |
| Tabela 35 - Dados simulação produção PCC .....  | 107 |
| Tabela 36 - Aumento de PCC e disponibilização de celulose para a venda.....                                   | 110 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Ca(OH) <sub>2</sub>           | Hidróxido de cálcio  |
| CaCO <sub>3</sub>             | Carbonato de Cálcio  |
| CaO                           | Óxido de Cálcio  |
| CAPES                         | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  |
| CH <sub>4</sub>               | Metano   |
| CNPq                          | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  |
| CO <sub>2</sub>               | Dióxido de Carbono   |
| C <sub>p</sub>                | capacidade calorífica a pressão constante  |
| DesvPad                       | Desvio Padrão  |
| DFG                           | Deutsche Forschungsgemeinschaft (Fundação Alemã de Pesquisa Científica)  |
| DOE                           | United States Department of Energy (Departamento de Energia dos Estados Unidos)  |
| ELECNRTL                      | Electrolyte Non-Random Two-Liquid Model (Modelo de Dois Líquidos Não Aleatório para Eletrólitos)                       |
| ESA                           | Electric Swing Adsorption (Adsorção por Oscilação Elétrica), Energy Swing Adsorption (Adsorção por Oscilação Elétrica) |
| ESG                           | Environmental, Social and Governance   |
| EUA                           | Estados Unidos da América)   |
| FAPESP                        | Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo   |
| GCC                           | Ground Calcium Carbonate (Carbonato de Cálcio Natural)   |
| GEE                           | Gases de Efeito Estufa   |
| H <sub>2</sub> O              | Água   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Íon bicarbonato  |
| IGCC                          | Integrated Gasification Combined Cycle (Ciclo Combinado de Gaseificação Integrada)                                     |
| INPE                          | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  |
| ISSN                          | International Standard Serial Number (Número Internacional de Publicações Seriadas)                                    |
| MEA                           | Monoetanolamina  |
| Mg-MOF-74                     | Magnesium-based Metal-Organic Framework number 74 (Estrutura Meta-Orgânica combinado com Magnésio, número 74)          |

|                 |  |
|-----------------|--|
| MMM             | Mixed Matrix Membranes (Membranas de Matrizes Mistas)  |
| MOF             | Metal-Organic Frameworks (Estruturas Metal-Orgânicas)  |
| N <sub>2</sub>  | Nitrogênio   |
| NO <sub>x</sub> | Óxidos de Nitrogênio   |
| NSF             | National Science Foundation (Fundação de Ciências Naturais)  |
| O <sub>2</sub>  | Oxigênio   |
| PCC             | Precipitado de Carbonato de Cálcio   |
| PEI             | Polietilenoimina   |
| PLD             | Preço de Liquidação das Diferenças   |
| PRISMA-P        | Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses<br>(Itens ..... Preferenciais para Relatar Revisões Sistemáticas e Metanálises) |
| REquil          | Equilibrium Reactor (Reator de Equilíbrio Químico)   |
| RGibbs          | Gibbs Free Energy Reactor (Reator Basedo na Minimização da Energia de Gibbs)   |
| RSTOIC          | Stoichiometric reactor block (Bloco de Reator Estequiométrico)   |
| RYield          | Yield Reactor (Reator por Rendimento)  |
| SARC            | Swing Adsorption Reactor Cluster   |
| SO <sub>2</sub> | Dióxido de enxofre   |
| SPECCA          | Specific Primary Energy Consumption (Consumo Específico de Energia Primária por CO <sub>2</sub> Evitado)   |
| TSA             | Temperature Swing Adsorption (Adsorção por Temperatura Oscilante)  |
| UFC             | Universidade Federal do Ceará  |
| UFRJ            | Universidade Federal do Rio de Janeiro   |
| VSA             | Vacuum Swing Adsorption (Adsorção por Vácuo)   |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....                            | <b>21</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                         | <b>21</b> |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....              | <b>23</b> |
| 2.1 AMINAS .....                                   | 24        |
| 2.2 ADSORÇÃO .....                                 | 25        |
| 2.3 SARC.....                                      | 27        |
| 2.4 MEMBRANAS .....                                | 28        |
| 2.5 OXI-COMBUSTÍVEL .....                          | 29        |
| 2.6 BIOMASSA .....                                 | 31        |
| 2.7 CALDEIRAS.....                                 | 32        |
| 2.8 PRECIPITADO DE CARBONATO DE CÁLCIO (PCC) ..... | 32        |
| <b>3. CONCLUSÃO</b> .....                          | <b>33</b> |
| <b>4. REFERÊNCIAS</b> .....                        | <b>34</b> |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....                            | <b>39</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                         | <b>39</b> |
| <b>2. METODOLOGIA</b> .....                        | <b>41</b> |
| 2.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....                    | 43        |
| 2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA .....                      | 44        |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....            | <b>45</b> |
| 3.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....                    | 45        |
| 3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA .....                      | 60        |
| 3.2.1 AMINAS .....                                 | 61        |
| 3.2.2 ADSORÇÃO .....                               | 62        |
| 3.2.3 SARC.....                                    | 64        |
| 3.2.4 MEMBRANAS .....                              | 67        |
| 3.2.5 OXI-COMBUSTÍVEL .....                        | 69        |
| <b>4. CONCLUSÃO</b> .....                          | <b>71</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>5. REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>CAPÍTULO 3.....</b>   | <b>81</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>83</b> |
| <b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>87</b> |
| 2.1 GASES DE COMBUSTÃO .....   | 87        |
| 2.2 SISTEMA DE CAPTURA DE CO <sub>2</sub> – SARC .....                         | 88        |
| 2.3 PRODUÇÃO DE PAPEL.....   | 88        |
| 2.4 PRODUÇÃO DE PCC .....  | 89        |
| 2.4.1 REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO .....   | 89        |
| 2.4.2 REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO .....   | 90        |
| 2.4.3 SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO DE PCC .....                                       | 90        |
| 2.4.4 MARGEM DE CONTRIBUIÇÃO DA PLANTA DE PCC E CONSUMO DE<br>UTILIDADES ..... | 90        |
| 2.5 CONSUMO DE CELULOSE .....  | 92        |
| 2.6 SIMULAÇÕES.....  | 92        |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>  | <b>97</b> |
| 3.1 GASES DE EXAUSTÃO – CALDEIRA BIOMASSA.....                                 | 97        |
| 3.2 DADOS DA SIMULAÇÃO NO ASPEN PLUS V.14.....                                 | 102       |
| 3.2.1 CAO.....   | 103       |
| 3.2.2 ÁGUA.....  | 103       |
| 3.2.3 AR + CO <sub>2</sub> .....   | 103       |
| 3.2.4 HIDRATAÇÃO.....  | 104       |
| 3.2.5 CARBONATAÇÃO.....  | 104       |
| 3.3 MARGEM DE CONTRIBUIÇÃO.....  | 105       |
| 3.4 CONSUMO DE UTILIDADES .....  | 105       |
| 3.5 PRECIPITADO DE CARBONATO DE CÁLCIO (PCC) .....                             | 106       |
| 3.6 CELULOSE.....  | 110       |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>4. CONCLUSÃO.....</b>     | <b>119</b> |
| <b>5. REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>121</b> |
| <b>CONCLUSÃO GERAL .....</b> | <b>125</b> |
| <b>6. APÊNDICE .....</b>     | <b>133</b> |

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais da atualidade, sendo atribuídas ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Esse fenômeno tem relação direta com o modelo de desenvolvimento industrial adotado desde a revolução industrial, período em que o uso intensivo de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, possibilitou o crescimento econômico e avanços tecnológicos que é usufruído atualmente. Essa dependência energética, resultou em uma elevação das emissões de CO<sub>2</sub>, que, de acordo com a (União Nacional da Bioenergia (UDOP), 2022), ao comparar o período pré-industrial<sup>1</sup> com os dados de 2022, houve um aumento de cerca de 50% na concentração de CO<sub>2</sub>.

O aquecimento global decorre do aumento da retenção de calor na atmosfera devido à intensificação do efeito estufa, um processo natural que mantém a temperatura terrestre em níveis adequados para a vida. No entanto, a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e outras atividades humanas têm acelerado esse fenômeno, contribuindo para o aumento da temperatura média global, alterações nos padrões climáticos e eventos extremos mais frequentes, como secas, furacões e ondas de calor (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), 2024).

Dentre os principais gases de efeito estufa, o CO<sub>2</sub> se destaca por sua abundância e persistência na atmosfera. Além dele, compostos como metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e vapor d'água também contribuem para o efeito estufa. O metano, por exemplo, de acordo com (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), 2021), possui um potencial de aquecimento global cerca de 80 vezes maior que o CO<sub>2</sub> ao longo de um período de 20 anos, mas ao longo de aproximadamente 12 anos, ele é gradualmente oxidado, convertendo-se em CO<sub>2</sub> e vapor d'água. Dessa forma, mesmo os gases de vida curta acabam contribuindo para o acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera ao longo do tempo.

Diante desse cenário, diferentes setores industriais utilizam CO<sub>2</sub> tanto de fontes fósseis quanto renováveis para a fabricação de produtos diversos. A indústria química, a produção de fertilizantes e a fabricação de bebidas carbonatadas são exemplos de setores que empregam

---

<sup>1</sup> O período pré-industrial, anterior a 1750, é referência para estudos climáticos, comparando as concentrações de gases de efeito estufa antes e depois da Revolução Industrial, sendo adotado pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas,) para avaliar o impacto das emissões no aquecimento global.

CO<sub>2</sub> em suas operações. Um exemplo é a produção de Precipitado de Carbonato de Cálcio (PCC), utilizado em indústrias de papel, plásticos e tintas, que tradicionalmente emprega CO<sub>2</sub> de origem fóssil. No entanto, alternativas mais sustentáveis estão sendo estudadas para viabilizar a substituição desse insumo por CO<sub>2</sub> proveniente de fontes renováveis (Bastos de Santana et al., 2024).

Ainda sobre o estudo de (Bastos de Santana et al., 2024) embora o CO<sub>2</sub> proveniente da combustão de biomassa tenha grande potencial para apoiar a transição rumo a uma economia de baixo carbono, seu aproveitamento ainda é limitado em escala global.

Segundo dados da (International Energy Agency (IEA), 2024) a biomassa responde por aproximadamente 5% do consumo global de energia, com a maior parte utilizada para geração térmica e elétrica. No entanto, sua aplicação em processos de captura e reutilização de CO<sub>2</sub> enfrenta desafios tecnológicos e econômicos, o que justifica a necessidade de mais estudos sobre o tema.

A análise dos artigos acadêmicos revela diversas tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, com ênfase naquelas associadas ao uso de biocombustíveis. Entretanto, a aplicabilidade dessas abordagens em instalações industriais ainda é limitada, o que compromete a comparação dos dados disponíveis.

Tecnologias como absorção química, adsorção, membranas e oxi-combustão estão sendo estudadas com objetivo da diminuição da demanda energética e integração às infraestruturas industriais existentes. Dentre os potenciais tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, o sistema Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) destaca-se como uma alternativa promissora em solucionar esses desafios de penalidade energética e integração com instalações industriais existentes.

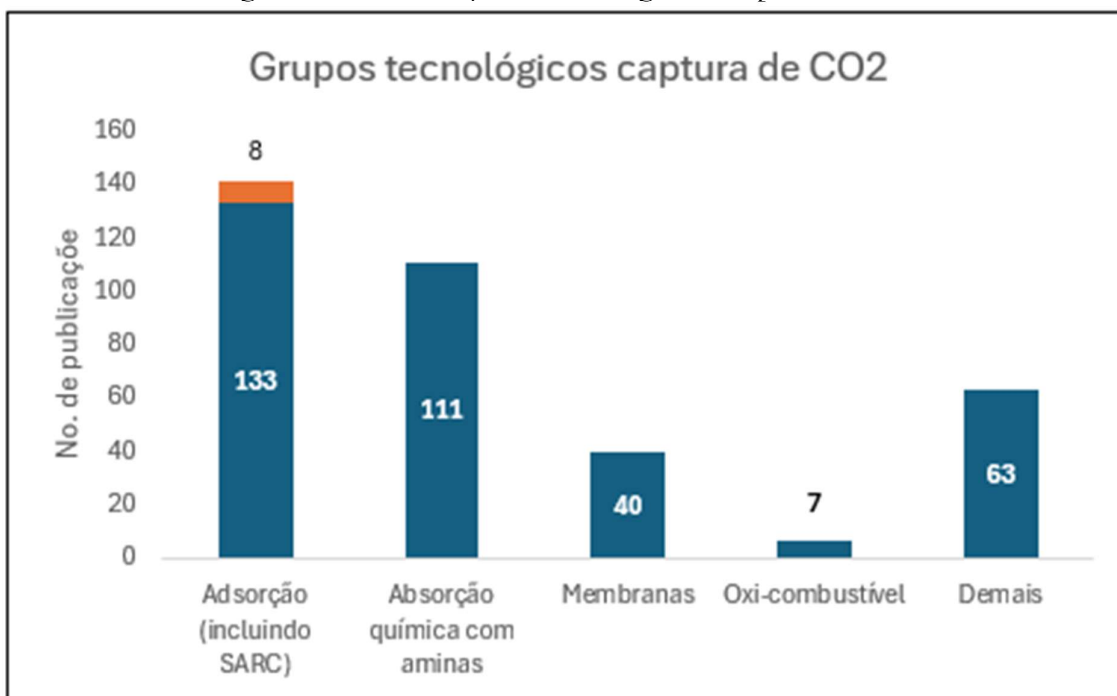
Diante da crescente necessidade de mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> e de desenvolver tecnologias de captura mais eficientes e sustentáveis, o objetivo geral deste estudo foi analisar, entre os artigos publicados sobre tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, aquelas que apresentam menor impacto energético e maior viabilidade de integração às instalações industriais existentes. Em particular, o estudo explora o potencial de uma caldeira a biomassa como fonte de CO<sub>2</sub> para ser capturado por tecnologias como o SARC, buscando promover a transição para processos industriais de baixo carbono, através da incorporação do CO<sub>2</sub> capturado na produção de PCC.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo das tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> foi conduzido considerando a viabilidade de implementação em instalações industriais, com especial atenção ao aproveitamento do CO<sub>2</sub> proveniente da combustão de biomassa em caldeiras industriais. Foram analisadas abordagens como absorção química com aminas, adsorção (incluindo o sistema SARC), membranas e oxi-combustão, considerando sua aplicabilidade tanto em processos convencionais quanto em sistemas baseados em biomassa. Essas estratégias foram categorizadas para proporcionar uma visão mais ampla das principais tendências e desafios na captura de CO<sub>2</sub>, especialmente no contexto de fontes renováveis e da transição para uma economia de baixo carbono.

A captura de CO<sub>2</sub> é uma estratégia para a redução das emissões de gases de efeito estufa em processos industriais (Legkov *et al.*, 2023). Dentre as tecnologias disponíveis, a absorção química com aminas, especialmente com monoetanolamina (MEA), destaca-se pela sua maturidade tecnológica e viabilidade econômica. No entanto, essa abordagem apresenta desafios, como a necessidade de alta demanda energética para a regeneração do solvente, o que pode limitar sua aplicação em cenários onde há restrição de vapor em processos industriais (Cloete *et al.*, 2019). Diante dessas limitações, alternativas para a captura de CO<sub>2</sub> estão sendo exploradas, buscando maior eficiência energética e menor impacto operacional.

A Figura 1 exibe a distribuição desses temas em quantidade de trabalhos publicados.

Figura 1 - Concentração de tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>

Fonte: Elaborada pelo autor

## 2.1 AMINAS

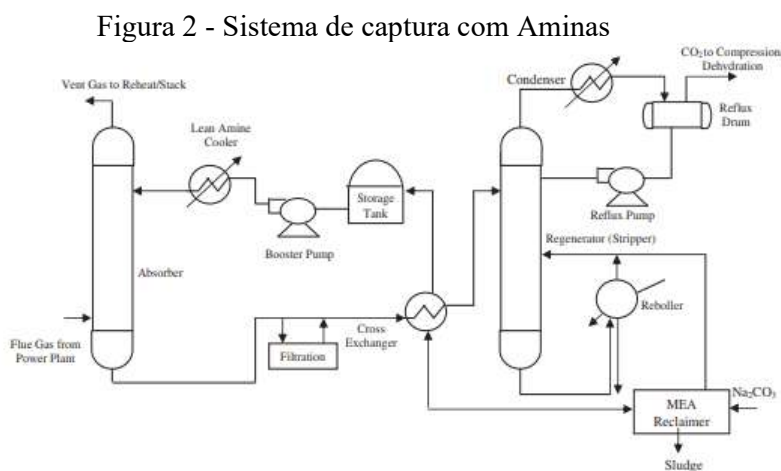
Conforme estudo de ZHU et al. (2012), a captura de CO<sub>2</sub> por absorção com aminas, como a monoetanolamina (MEA), ocorre por absorção química, onde os gases de combustão reagem com a solução aquosa de aminas, formando compostos solúveis. Esses compostos são posteriormente separados, permitindo a purificação do gás.

A eficiência do sistema de captura de CO<sub>2</sub> por aminas é influenciada pela degradação térmica e pela presença de oxigênio e SO<sub>2</sub>, fatores que reduzem a capacidade de absorção e aumentam os custos operacionais (Ewert *et al.*, 2011). No processo, a solução rica em CO<sub>2</sub> é aquecida em um refeedor, promovendo a liberação e captura do CO<sub>2</sub>, que pode ser armazenado ou reaproveitado. As aminas regeneradas são recirculadas para o absorvedor, garantindo a continuidade do ciclo. No entanto, a etapa de regeneração exige alta demanda energética, especialmente de vapor, o que impacta a viabilidade do sistema.

Estudos indicam que a degradação dos solventes amínicos e o alto consumo energético são desafios na captura de CO<sub>2</sub> por aminas, exigindo otimização do sistema para reduzir custos e melhorar a eficiência (Ewert *et al.*, 2011). Além disso, análises econômicas mostram que o design da planta e as condições operacionais influenciam significativamente os custos do processo (Rao; Rubin, 2002).

A tecnologia com MEA permite uma eficiência de remoção de cerca de 90%, reduzindo a concentração de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão de 10-12% para aproximadamente 1% (Rao; Rubin, 2002). No entanto, essa alta eficiência resulta em um aumento dos custos operacionais, elevando o custo da eletricidade de \$49,2/MWh para \$97,0/MWh, refletindo o impacto energético da regeneração do solvente. Apesar disso, essa abordagem contribui significativamente para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>, essencial no combate às mudanças climáticas.

A Figura 2 traz um exemplo de esquema de captura de CO<sub>2</sub>, com sistema de amina.



Fonte: Olajire (2010)

## 2.2 ADSORÇÃO

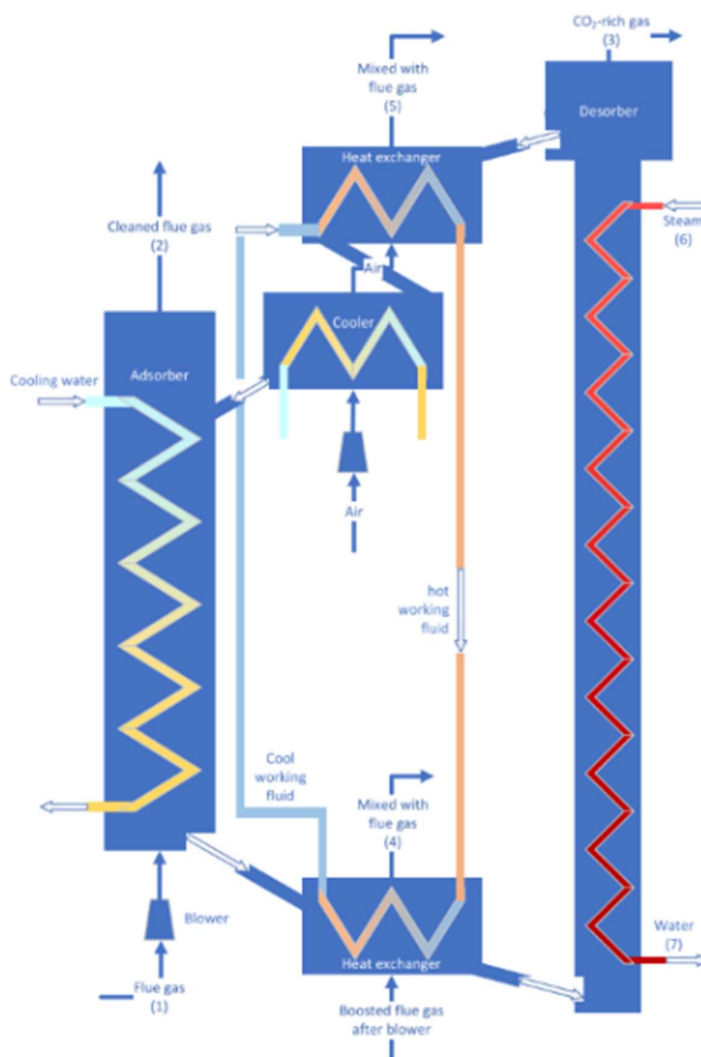
A captura de CO<sub>2</sub> por adsorção utiliza materiais adsorventes para separar o dióxido de carbono de misturas gasosas, como os gases de combustão. A eficácia desse processo está na capacidade seletiva dos adsorventes, que retêm o CO<sub>2</sub>, enquanto outros gases, como o nitrogênio, passam sem serem capturados. Entre os materiais mais utilizados destacam-se zeólitas, carvões ativados e estruturas metal-orgânicas (MOFs), devido à sua alta área superficial e seletividade (Ribeiro; Grande; Rodrigues, 2013b).

Dois métodos são empregados nesse sistema. Adsorção por Temperatura Oscilante (TSA), que utiliza aquecimento para liberar o CO<sub>2</sub> e regenerar o adsorvente, e a Adsorção por Pressão Oscilante (PSA), que aplica variações de pressão para capturar e desorver o gás. Esse último apresenta alta eficiência energética, sendo bastante utilizado na indústria (Thirion *et al.*, 2016), (Dhoke *et al.*, 2021).

Há também a Adsorção por Oscilação Elétrica (ESA), que é uma tecnologia emergente que utiliza pulsos elétricos para aquecer rapidamente o material adsorvente, promovendo a desorção do CO<sub>2</sub> de maneira mais eficiente do que os métodos tradicionais, como a TSA e PSA (Ribeiro; Grande; Rodrigues, 2013b). A escolha do adsorvente e o design do sistema são fatores essenciais para garantir eficiência energética e viabilidade o de captura de CO<sub>2</sub> (Sandhu *et al.*, 2016).

Na Figura 3, um diagrama típico de um sistema de adsorção para a captura de CO<sub>2</sub>.

Figura 3 - Exemplo de um sistema de adsorção



Fonte: Cloete et al. (2024)

### 2.3 SARC

No contexto dos processos de adsorção, o Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) é uma tecnologia para a captura de CO<sub>2</sub> em pós-combustão, combinando oscilações de temperatura e pressão para aumentar a eficiência do processo (Dhoke *et al.*, 2021).

Esse sistema utiliza uma bomba de vácuo para regular as oscilações de pressão e uma bomba de calor para controlar as variações térmicas, permitindo uma captura eficiente de CO<sub>2</sub> com menor consumo energético. Sua aplicação tem se mostrado particularmente promissora em plantas de cimento, onde as condições operacionais favorecem a regeneração eficaz dos adsorventes, reduzindo custos e aumentando a viabilidade do processo (Dhoke *et al.*, 2021).

O sistema SARC opera com ciclos de temperatura e pressão, adsorvendo CO<sub>2</sub> em baixas condições e desorvendo em temperaturas e pressões elevadas (Dhoke *et al.*, 2019a).

O Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) utiliza quatro reatores alinhados, modelados como tanques agitados continuamente, para otimizar a captura de CO<sub>2</sub>. Seu ciclo operacional envolve as etapas de carbonatação, evacuação, regeneração e resfriamento, com variações controladas de temperatura e pressão para maximizar a eficiência energética. Durante a operação, a temperatura do reator oscila em 8°C, enquanto a pressão varia em 0,9 bar entre as fases de carbonatação e regeneração. No estágio de regeneração, a pressão é mantida em 0,1 bar, enquanto a temperatura aumenta de 60°C para 80°C, resultando em um fluxo significativo de CO<sub>2</sub> desorvido (Cloete *et al.*, 2019).

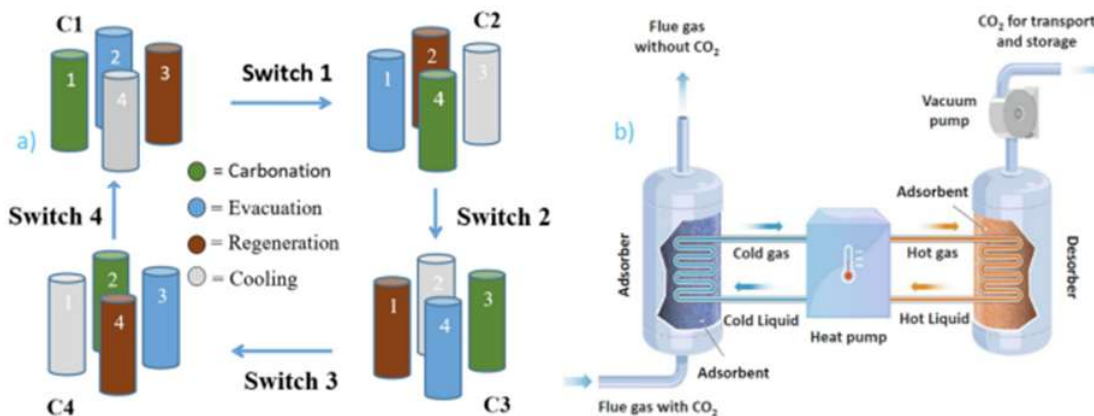
Esse sistema é capaz de capturar até 90% do CO<sub>2</sub> presente nos gases de combustão. A área de transferência de calor nos reatores influencia na eficiência do processo, podendo ser otimizada por meio do ajuste no tamanho do reator ou na disposição dos tubos de transferência de calor. Além disso, a bomba de calor transfere energia entre os reatores, contribuindo para uma maior eficiência energética.

O uso de um vácuo de 0,1 bar simplifica a regeneração do sorvente, permitindo um processo eficiente sem a necessidade de adsorção por vácuo em duas etapas (VSA) (Dhoke *et al.*, 2019a).

O custo para evitar as emissões de CO<sub>2</sub> é avaliado por meio do SPECCA (Specific Primary Energy Consumption for CO<sub>2</sub> Avoided), que, no caso do SARC, é de 2,04 MJ/kg de CO<sub>2</sub>. (Cloete *et al.*, 2019).

Na Figura 4, um diagrama típico de um sistema SARC para a captura de CO<sub>2</sub>.

Figura 4 - Exemplo de um sistema SARC



Fonte: Cloete et al. (2019)

## 2.4 MEMBRANAS

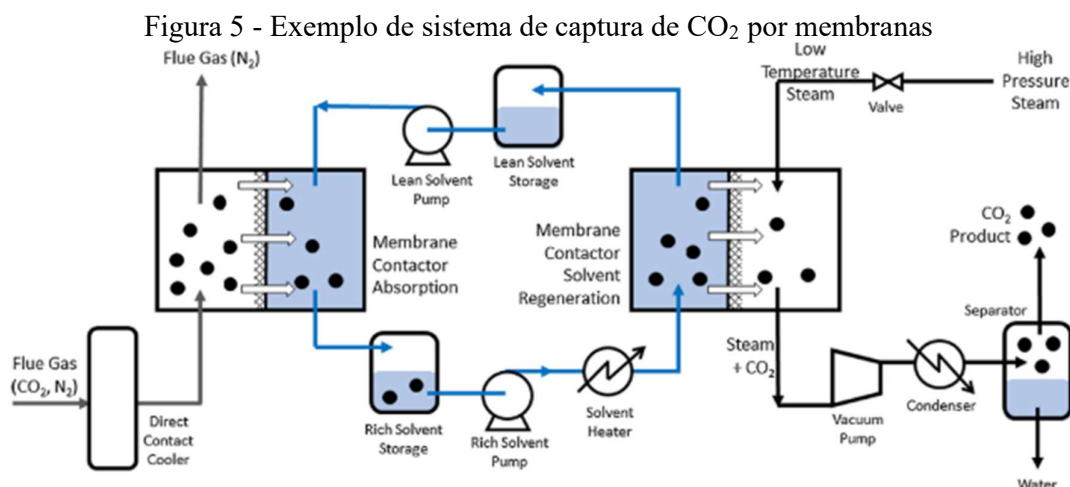
Para a captura de dióxido de carbono por membranas, o gás de combustão passa por uma membrana seletiva, onde o CO<sub>2</sub> é permeado, enquanto gases como N<sub>2</sub> são retidos. Esse procedimento pode ser repetido para alcançar maior pureza do CO<sub>2</sub>. No contexto da captura de CO<sub>2</sub>, as membranas são aplicadas em processos multietapas, aumentando a eficiência da separação (Zhao *et al.*, 2010).

A pesquisa sobre membranas na captura de CO<sub>2</sub> concentra-se no aprimoramento da seletividade e permeabilidade desses materiais, visando otimizar a separação do CO<sub>2</sub> de outros gases, como N<sub>2</sub>. Diversas abordagens têm sido exploradas, incluindo o uso de materiais inovadores e novas técnicas de fabricação para melhorar o desempenho das membranas (Chabanon *et al.*, 2014a).

Os materiais utilizados na fabricação de membranas incluem polímeros, estruturas inorgânicas e compósitos híbridos (Muldoon *et al.*, 2020).

Além disso, o design do processo pode incluir a reciclagem do gás residual, e o uso de bombas de vácuo e compressores que auxiliam na força motriz necessária para a separação, especialmente em gases de combustão à pressão ambiente e baixa concentração de CO<sub>2</sub> (Zhao *et al.*, 2010). A avaliação econômica e energética desses sistemas é essencial para sua viabilidade em larga escala, sendo frequentemente comparados à absorção química (Zhou *et al.*, 2019). Em processos de duas etapas, utilizando membranas altamente seletivas, a concentração máxima de CO<sub>2</sub> alcançada pode atingir 95% em base seca (Song *et al.*, 2017).

Na Figura 5, um diagrama típico de um sistema para a captura de CO<sub>2</sub>, por membranas.



Fonte: (Scholes; Kentish; Qader, 2020)

## 2.5 OXI-COMBUSTÍVEL

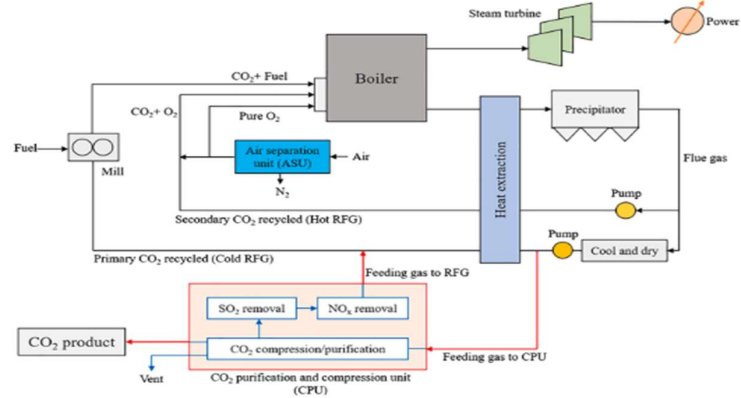
Conforme definido no trabalho de (Xu *et al.*, 2021b), o processo de combustão com oxí-combustível, o combustível fóssil é queimado em uma caldeira usando uma mistura gasosa composta por oxigênio puro e gases de combustão que retornam para a fornalha, em vez de ar atmosférico. Isso resulta em uma corrente de gases de combustão com elevada concentração de CO<sub>2</sub>.

De acordo com o estudo de (Scholes; Kentish; Qader, 2020) que aborda o uso de membrana como uma alternativa eficiente e de formato compacto para a captura de CO<sub>2</sub> em processos de pós-combustão. Essa tecnologia pode ser integrada a usinas de energia já em operação, principalmente por apresentar baixa perda energética, boa relação custo-benefício e exigir pouco espaço físico para instalação.

Conforme (Damiani *et al.*, 2012), as tecnologias de oxí-combustão empregam oxigênio de alta pureza na queima de combustíveis fósseis, visando a captura e o sequestro de CO<sub>2</sub>, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Pesquisas indicam que esse processo resulta na redução das emissões de NO<sub>x</sub> e influencia a variação nas formas de mercúrio liberadas durante a combustão.

A Figura 6 abaixo traz uma comparação entre as tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> em termos de consumo de energia para a captura de CO<sub>2</sub>, uma das únicas encontradas na literatura, feita por (Dhoke *et al.*, 2019a).

Figura 6 - Exemplo de sistema de captura de CO<sub>2</sub> por oxi-combustão



Fonte: (Xu *et al.*, 2021a)

## **2.6 BIOMASSA**

A biomassa é uma fonte de energia renovável derivada de matéria orgânica de origem vegetal ou animal, utilizada na geração de calor, eletricidade e biocombustíveis. Sua conversão energética pode ocorrer por diferentes processos, como combustão, gaseificação e pirólise, promovendo o aproveitamento sustentável de resíduos agrícolas e industriais. Dentre os benefícios associados ao uso da biomassa, destacam-se a redução da dependência de combustíveis fósseis, a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e o estímulo ao desenvolvimento econômico regional, promovendo a geração de empregos ao longo de sua cadeia produtiva. No entanto, para garantir a viabilidade sustentável dessa fonte de energia, é essencial adotar práticas adequadas de gestão dos recursos, prevenindo impactos ambientais adversos, como desmatamento e degradação do solo (Ministério de Minas e Energia (Brasil), 2022)

## 2.7 CALDEIRAS

De acordo com (Imtab, 2025), as caldeiras são dispositivos essenciais na indústria, responsáveis por gerar vapor através da transferência de calor proveniente da combustão para a água. Elas são utilizadas em setores como frigoríficos, madeireiras, laticínios, termelétricas, petroquímicas, alimentícias, metalúrgicas e têxteis. Conforme a circulação de água e gases de combustão, as caldeiras podem ser classificadas em três tipos principais: flamotubulares, aquatubulares e mistas. Além disso, elas podem operar com diversos combustíveis, incluindo biomassa, óleo, gás natural e calor residual de processos industriais.

## 2.8 PRECIPITADO DE CARBONATO DE CÁLCIO (PCC)

De acordo com (Ventura Oliveira Orientador; Henriques Martins, 2005), o Precipitado de Carbonato de Cálcio (PCC) é preferido na indústria de papel devido à sua morfologia controlável e pureza superior, sendo quimicamente sintetizado, ao contrário do carbonato de cálcio natural (GCC), que é obtido por moagem de rochas calcárias.

A produção de PCC ocorre principalmente por meio das rotas sólido-líquido e sólido-líquido-gás. O método mais empregado na indústria de papel envolve a carbonatação de uma suspensão de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) com dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Esse  $\text{CO}_2$ , normalmente proveniente de fornos ou caldeiras instalados nas fábricas, reage com a solução de hidróxido de cálcio, formando partículas finamente dispersas de PCC com alta brancura e opacidade (Ghiasi et al., 2020), (Kuparinen; Vakkilainen; Tynjälä, 2019).

Além de aumentar a brancura e a opacidade do papel, o PCC também substitui parcialmente as fibras de celulose, reduzindo o custo da produção sem comprometer a qualidade do material final (Pruszynski, 2016).

### 3. CONCLUSÃO

Dentre as abordagens estudadas, destacou-se a importância do avanço científico e tecnológico para aprimorar as estratégias de captura de CO<sub>2</sub>, promovendo sua aplicação em processos industriais.

A absorção química com aminas é a tecnologia mais consolidada, embora apresente desafios relacionados ao alto consumo energético. Alternativas como adsorção, separação por membranas e oxi-combustão demonstram potencial, mas ainda enfrentam dificuldades na integração industrial, nos custos operacionais, custos de aquisição e instalação de equipamentos. Nesse contexto, os sistemas de Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC), embora ainda não seja a tecnologia que possui menor impacto energético, é promissora em apresentar potencial de integração com indústrias em funcionamento.

#### 4. REFERÊNCIAS

ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DA AERONÁUTICA E ESPAÇO (NASA). What Is Climate Change?. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://science.nasa.gov/climate-change/what-is-climate-change>. Acesso em: 4 jan. 2025.

BASTOS DE SANTANA, Milena *et al.* Captura de carbono: avanços e desafios das tecnologias no contexto energético. *Latin American Journal of Energy Research*, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 264–282, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/lajer/article/view/46936>.

CHABANON, E. *et al.* Hollow fiber membrane contactors for post-combustion CO<sub>2</sub> capture: A scale-up study from laboratory to pilot plant. *Oil and Gas Science and Technology*, [s. l.], v. 69, n. 6, p. 1035–1045, 2014.

CLOETE, Schalk *et al.* Heat pump-driven adsorption CO<sub>2</sub> capture for simple and cost-effective retrofits of coal power plants. *Applied Thermal Engineering*, [s. l.], v. 236, 2024.

CLOETE, Schalk *et al.* The swing adsorption reactor cluster for post-combustion CO<sub>2</sub> capture from cement plants. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 223, p. 692–703, 2019.

DAMIANI, Darin *et al.* The US Department of Energy's R&D program to reduce greenhouse gas emissions through beneficial uses of carbon dioxide. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 9–16, 2012.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Study of the Cost Reductions Achievable from the Novel SARC CO<sub>2</sub> Capture Concept Using a Validated Reactor Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 60, n. 33, p. 12390–12402, 2021.

DHOKE, Chaitanya *et al.* The swing adsorption reactor cluster (SARC) for post combustion CO<sub>2</sub> capture: Experimental proof-of-principle. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 377, 2019.

EWERT, Günter *et al.* Degradations- und Energieverhalten reaktiver Amin-Lösungen bei der CO<sub>2</sub>-Absorption/Desorption. *Chemie-Ingenieur-Technik*, [s. l.], v. 83, n. 12, p. 2121–2130, 2011.

GHIASI, Meisam *et al.* Control of the morphology, specific surface area and agglomeration of precipitated calcium carbonate crystals through a multiphase carbonation process. *CrystEngComm*, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 1970–1984, 2020.

IMTAB. Tipos de caldeiras industriais: classificação e diferenças. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://blog.imtab.com.br/tipos-de-caldeiras/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Renewable Fuels – Renewables 2024. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/renewable-fuels>. Acesso em: 4 jan. 2025.

KUPARINEN, Katja; VAKKILAINEN, Esa; TYNJÄLÄ, Tero. Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, [s. l.], v. 24, n. 7, p. 1213–1230, 2019.

LEGKOV, Sergey A. *et al.* Structural Features of Monoethanolamine Aqueous Solutions with Various Compositions: A Combined Experimental and Theoretical Study Using Vibrational Spectroscopy. *Molecules*, [s. l.], v. 28, n. 1, 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (BRASIL). Biomassa: resíduos que são transformados em energia. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biomassa-residuos-que-sao-transformados-em-energia>. Acesso em: 4 jan. 2025.

MULDOON, Patrick F. *et al.* Mixed Matrix Membranes from a Microporous Polymer Blend and Nanosized Metal-Organic Frameworks with Exceptional CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation Performance. *ACS Materials Letters*, [s. l.], v. 2, n. 7, p. 821–828, 2020.

OLAJIRE, Abass A. CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications - A review. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2010.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). As emissões de metano estão impulsionando a mudança climática: veja como reduzi-las. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/emissoes-de-metano-estao-impulsionando-mudanca-climatica-veja>. Acesso em: 4 jan. 2025.

PRUSZYNSKI, Przemyslaw. Recent developments in papermaking chemicals. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/287528124>. .

RAO, Anand B.; RUBIN, Edward S. A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO<sub>2</sub> capture technology for power plant greenhouse gas control. *Environmental Science and Technology*, [s. l.], v. 36, n. 20, p. 4467–4475, 2002.

RIBEIRO, R. P.P.L.; GRANDE, C. A.; RODRIGUES, A. E. Activated carbon honeycomb monolith - Zeolite 13X hybrid system to capture CO<sub>2</sub> from flue gases employing Electric Swing Adsorption. *Chemical Engineering Science*, [s. l.], v. 104, p. 304–318, 2013.

SANDHU, Navjot Kaur *et al.* Steam Regeneration of Polyethylenimine-Impregnated Silica Sorbent for Postcombustion CO<sub>2</sub> Capture: A Multicyclic Study. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 55, n. 7, p. 2210–2220, 2016.

SCHOLES, Colin A.; KENTISH, Sandra E.; QADER, Abdul. Membrane gas-solvent contactor pilot plant trials for post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *Separation and Purification Technology*, [s. l.], v. 237, 2020.

SONG, Chunfeng *et al.* Reducing the energy consumption of membrane-cryogenic hybrid CO<sub>2</sub> capture by process optimization. *Energy*, [s. l.], v. 124, p. 29–39, 2017.

THIRION, Damien *et al.* Robust C-C bonded porous networks with chemically designed functionalities for improved CO<sub>2</sub> capture from flue gas. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, [s. l.], v. 12, p. 2274–2279, 2016.

UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA (UDOP). Concentração de carbono na atmosfera está 50% maior do que a pré-industrial. [S. l.], 2022. Disponível em:

<https://www.udop.com.br/noticia/2022/06/07/concentracao-de-carbono-na-atmosfera-esta-50-maior-do-que-a-pre-industrial.html>. Acesso em: 4 jan. 2025.

VENTURA OLIVEIRA ORIENTADOR, Felipe; HENRIQUES MARTINS, Afonso. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. [S. l.: s. n.], 2005.

XU, Ming Xin *et al.* Design and evaluation of a novel system for the flue gas compression and purification from the oxy-fuel combustion process. *Applied Energy*, [s. l.], v. 285, n. December 2020, p. 116388, 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116388>.

XU, Ming Xin *et al.* Design and evaluation of a novel system for the flue gas compression and purification from the oxy-fuel combustion process. *Applied Energy*, [s. l.], v. 285, 2021b.

ZHAO, Li *et al.* Multi-stage gas separation membrane processes used in post-combustion capture: Energetic and economic analyses. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 359, n. 1–2, p. 160–172, 2010.

ZHOU, Yuming *et al.* Mercury adsorption and oxidation over magnetic biochar in oxyfuel combustion atmosphere: Impact of enriched CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. *Fuel*, [s. l.], v. 251, p. 458–465, 2019.

ZHU, Dechen *et al.* Selection of blended solvents for CO<sub>2</sub> absorption from coal-fired flue gas. Part 1: Monoethanolamine (MEA)-based solvents. *In:* , 2012. *Energy and Fuels*. [S. l.: s. n.], 2012. p. 147–153.



# CAPÍTULO 2

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional, a demanda por energia aumenta, o que intensifica o uso de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, eleva as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global. Em resposta, em 2016, 194 países assinaram o Acordo de Paris, comprometendo-se a reduzir o uso de combustíveis fósseis e limitar o aquecimento global a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais. Em resposta, (Saidur *et al.*, 2011), em seu trabalho relatou que a utilização crescente de biomassa para geração de energia tem sido uma das alternativas consideradas para mitigar essas emissões.

Entre as principais preocupações está a gestão e redução eficaz das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um dos principais contribuintes para o aquecimento global. De acordo com o (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC)., 2018), ressalta-se que a mitigação eficaz das mudanças climáticas causadas pelas emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> dependerá em grande parte da captura, utilização e armazenamento de CO<sub>2</sub> (Liu *et al.*, 2019) e (Dhoke *et al.*, 2019b)

Em indústrias de transformação, uma boa parte das emissões de gases de efeito estufa provém da geração de vapor, que é utilizado, entre outras aplicações, para aquecer sistemas, concentrar produtos, destilar líquidos e gerar energia. Para a produção desse vapor, é necessária a queima de combustível. Com base no exemplo dos Estados Unidos, 37% desse combustível utilizado para a geração de vapor é de origem fóssil (Saidur *et al.*, 2011).

A captura de CO<sub>2</sub> dos gases de combustão é essencial para o gerenciamento de carbono e a sequestração. Segundo (Olajire, 2010) as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser reduzidas por meio de três tecnologias principais de captura: pós-combustão, pré-combustão e combustão com oxigênio. Cada uma dessas abordagens oferece vantagens e limitações que são cruciais para uma avaliação eficaz da mitigação climática.

Dessa maneira, foi realizada uma revisão qualitativa neste trabalho e quantitativa na literatura científica para o tema captura de CO<sub>2</sub>, permitindo a avaliação dos trabalhos já realizados e a indicação dos futuros que possam mitigar a emissão de CO<sub>2</sub>, principalmente no segmento industrial, objetivando responder essas 2 perguntas: Quais são as tecnologias disponíveis para a captura de CO<sub>2</sub> de uma instalação industrial? Qual é o melhor custo-benefício para captura de CO<sub>2</sub> a partir de gases de combustão?



## 2. METODOLOGIA

Para a análise dos trabalhos científicos, foi dividida a abordagem em duas etapas. A primeira atrelada a revisão bibliométrica, que visa avaliar quantitativamente esses trabalhos, com informações geográfica das publicações, concentração das publicações ao longo do tempo, co-ocorrência e sinergia entre os trabalhos e outros (Veloso, 2024). E a segunda abordagem, com uma a revisão sistemática, que visa a análise crítica dos trabalhos selecionados, através da leitura dos mesmos e a interrelação com o tema que é a tecnologia de captura de CO<sub>2</sub> e como ela se integra a uma instalação industrial.

Os artigos foram selecionados, seguindo as diretrizes do PRISMA-P (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), e as buscas foram realizadas no dia 08/07/2024 na plataforma de periódicos do portal CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e base de dados e coleções do Web of Science, conforme fluxo demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios para busca sistematizada.

| Palavras-chave  | Base de dados  | Filtros para busca                              |
|---|----------------|---|
| “CO <sub>2</sub> capture” or “Captura de CO <sub>2</sub> ” and “Flue Gas” or “Gases de Combustão” | Web of Science | Palavras-chave presentes no título ou no resumo |

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

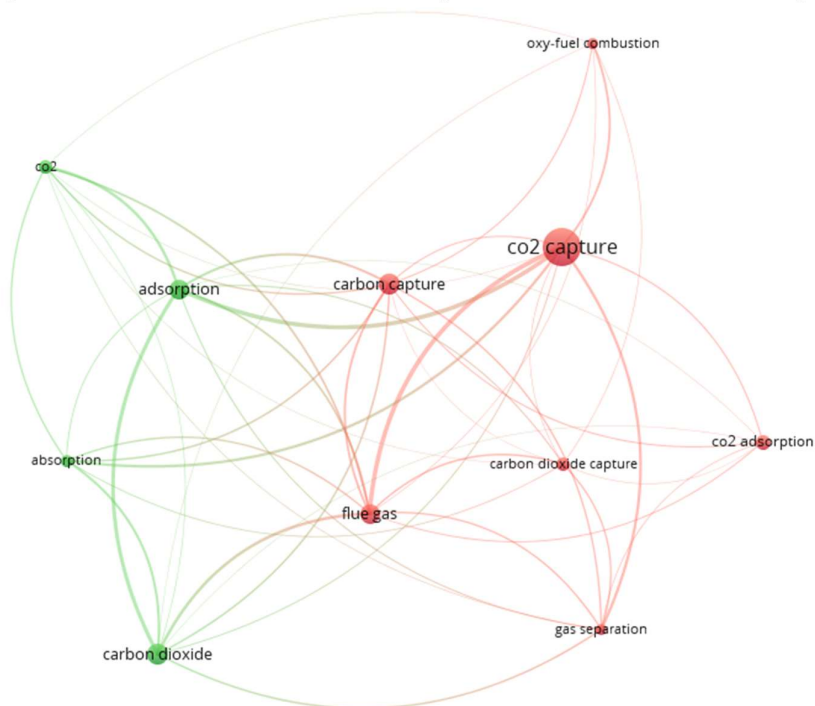


A definição do limite temporal da pesquisa, a partir de 1997, deu-se devido ao marco da assinatura do protocolo de Quioto, que representa um tratado global com objetivo de diminuir

as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa por parte dos países industrializados, estabelecendo uma obrigação legal de redução de pelo menos 5% em comparação aos níveis de 1990. Esse período de 27 anos (1997-2023), mostra as tendências de pesquisas atreladas a captura de CO<sub>2</sub> (Protocolo de Quioto Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil, [s. d.]

Para assegurar que todos os artigos relacionados à revisão bibliométrica estivessem dentro dos 6.228 artigos encontrados na busca no Web of Science, foi criada uma análise de co-ocorrência, utilizando o software VOSviewer, versão 1.60.20, utilizando exclusivamente as palavras-chave atribuídas pelos autores dos 6.228 artigos. A partir desse procedimento, identificaram-se 9.289 termos, dos quais apenas aqueles com frequência superior a 100 foram mantidos, resultando em um conjunto de 11 palavras. Essas 11 novas palavras serviram como descritores em uma nova busca na plataforma Web of Science. Somente as 5 primeiras palavras foram selecionadas como novos descritores da busca. A Figura 7 traz as informações sobre os grafos de co-ocorrência das palavras-chave dos 6.228 artigos.

Figura 7 - Grafo de co-ocorrência das palavras-chave dos 6.228 artigos.



Fonte: Elaborada pelo autor

A nova busca, com essas 5 novas palavras, vide tabela 2, resultou em 2.307 documentos, dos quais foram restringidos para apenas artigos, totalizando 2.032. Após uma filtragem temporal entre 1997 e 2023, restaram 1.914 artigos.

Uma análise comparativa manual verificou-se que esses 1.914 artigos estavam contidos no conjunto inicial de 6.228 artigos, assegurando que a seleção inicial foi abrangente e consistente com o tema.

As 5 primeiras palavras que apareceram na análise de co-ocorrência aparecem na Tabela 2, e foram elas as utilizadas como descritores no Web of Science.

Tabela 2 - Palavras de co-ocorrência dos 6.228 artigos.

| <b>Palavras</b>            | <b>Co-ocorrência</b> |
|----------------------------|----------------------|
| Captura de CO <sub>2</sub> | 1111                 |
| Captura de Carbono         | 341                  |
| Dióxido de Carbono         | 332                  |
| Gás de Exaustão            | 311                  |
| Adsorção                   | 303                  |

Fonte: Elaborada pelo autor

## 2.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A partir das palavras chaves, 8.154 arquivos foram selecionados para participarem da revisão bibliométrica. Para refinar a pesquisa, apenas os artigos foram selecionados, o critério de limitação do tempo, de 1997 a 2023 reduziu a quantidade de artigos para 6.228 e por meio da utilização do software VOSviewer, versão 1.60.20, foi possível a geração co-ocorrências entre palavras, autores e países para a análise de dados. Para maior robustez das análises, foram inseridas referências dos principais periódicos que publicaram a respeito da captura de CO<sub>2</sub> e sua respectiva relevância para a área (fator de impacto), inserido também a concentração de publicações por área de conhecimento, concentração de publicação ao longo dos anos, desde 1997 até 2023, a concentração das publicações por país e a concentração de publicação no Brasil, por ano, instituições e palavras-chave. A subdivisão para o Brasil deu-se para avaliar se as pesquisas nacionais estavam seguindo a mesma tendência mundial, para o tema.

## 2.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

Conforme metodologia utilizada por (Veloso, 2024) , as Equações 1 e 2 foram utilizadas para cálculo amostral, onde obteve-se o tamanho da amostra de 362 artigos necessários para a leitura.

A seleção dos artigos que compuseram a amostra de 362 documentos foi realizada com o uso do MS-Excel. Primeiramente, os 6.228 artigos foram listados e numerados aleatoriamente por meio da fórmula "ALEATÓRIO". Em seguida, utilizando a função "ORDEM", os artigos foram organizados em ordem crescente, e os primeiros 362 foram selecionados para a etapa de análise sistemática. A listagem completa pode ser verificada no Anexo 1.

$$n = \frac{Z^2 \times p \times (1 - p)}{E^2} \quad (\text{Eq.1})$$

$$n1 = \frac{N \times n}{N + n} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde:

**n** = primeira aproximação do tamanho da amostra

**Z** = valor da distribuição normal padrão, correspondente ao nível de confiança de 95%

**p** = proporção estimada da população

**E** = margem de erro (expressa como decimal)

**n1** = tamanho da amostra

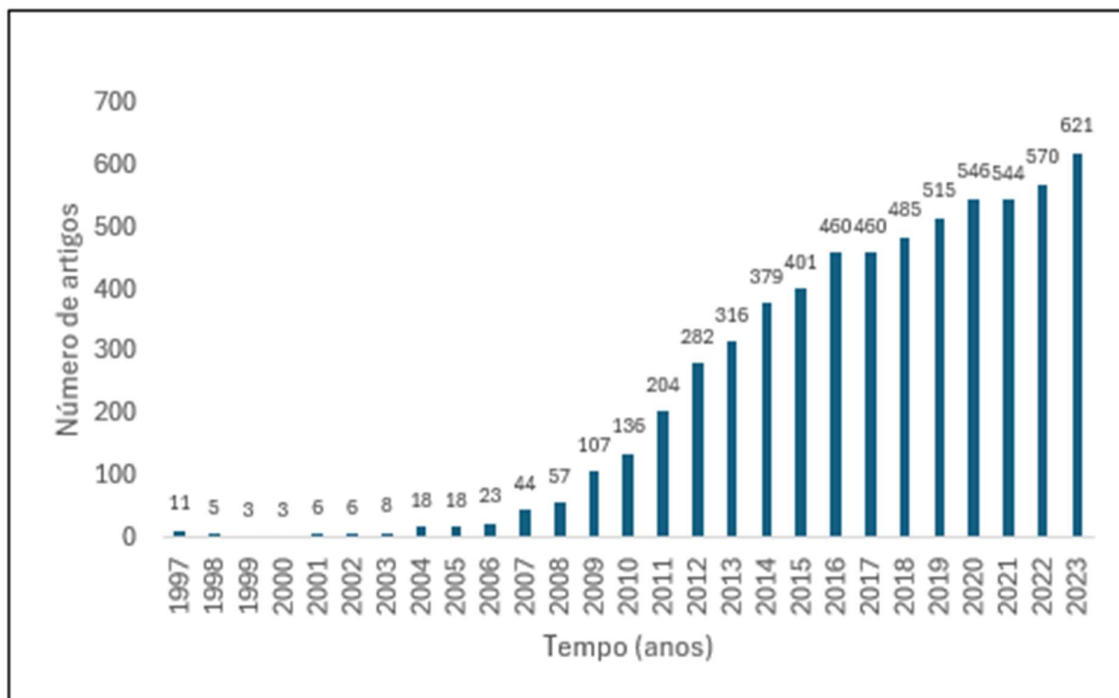
**N** = tamanho da população

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A partir dos 6.228 artigos selecionados, foi possível verificar as publicações ao longo do período pré-selecionado (1997-2023). A Figura 8 abaixo retrata a distribuição dos artigos referente a captura de CO<sub>2</sub>, nos últimos 27 anos.

Figura 8 - Distribuição dos 6.228 artigos publicados sobre captura de CO<sub>2</sub> nos últimos 27 anos



Fonte: Elaborada pelo autor

A análise da distribuição dos artigos publicados nos últimos 27 anos, mostram que houve um aumento a partir de 2003. Esse aumento pode estar relacionado à latência entre as assinaturas do tratado e o início de fato do compromisso, que passou a vigorar a partir de 2005.

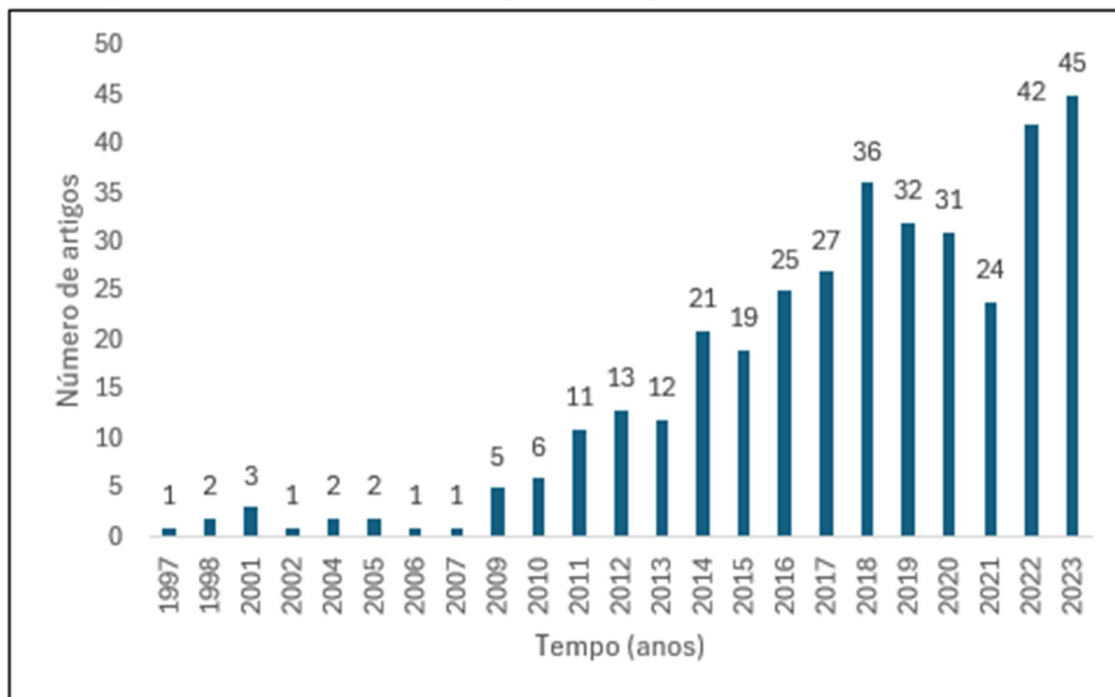
Este contexto, incentivou a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para mitigar as emissões, incluindo a captura e armazenamento de carbono, como uma forma de ajudar os países a cumprirem suas metas de redução de emissões.

Nos últimos 6 anos, de 2018 a 2023, a quantidade de pesquisas relacionadas ao tema captura de CO<sub>2</sub>, totalizaram 52,68% de todas as publicações dos últimos 27 anos, o que demonstra uma preocupação crescente com o tema do aquecimento global.

Uma vez que a análise sistemática foi realizada em cima de 362 artigos amostrados, fez-se uma análise da distribuição temporal desses 362 artigos, conforme ilustrado na Figura 9, onde verificou-se um padrão de crescimento consistente e análogo ao observado nos 6.228

artigos totais do estudo, reforçando a representatividade da amostra em relação ao conjunto completo de publicações.

Figura 9 - Distribuição dos 362 artigos sobre captura de CO<sub>2</sub> nos últimos 27 anos.



Fonte: Elaborada pelo autor

Dos 6.228 artigos classificados, foram verificadas 47 áreas diferentes, conforme categorias do Web of Science. Devido a quantidade de áreas, a Tabela 3 a seguir mostra os 10 primeiros colocados.

Tabela 3 - Categorias com maior número de publicações para o tema captura de CO<sub>2</sub>

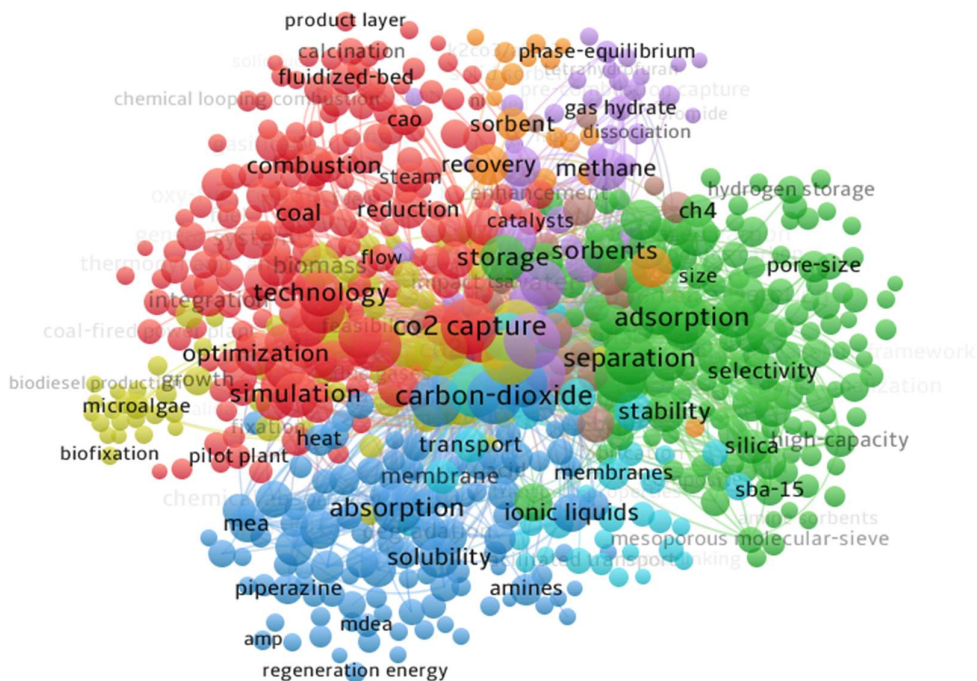
| Categorias Web of Science                | Contagem artigos |
|--|------------------|
| Engenharia Química                       | 3448             |
| Energia e Combustíveis                   | 2146             |
| Engenharia Ambiental                     | 1211             |
| Química Multidisciplinar                 | 927              |
| Ciência e Tecnologia Verde e Sustentável | 800              |
| Química Física                           | 769              |
| Ciência dos Materiais Multidisciplinar   | 611              |
| Ciências Ambientais                      | 537              |
| Termodinâmica                            | 483              |
| Nanociência e Nanotecnologia             | 276              |

Fonte: Elaborada pelo autor

Na análise dos dados, realizada através do VOSviewer, foram geradas visualizações de co-ocorrência das palavras mais recorrentes nos artigos. A ilustração gerada, denominada ‘grafos’, permite verificar a proximidade entre os termos, a quantidade de conexões que cada termo possui. Já o cluster no qual está inserido e indica uma área ou tema distinto (Velo, 2024).

Foram encontradas 14.099 palavras chaves para a criação do grafo e apenas aquelas que foram mencionados mais de quinze vezes foram selecionados, resultando em 626 palavras, em 4 cluster, conforme Figura 10 e Tabela 4 a seguir:

Figura 10 - Grafo de co-ocorrência



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4 - Informações obtidas sobre os clusters de ocorrência de palavras formados, principais termos e áreas relacionadas.

| <b>Identificação dos Clusters</b> | <b>Quantidade de termos</b> | <b>Principais termos</b>  | <b>Áreas de conhecimento (Web of Science)</b>   |
|-----------------------------------|-----------------------------|---|---|
| 1<br>(Vermelho)                   | 184                         | Captura de CO <sub>2</sub> ,<br>Captura de carbono<br>Tecnologia,<br>Simulação,<br>Otimização | Engenharia<br>Química, Energia<br>e Combustíveis,<br>Engenharia<br>Ambiental,<br>Ciência e<br>Tecnologia<br>Verde e<br>Sustentável,<br>Ciências<br>Ambientais |
| 2<br>(Verde)                      | 150                         | Adsorção<br>Separação,<br>Captura de<br>Dióxido de<br>Carbono,<br>Adsorventes,<br>Estocagem   | Engenharia<br>Química,<br>Química Física,<br>Energia e<br>Combustíveis,<br>Ciência dos<br>Materiais<br>Multidisciplinar<br>Engenharia                         |
| 3<br>(Azul)                       | 112                         | Adsorção,<br>Dióxido de<br>carbono<br>Absorção,<br>Cinética,<br>Remoção,<br>Solubilidade      | Química, Energia<br>e Combustíveis,<br>Engenharia<br>Ambiental,<br>Ciência e<br>Tecnologia<br>Verde e<br>Sustentável e<br>Termodinâmica<br>Engenharia         |
| 4<br>(Amarelo)                    | 66                          | Captura, CO <sub>2</sub> ,<br>Dióxido de<br>carbono,<br>Dióxido, Gás de<br>combustão          | Química, Energia<br>e Combustíveis,<br>Engenharia<br>Ambiental e<br>Química<br>Multidisciplinar   |

Fonte: Elaborada pelo autor

Importante ressaltar que existem categorias muito abrangentes, que podem cobrir outras áreas, o que é o caso da Engenharia Química e Combustível e Energia. De qualquer maneira, a

área de engenharia química é a área que mais está trabalhando com tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, com simulação de processos e otimização como aplicações diretas.

Quanto aos periódicos, foram contabilizados 2345 itens, dos quais os 10 primeiros foram elencados, conforme Tabela 5.

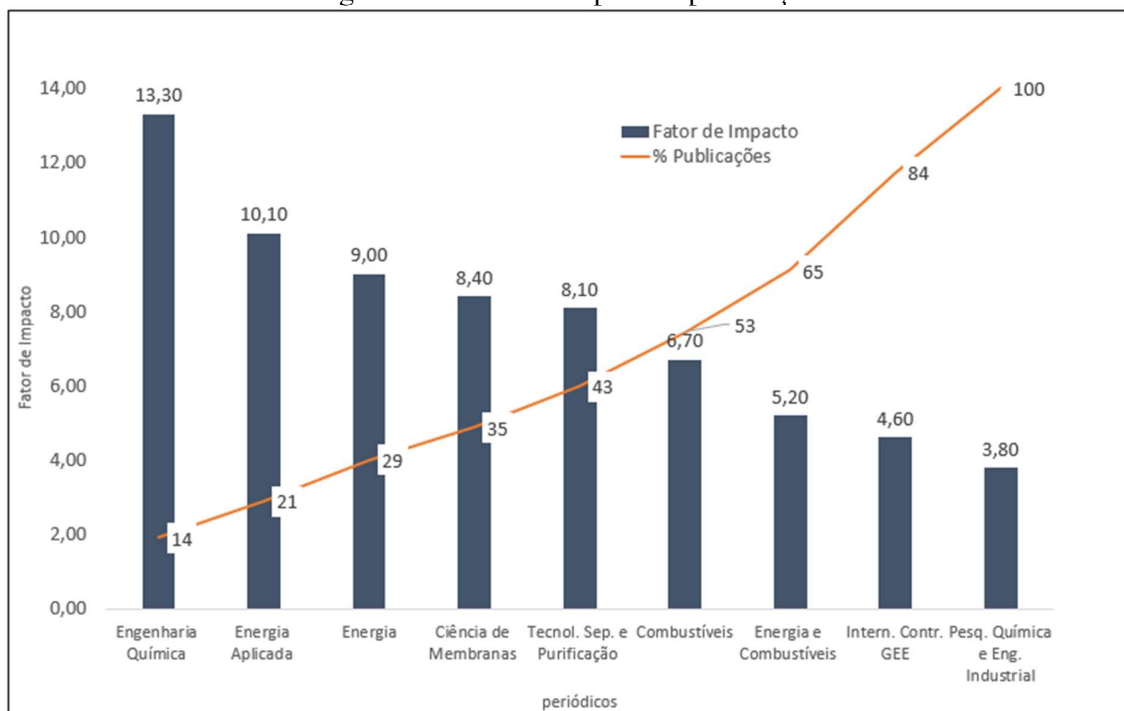
Tabela 5 - Dez principais periódicos que publicam sobre a captura de CO<sub>2</sub>, no cenário mundial, e suas respectivas classificações nas áreas de conhecimento.

| <b>Periódicos</b>                     | <b>Fator de impacto 2023</b> | <b>Áreas de conhecimento</b> | <b>Quantidade de artigos</b> |
|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Revista de Engenharia Química         | 13,3                         | Engenharia, Química          | 318                          |
| Energia e Combustíveis                | 5,2                          | Energia & Combustíveis       | 278                          |
| Combustíveis                          | 6,7                          | Energia & Combustíveis       | 244                          |
| Energia                               | 9                            | Energia & Combustíveis       | 188                          |
| Tecnologia de Separação e Purificação | 8,1                          | Engenharia, Química          | 184                          |
| Energia Aplicada                      | 10,1                         | Energia & Combustíveis       | 165                          |
| Revista de Ciência de Membranas       | 8,4                          | Engenharia, Química          | 145                          |

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 11 correlaciona os periódicos, o fator de impacto e a quantidade de artigos.

Figura 11 - Fator de impacto x publicações



Fonte: Elaborada pelo autor

Dos periódicos selecionados é possível verificar que 2 deles possuem fator de impacto acima de 10 e 5 deles com classificação acima de 5, o que denota que os artigos estão sendo publicados em instituições reconhecidas e bem-posicionadas no cenário mundial, o que serve de incentivo a continuar as pesquisas atreladas a captura de CO<sub>2</sub>.

A Tabela 6, mostra os 10 países mais bem posicionados em relação a concentração das publicações, mais o Brasil. Ao todo 92 países publicaram nos últimos 27 anos (1997-2023).

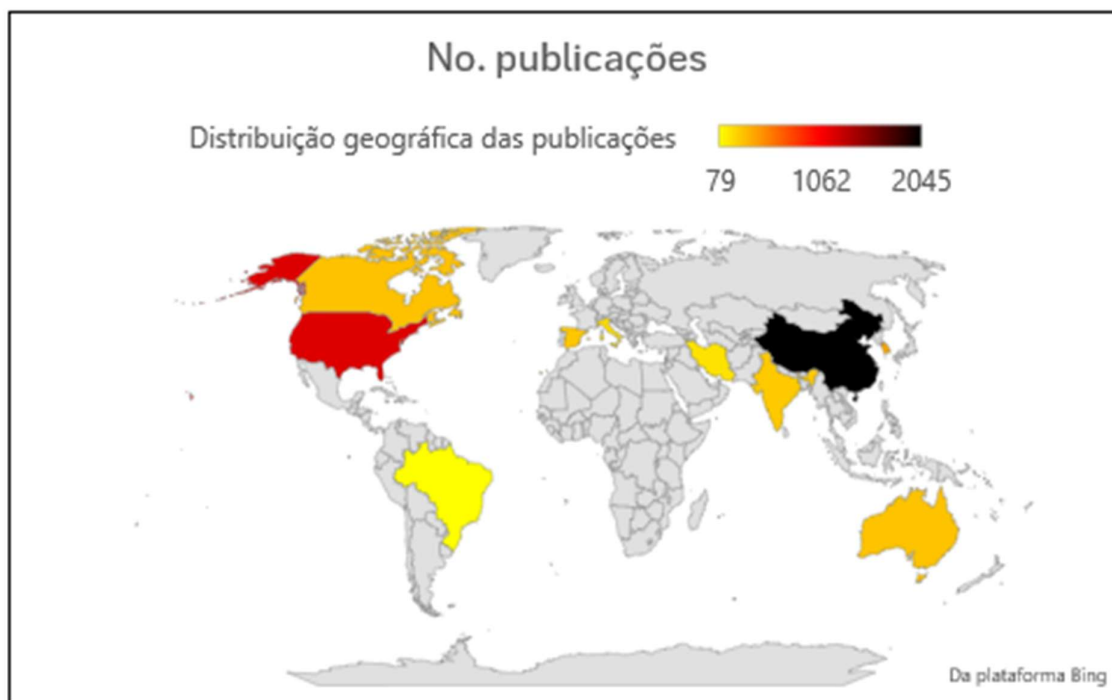
Tabela 6 - Distribuição das publicações sobre o tema nos países do mundo.

| Países/Regiões | Quantidade de arquivos | % de 6.228 |
|----------------|------------------------|------------|
| China          | 2045                   | 32,8       |
| EUA            | 1191                   | 19,1       |
| Coréia do Sul  | 414                    | 6,6        |
| Inglaterra     | 337                    | 5,4        |
| Canada         | 315                    | 5,1        |
| Austrália      | 307                    | 4,9        |
| Espanha        | 296                    | 4,8        |
| Índia          | 282                    | 4,5        |
| Itália         | 206                    | 3,3        |
| Irã            | 186                    | 3,0        |
| Brasil         | 79                     | 1,3        |

Fonte: Elaborada pelo autor

Já a Figura 12 traz o mapa dos 10 países mais bem colocados em publicações sobre o tema ao redor do mundo, incluindo o Brasil.

Figura 12 - Mapa coroplético dos 10 países com maior número de publicações, incluindo o Brasil.



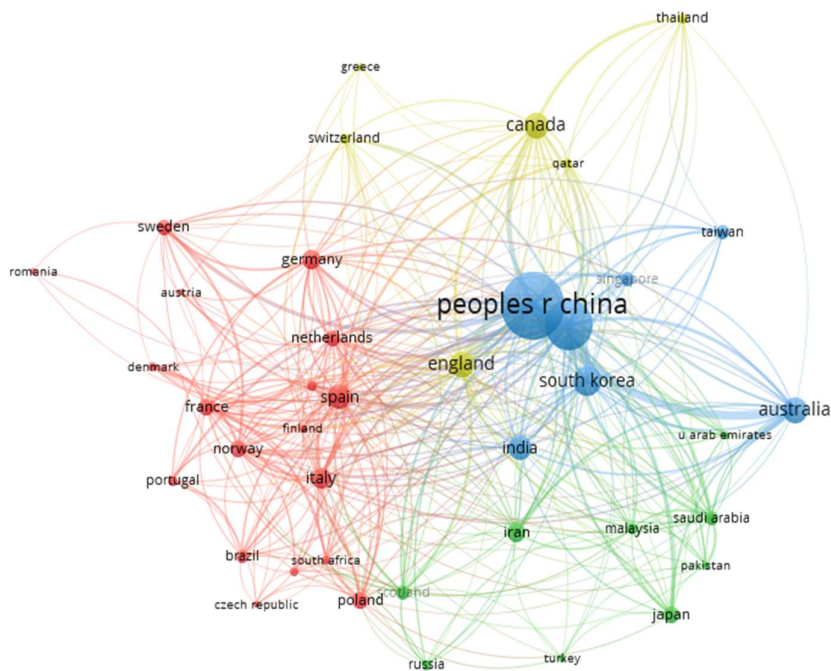
Fonte: Elaborada pelo autor

Países industrializados, como China e Estados Unidos, juntos ultrapassam 51% das publicações sobre captura de CO<sub>2</sub>, o que demonstra suas preocupações com o tema. Nesse sentido, o grafo de co-autoria foi gerado a fim de analisar a colaborações entre eles e os demais países. Parametrizou-se no sistema de busca do VOSviewer o máximo 5 países por documento e o máximo de 20 artigos por país, com isso o número de países analisados reduziu-se de 92 para 40 países.

O Brasil, com 79 publicações no período (1,27%), aparece na 22<sup>a</sup> posição. Mais adiante abordaremos com mais detalhes a contribuição do Brasil no cenário mundial.

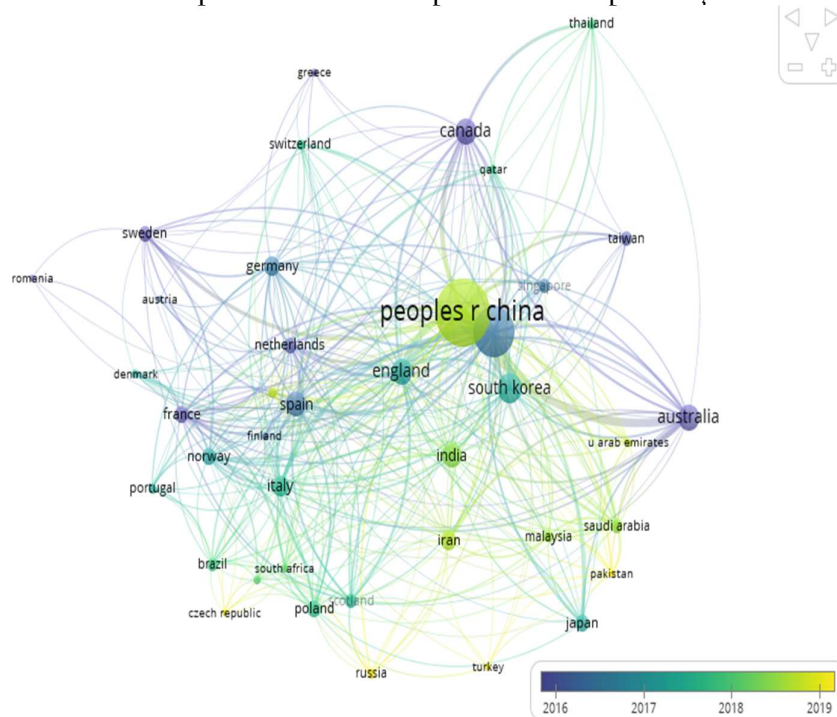
A Figura 13 traz a co-autoria entre os países e a Figura 14 os detalhes para média de publicações em relação ao tempo.

Figura 13 - Co-autoria entre países



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 14 - Co-autoria entre países com detalhe para média de publicações em relação ao



Fonte: Elaborada pelo autor

A análise das interações entre países, conforme evidenciado pelo grafo e pelos dados da Tabela 7 a seguir, revela que as colaborações científicas tendem a se organizar em agrupamentos geográficos e econômicos, com países de alta renda exibindo maior interconectividade. A força de ligação intensa entre China e Estados Unidos destaca uma cooperação científica relevante, que transcende suas diferenças geopolíticas e exerce impacto global ao envolver múltiplos países. Além disso, países como Arábia Saudita e Catar, embora com menor número de conexões gerais, apresentam uma influência crescente, marcada por uma forte colaboração regional em pesquisa científica.

Em termos cronológicos, as publicações chinesas estão se intensificando nos últimos anos, juntamente com as publicações de países europeus, como Bélgica, Polônia e Irlanda.

Tabela 7 - Informações obtidas sobre os clusters formados para coautoria entre países.

| <b>Identificação dos Clusters</b> | <b>Quantidade de países</b> | <b>Composição (por ordem de quantidade de trabalhos)</b>  |
|-----------------------------------|-----------------------------|---|
| 1<br>(Vermelho)                   | 18                          | Espanha, Itália, Alemanha, Polônia, Noruega, França, Suécia, Países Baixos, Brasil, Bélgica, Portugal, África do Sul, Dinamarca, México, Finlândia, Romênia, República Tcheca, Áustria. |
| 2<br>(Verde)                      | 9                           | Irã, Japão, Arábia Saudita, Escócia, Malásia, Rússia, Emirados Árabes Unidos, Turquia, Paquistão.   |
| 3<br>(Azul escuro)                | 7                           | China, EUA, Coreia do Sul, Austrália, Índia, Taiwan, Singapura.   |
| 4<br>(Amarelo)                    | 6                           | Inglaterra, Canadá, Tailândia, Suíça, Catar, Grécia.  |

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando o caso Chinês, verificou-se que 1.364 dos 2.045 dos trabalhos publicados sobre o tema de captura de CO<sub>2</sub> foram financiados pela NSFC (National Natural Science Foundation of China).

A Tabela 8, mostra as 10 instituições financiadoras das pesquisas chinesas para o tema Captura de CO<sub>2</sub>, o que também pode ser visto na Figura 15.

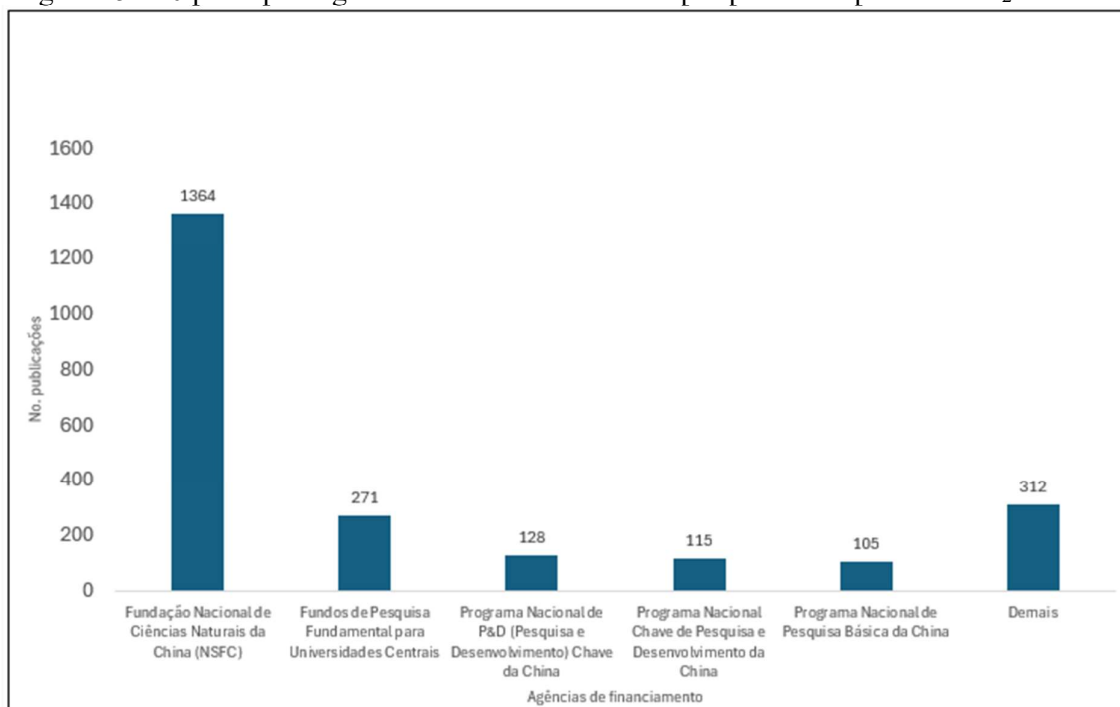
Tabela 8 - Principais entidades de financiamento chinesas

| <b>Agências de financiamento</b>                                     | <b>Publicações</b> |
|--|--------------------|
| Fundação Nacional de Ciências Naturais da China (NSFC)               | 1364               |
| Fundos de Pesquisa Fundamental para Universidades Centrais           | 271                |
| Programa Nacional de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) Chave da China | 128                |
| Programa Nacional Chave de Pesquisa e Desenvolvimento da China       | 115                |
| Programa Nacional de Pesquisa Básica da China                        | 105                |

| <b>Agências de financiamento</b>  | <b>Publicações</b> |
|---|--------------------|
| Fundação de Ciências Naturais da Província de Zhejiang                      | 73                 |
| Fundação Chinesa de Ciência para Pós-Doutorado                              | 70                 |
| Conselho de Bolsas de Estudo da China                                       | 63                 |
| Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento em Alta Tecnologia da China | 61                 |
| Ministério da Educação da China   | 45                 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 15 - 10 principais agências de financiamento de pesquisa de captura de CO<sub>2</sub> da China



Fonte: Elaborada pelo autor

Com mais de 66% das publicações chinesas o instituto National Natural Science Foundation of China (NSFC) é a principal incentivadora de pesquisas voltadas para a captura de CO<sub>2</sub>, devido à sua estratégia de apoio a projetos que visam a neutralidade de carbono até 2060. O incentivo à pesquisa está alinhado às metas climáticas chinesas e é focado no desenvolvimento de novas tecnologias, como materiais adsorventes para a captura de CO<sub>2</sub> de forma eficiente, o que permite reduzir os custos e melhorar a eficiência nos processos industriais (National Natural Science Foundation of China, 2020) e (Nature, 2023)

Além disso, a NSFC promove colaborações internacionais, contribuindo para o avanço global das tecnologias de captura e armazenamento de carbono, com projetos que envolvem universidades e instituições de renome mundial. A Fundação Nacional de Ciências Naturais da

China (NSFC) promove colaborações internacionais estratégicas com instituições de renome, como o National Science Foundation (NSF), dos Estados Unidos, e Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), da Alemanha.

No Brasil, destaca-se a parceria do NSFC com a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que realizam projetos colaborativos que investigam a dinâmica do sistema terrestre e sua relação com o desenvolvimento sustentável, incluindo pesquisas sobre fontes e sumidouros de carbono na Amazônia (Agência FAPESP, 2024).

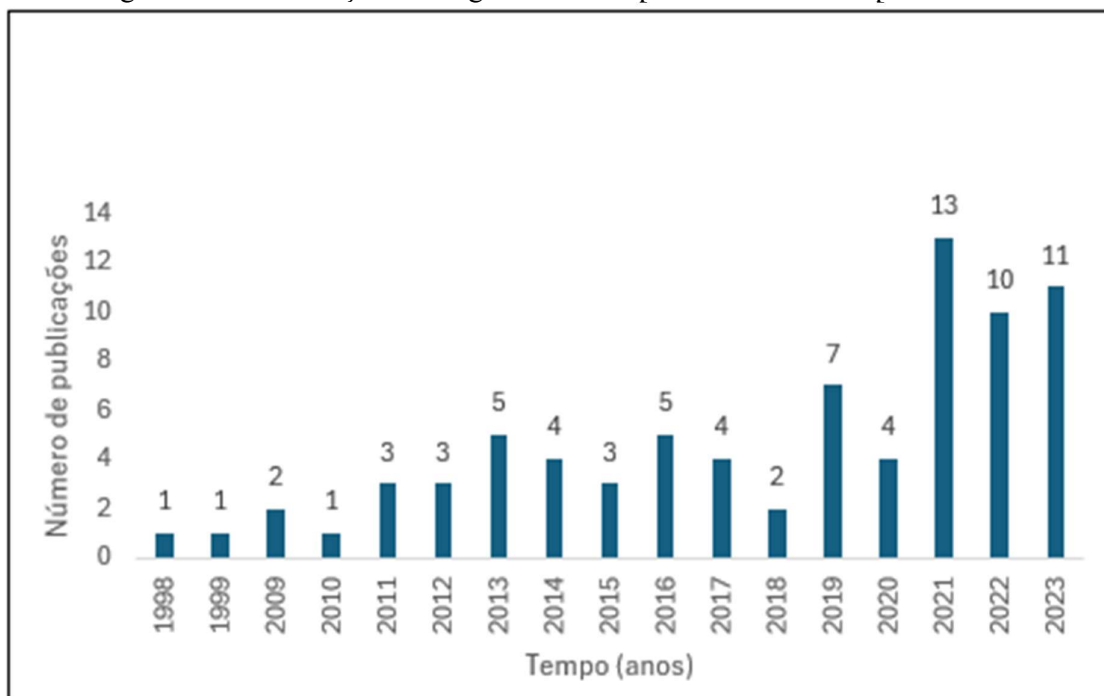
Essas colaborações demonstram o compromisso da NSFC em integrar esforços internacionais para enfrentar desafios climáticos e energéticos.

Esse suporte visa não apenas a redução de emissões diretas, mas também o manejo de estoques urbanos de carbono, colaborando para a mitigação de mudanças climáticas em nível global (National Natural Science Foundation of China, 2020)

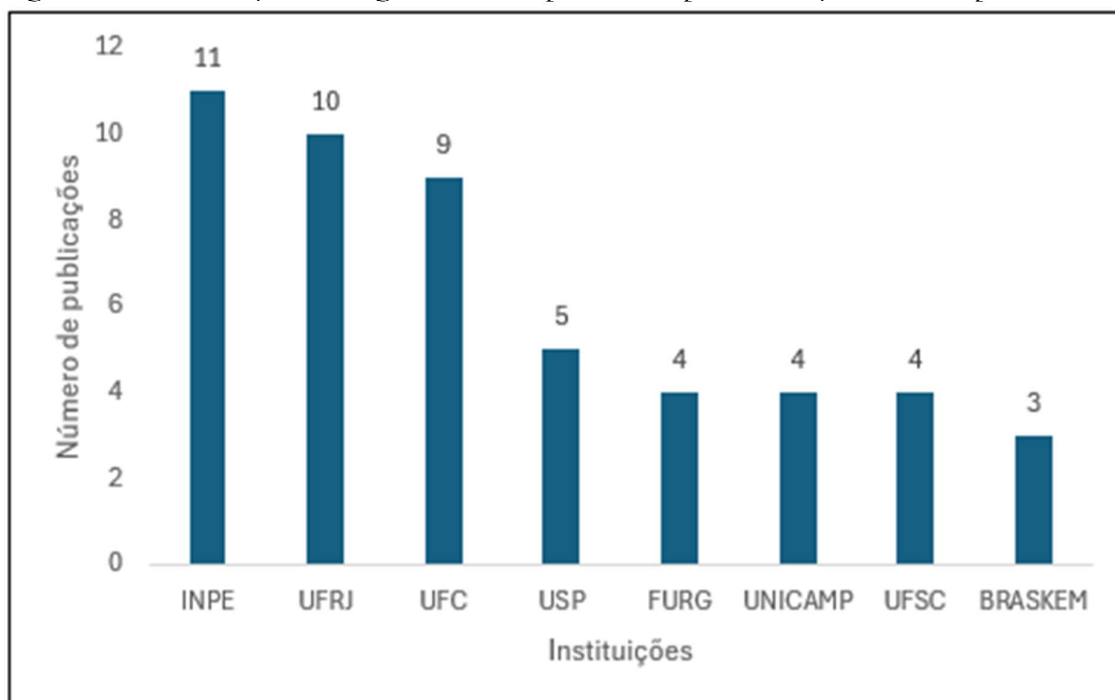
No cenário nacional, no período de 27 anos, encontrou-se 79 publicações e 43% delas concentraram-se nos últimos 3 anos (2021 – 2023), demonstrando o aumento do interesse dos pesquisadores brasileiros no tema de captura de CO<sub>2</sub>.

Na Figura 16 é possível verificar a distribuição temporal das publicações sobre tema no cenário nacional e na Figura 17, quais instituições brasileiras que mais contribuíram sobre o tema, em termos de publicações.

Figura 16 - Distribuição de artigos nacionais publicados sobre captura de CO<sub>2</sub>



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17 - Distribuição de artigos nacionais publicados por instituições sobre captura de CO<sub>2</sub>

Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme Figura 17, o INPE a UFRJ e UFC lideram as publicações, com 30% do total.

Observa-se o caso do INPE, órgão governamental que tem pesquisado sobre a captura de CO<sub>2</sub>, teve suas 9 pesquisas financiadas pela FAPESP.

Entre as instituições privadas, figurou-se a Braskem como interessada no tema, captura de CO<sub>2</sub>.

De acordo com o site da Braskem (Braskem, 2024), a empresa adota várias medidas para combater as mudanças climáticas, e dentre elas, destaca-se as metas de ESG (Environmental, Social and Governance), que visa até 2030, reduzir em 15% as suas emissões gases de efeito estufa nos escopos 1 e 2 e alcançar a neutralidade de carbono até 2050.

A atuação da Braskem, em conjunto com o apoio de agências de fomento como o CNPq, a CAPES e o United States Department of Energy (DOE), evidencia a importância estratégica de financiar iniciativas que possibilitem a captura de CO<sub>2</sub>, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e o fortalecimento da competitividade sustentável da indústria química. Nesse cenário, diversos estudos apresentam abordagens inovadoras para a captura e conversão do CO<sub>2</sub>. O trabalho de (Prajapati *et al.*, 2022) descreve um sistema eletroquímico integrado que captura CO<sub>2</sub> dos gases de combustão e o converte em compostos químicos, como metano e etano, sob condições ambientes. Ainda, o estudo propõe um método de captura rápida de CO<sub>2</sub>

de fluídos com baixa concentração, utilizando uma membrana aniônica para transformar o CO<sub>2</sub> em bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), que posteriormente é reconvertido em CO<sub>2</sub> na fase aquosa, demonstrando aplicabilidade em ambientes urbanos e industriais. Ademais, Mendes et al. (2014), avaliaram a viabilidade econômica da captura de CO<sub>2</sub> em usinas de ciclo combinado a gás natural, convertendo-o em metanol e carbonatos orgânicos. Em conjunto, esses estudos ressaltam a necessidade de desenvolver tecnologias eficientes e economicamente viáveis, alinhadas à estratégia de investimento da Braskem, para impulsionar a inovação na indústria química.

Para os artigos nacionais, de acordo com as categorias do Web of Science, constatou-se a divisão em 23 áreas. Na Tabela 9 é possível verificar os 10 primeiros destes artigos.

Tabela 9 - Classificação dos artigos encontrados no Brasil em relação as áreas de conhecimento.

| <b>Categorias da Web of Science</b>      | <b>Quantidade de arquivos</b> | <b>% de 79</b> |
|--|-------------------------------|----------------|
| Energia e Combustíveis                   | 27                            | 34,18          |
| Engenharia Química                       | 27                            | 34,18          |
| Engenharia Ambiental                     | 14                            | 17,72          |
| Ciências Ambientais                      | 14                            | 17,72          |
| Termodinâmica                            | 10                            | 12,66          |
| Química Multidisciplinar                 | 9                             | 11,39          |
| Química Física                           | 8                             | 10,13          |
| Ciência e Tecnologia Verde e Sustentável | 7                             | 8,86           |
| Engenharia Mecânica                      | 6                             | 7,60           |
| Biotecnologia e Microbiologia Aplicada   | 5                             | 6,33           |

Fonte: Web of Science

Da mesma forma que se apresenta no cenário mundial, as áreas que mais pesquisam sobre o tema capturam de CO<sub>2</sub> no cenário nacional são Combustível e Energia e Engenharia Química.

A avaliação da co-ocorrência de termos nos títulos e resumos foi realizada também no contexto nacional. Identificou-se 600 termos, dos quais apenas aqueles com pelo menos cinco ocorrências foram considerados, resultando em 125 termos. Em cima desses dados, foram formados quatro clusters, que foram associados às principais categorias listadas na Tabela 10. Na Figura 18 é possível verificar a Grafo de co-ocorrência de palavras considerando os 79 arquivos filtrados para o Brasil.



| <b>Identificação dos Clusters</b> | <b>Quantidade de termos</b> | <b>Principais termos</b>   | <b>Áreas de conhecimento (Web of Science)</b>  |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|--|
| 3<br>(Azul)                       | 15                          | Captura de CO <sub>2</sub> ,<br>Biomassa,<br>Estocagem, Óleo e<br>Projeto, | Energia e Combustíveis,<br>Química<br>Multidisciplinar,<br>Engenharia Química,<br>Ciências<br>Multidisciplinares,<br>Termodinâmica.<br>Engenharia Química, |
| 4<br>(Amarelo)                    | 14                          | CO <sub>2</sub> , Adsorção,<br>Separação, Carvão<br>Ativado e Adsorventes, | Química<br>Multidisciplinar,<br>Química Física,<br>Engenharia Ambiental.   |

Fonte: Elaborada pelo autor

A análise dos clusters relacionados à pesquisa de captura de CO<sub>2</sub> no Brasil revela tendências distintas em diferentes áreas de conhecimento, conforme identificado pelos termos principais e suas quantidades associadas. O cluster vermelho, sugere um interesse crescente em como os processos de combustão e emissões atmosféricas podem influenciar ou serem mitigados pela captura de CO<sub>2</sub>. Já o cluster verde, com 20 termos, indica ênfase em biotecnologia e engenharia agrícola. O uso de microalgas e o crescimento de biocombustíveis são áreas emergentes, refletindo uma tendência em explorar métodos biológicos e sustentáveis para captura de CO<sub>2</sub>.

Os clusters azul e amarelo, mostraram uma abordagem multidisciplinar envolvendo energias, química e termodinâmica, apontando para uma integração de tecnologias de captura, dos processos de separação e adsorção com processos envolvendo a utilização de biomassa e armazenamento de CO<sub>2</sub>.

Em resumo, conforme Tabela 11, a pesquisa brasileira sobre captura de CO<sub>2</sub> está se diversificando, com um equilíbrio entre tecnologias biológicas, químicas e físicas. As tendências indicam interesse em desenvolver soluções integradas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

Tabela 11 - Dez principais periódicos onde estão localizados os 79 artigos brasileiros sobre a captura de CO<sub>2</sub> e suas classificações nas áreas de conhecimento.

| <b>Periódicos</b>    | <b>Fator de impacto 2023</b> | <b>Áreas de conhecimento</b> | <b>Quantidade de artigos</b> |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Ambiente Atmosférico | 4,2                          | Ciências Ambientais          | 4                            |

| Periódicos  | Fator de impacto 2023 | Áreas de conhecimento    | Quantidade de artigos |
|---|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Tecnologia de Recursos Biológicos                         | 9,7                   | Engenharia Agrícola      | 4                     |
| Revista Adsorption da Sociedade Internacional de Adsorção | 3,0                   | Química Física           | 3                     |
| Revista de Engenharia Química                             | 13,3                  | Engenharia Química       | 3                     |
| Energias  | 3,0                   | Energia e Combustíveis   | 3                     |
| Energia   | 9,0                   | Energia e Combustíveis   | 2                     |
| Energia e Ciência Ambiental                               | 32,4                  | Química Multidisciplinar | 2                     |
| Fronteiras em Química                                     | 3,8                   | Química Multidisciplinar | 2                     |
| Combustível   | 6,7                   | Energia e Combustíveis   | 2                     |
| Pesquisa em Química e Engenharia Industrial               | 3,8                   | Engenharia Química       | 2                     |

Fonte: Elaborada pelo autor

Verifica-se relevância das publicações brasileiras, pois os periódicos onde os 79 artigos foram publicados, nenhum é nacional. O periódico “Energy environmental Science” que possui um fator de impacto de 32,4, maior do que a dos demais, obteve 2 publicações. Isso com o fato de 13 artigos (16,45%) terem sido publicados em periódicos com fator de impacto maior do que 5, sinalizam a contribuição relevante do Brasil no cenário mundial, para a pesquisa de captura de CO<sub>2</sub>.

A área de conhecimento em engenharia agrícola “Agricultural engineering”, uma das mais publicadas, evidencia a tendência brasileira em buscar alternativas específicas para o país, como a utilização de tecnologias biológicas e ou orgânicas para mitigar a emissão de gases de efeito estufa.

### 3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão dos artigos mostra diversas tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, principalmente aquelas que fazem a integração com biocombustíveis, além de pesquisas atreladas a conversão do CO<sub>2</sub> em metanol, entretanto essas pesquisas se mostraram pouco aderentes a aplicação de captura de CO<sub>2</sub> em uma instalação industrial, dificultando a comparação dos dados.

Entretanto, conforme discutido no trabalho de (Legkov *et al.*, 2023). A captura de CO<sub>2</sub> é crucial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa provenientes de processos industriais. Entre as tecnologias mais estudadas, a absorção química com aminas, como a monoetanolamina (MEA), destaca-se por sua maturidade e viabilidade econômica já consagradas. Entretanto, conforme mencionado no trabalho de (Cloete *et al.*, 2019) além da absorção com aminas, outras abordagens estão sendo exploradas quando o tema é captura de CO<sub>2</sub>, uma vez que o sistema com aminas demanda o uso de energia em forma de calor para a regeneração do solvente, o que combinado com casos com a escassez de vapor em alguns processos industriais, penalizam essa tecnologia para os cenários futuros.

Após a leitura dos resumos dos 362 trabalhos, sobre as áreas comuns em que a captura de CO<sub>2</sub> está inserida, foi dividido a análise em 4 grupos de trabalhos para melhor entendimento. São eles: Absorção química com aminas, Adsorção, incluindo Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC), Membranas e Oxi-combustão.

### 3.2.1 AMINAS

O sistema de captura de CO<sub>2</sub> utilizando aminas fundamenta-se na absorção química, na qual o gás de combustão contendo CO<sub>2</sub> é conduzido através de uma solução aquosa de aminas, como a monoetanolamina (MEA). Durante esse processo, as aminas reagem quimicamente com o CO<sub>2</sub>, formando compostos solúveis, que podem posteriormente ser separados do gás purificado. A eficiência do sistema é afetada pela degradação das aminas devido à temperatura e à presença de oxigênio e SO<sub>2</sub>, o que reduz a capacidade de absorção e eleva os custos operacionais (Ewert *et al.*, 2011).

Após a absorção, a solução rica em CO<sub>2</sub> é aquecida em um refeedor, onde o CO<sub>2</sub> é liberado das aminas, permitindo a captura e compressão do gás para armazenamento ou utilização em outras aplicações. As aminas regeneradas são, então, recirculadas para o absorvedor, fechando o ciclo do processo. Embora eficiente, essa tecnologia apresenta uma demanda energética significativa, particularmente na etapa de regeneração das aminas, demandando vapor.

Estudos, como o de (Ewert *et al.*, 2011), destacam-se os aspectos de degradação e consumo energético dos solventes amínicos durante os processos de absorção e desorção de CO<sub>2</sub>, ressaltando a necessidade de otimização do sistema para reduzir custos e melhorar a eficiência energética. Além disso, análises técnicas, econômicas e ambientais de sistemas de captura de CO<sub>2</sub>, como as discutidas por (Rao; Rubin, 2002) que indicam que os custos estão associados ao design da planta e às condições operacionais. Tais estudos são essenciais para o

desenvolvimento de tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> mais eficazes e sustentáveis, enfrentando desafios cruciais na mitigação das mudanças climáticas.

As pesquisas atreladas as utilizações de aminas visam aumentar a cinética da absorção, explorando misturas e opções de tipos de aminas e seus impactos financeiros e ambientais, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Subtemas de trabalhos sobre absorção química com aminas

| <b>Autores</b>                               | <b>Estudo</b>   | <b>Subtemas</b>               |
|--|---|-------------------------------|
| (Siminiceanu; Tataru-Farmus; Bouallou, 2007) | Cinética de absorção de dióxido de carbono em soluções aquosas de 1,5,8,12-tetraazadodecano (APEDA)   | Cinética de absorção          |
| (Short <i>et al.</i> , 2023)                 | Cinética Química da Autoxidação de Poli(etilamina) em Sorventes de CO <sub>2</sub>  | Cinética de absorção          |
| (Bollini <i>et al.</i> , 2011)               | Degradação oxidativa de adsorventes de aminsílica relevantes para a captura de CO <sub>2</sub> pós-combustão  | Tipos de aminas utilizadas    |
| (Ahmadalinezhad; Tailor; Sayari, 2013)       | Insights em nível molecular sobre a degradação oxidativa da amina enxertada.  | Tipos de aminas utilizadas    |
| (Byung Don Lee, 2008)                        | Um estudo comparativo sobre o poder de captura de dióxido de carbono entre 30% em peso de soluções aquosas de 2-amino-2-metil-1-propanol e 30% em peso de metildietanol amina | Tipos de aminas utilizadas    |
| (Rao; Rubin, 2002)                           | Avaliação técnica, econômica e ambiental da tecnologia de captura de CO <sub>2</sub> à base de amina para controle de gases de efeito estufa de usinas de energia             | Impacto ambiental e econômico |
| (Leie <i>et al.</i> , 2018)                  | Avaliação técnico-econômica e ambiental da tecnologia de mineralização de CO <sub>2</sub> com base em experimentos em escala de bancada                                       | Impacto ambiental e econômico |
| (Ye <i>et al.</i> , 2019)                    | Análise técnica e econômica da captura e sequestro de carbono à base de amina em usinas termelétricas a carvão  | Impacto ambiental e econômico |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.2 ADSORÇÃO

De acordo com o trabalho de (Thirion *et al.*, 2016), um dos métodos utilizados nesse sistema de adsorção é o que utiliza temperatura oscilante (TSA), que baseia-se no uso de calor para desorver o CO<sub>2</sub> capturado, permitindo a reutilização dos adsorventes em outro ciclo. Durante o processo, o gás de combustão passa por um leito de adsorventes em baixa temperatura, onde o CO<sub>2</sub> é adsorvido. Uma vez que o leito se satura, a temperatura é elevada para liberar o CO<sub>2</sub>, regenerando o adsorvente para o próximo ciclo

Adsorção por Pressão Oscilante (PSA) é uma técnica alternativa que se baseia na modulação da pressão para capturar e liberar o CO<sub>2</sub>. Durante a etapa de alta pressão, o gás é retido no material adsorvente, enquanto na fase de baixa pressão ocorre sua liberação, permitindo a regeneração do meio adsorvente. Trata-se de um processo com alta eficiência energética, sendo amplamente utilizado em aplicações industriais.(Dhoke *et al.*, 2021).

O estudo de (Ribeiro; Grande; Rodrigues, 2013b), traz que a Adsorção por Oscilação Elétrica (ESA) é uma tecnologia recente que aplica pulsos elétricos para aquecer o adsorvente e liberar o CO<sub>2</sub>, com menor consumo energético em relação aos métodos convencionais. A eficiência do processo depende tanto da seleção do adsorvente quanto do design do sistema.

Já o estudo de (Sandhu *et al.*, 2016), traz que a escolha do material adsorvente, juntamente com o design do sistema, são as bases para a otimização da eficiência e viabilidade econômica do processo de captura de CO<sub>2</sub>. O estudo destaca que a eficiência do processo é evidenciada pela elevação da pureza do CO<sub>2</sub> recuperado para 46,6%, com uma recuperação superior a 80%. Contudo, o consumo energético é uma barreira, registrando-se 33,3 GJ/ton de CO<sub>2</sub> capturado, superior aos valores observados em processos com amina. Esse alto consumo de energia é atribuído ao aquecimento ineficiente do adsorvente e à ampla zona de transferência de massa causada pelo empacotamento não homogêneo da zeólita.

Os autores (Ribeiro; Grande; Rodrigues, 2013a) sugerem que o desenvolvimento de materiais híbridos adequados pode melhorar a eficiência energética, recomendando a integração da zeólita nas paredes de um monólito de carbono para minimizar a queda de pressão e otimizar o desempenho. Além disso, observam que a escala do setup experimental influencia diretamente a eficiência, sugerindo que sistemas de maior escala poderiam mitigar o consumo energético. Eles concluem que, ao solucionar os problemas de aquecimento e transferência de massa, o consumo de energia poderia ser reduzido para 6 GJ/ton de CO<sub>2</sub>, tornando o ESA uma solução mais viável e sustentável para captura de CO<sub>2</sub>.

Já (Riboldi; Bolland, 2015) analisam o uso do processo de adsorção por variação de pressão (PSA) para captura de CO<sub>2</sub> em plantas de ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC). O sistema PSA estudado opera com sete leitos e doze etapas, com uma pressão de adsorção de 38,8 bar e uma pressão de regeneração de 1 bar, enquanto a temperatura do gás de síntese na entrada é de 338 K. Embora a eficiência de captura de CO<sub>2</sub> seja um indicador chave de desempenho, o estudo não apresenta um valor específico para a eficiência do PSA isoladamente. A concentração de CO<sub>2</sub> no gás de entrada é de 38% em volume, porém os dados de saída não são explicitamente detalhados. Além disso, o estudo sugere que melhorias nos materiais adsorventes podem ter um impacto significativo no desempenho e nos custos

operacionais do sistema. A integração do PSA ao sistema IGCC requer um equilíbrio cuidadoso entre a eficiência de captura e o impacto energético no desempenho global da planta (Riboldi; Bolland, 2015)

O processo de Adsorção por Oscilação de Temperatura (TSA) é empregado para capturar CO<sub>2</sub> em misturas gasosas, como gases de combustão, utilizando um ciclo de adsorção a baixas temperaturas e desorção a temperaturas mais elevadas. A eficiência da captura de CO<sub>2</sub> nesse sistema depende das propriedades do adsorvente e das condições de operação, como a razão entre o comprimento e o diâmetro do reator, que afetam diretamente a capacidade de adsorção. O custo operacional do TSA é impactado pelo consumo energético necessário para os ciclos de aquecimento e resfriamento. No caso do adsorvente Mg-MOF-74, a desorção ocorre a 393 K (aproximadamente 120°C), e o tempo de aquecimento e resfriamento no ciclo foi ajustado para 200 e 100 segundos, respectivamente. O controle desses parâmetros otimiza a captura de CO<sub>2</sub> e reduzir os custos associados ao processo (Lian *et al.*, 2019).

As análises dos dados mostraram que os estudos atrelados a adsorção focam no desenvolvimento e aprimoramento de adsorventes, visando reaproveitamento de resíduos e longevidade operacional.

### 3.2.3 SARC

Conforme experimentos de (Dhoke *et al.*, 2019a), o princípio do SARC foi validado em um reator de laboratório com 60 g de sorvente, atingindo uma capacidade de trabalho de 0,55 mol/kg, em conformidade com estudos de modelagem anteriores. A flexibilidade do sistema, operando exclusivamente com eletricidade, o torna adequado para ambientes industriais que não possuem disponibilidade de grandes quantidades de vapor para a regeneração do sorvente.

No trabalho realizado por (Zaabout *et al.*, 2017b), foi demonstrado a eficácia do conceito SARC em experimentos, tanto da regeneração dos adsorventes quanto ao desempenho da bomba de calor, indica que estudos precisam ser aprimorados em especial a triagem de adsorventes.

Já (Dhoke *et al.*, 2020c) identificou os adsorventes à base de polietilenoimina (PEI) como candidatos promissores, com estudos apontando a entalpia de regeneração ideal para maximizar a eficiência do processo.

Tanto no trabalho de Dhoke et al., (2021) quanto de (Zaabout *et al.*, 2017a) indicam que o design do SARC, permite uma construção modular e independente da planta em que estão inseridos, tornando-o adequado para integração às instalações industriais existentes.

Para o futuro, a pesquisa deve concentrar-se na melhoria da estabilidade dos adsorventes e na otimização dos processos para garantir a viabilidade econômica do SARC. A análise revelou que tecnologias como o SARC tem grande potencial para integração em indústrias em geral e mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

O consumo de energia elétrica, que é de 186,4 kWh por tonelada de clínquer produzido, exerce a principal influência sobre o custo operacional de um sistema SARC, quando integrado a um forno de cimento. Isso corresponde a um aumento de 140% no consumo de energia em comparação com um forno de referência sem captura de CO<sub>2</sub>. Além disso, o custo para evitar as emissões de CO<sub>2</sub> é avaliado por meio do SPECCA (Specific Primary Energy Consumption for CO<sub>2</sub> Avoided), que, no caso do SARC, é de 2,04 MJ/kg de CO<sub>2</sub>. Essa tecnologia é essencial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa em indústrias em geral (Cloete *et al.*, 2019).

Já o estudo de (Dhoke *et al.*, 2020a) apresenta uma análise detalhada do desempenho de um reator de adsorção oscilante em cluster (SARC) para captura de CO<sub>2</sub>, empregando o sorvente EB-PEI. Os resultados demonstram que a regeneração híbrida usando esse sorvente permite uma eficiência de captura de CO<sub>2</sub> de 90%, sem limitações cinéticas.

A pesquisa traz a primeira demonstração experimental do conceito SARC em um reator de leito fluidizado multietapa, com capacidade de captura de até 24 kg de CO<sub>2</sub> por dia. Utilizando uma combinação de oscilações de temperatura e vácuo, o sistema alcança elevada eficiência a partir de gases de combustão simulados, representando potenciais soluções para captura de CO<sub>2</sub> em usinas a carvão. A carbonatação ocorreu a 60 °C em gás sintético (12,5% CO<sub>2</sub> em N<sub>2</sub>), e a regeneração empregou oscilações de temperatura e vácuo. O sorvente alcançou rapidamente o equilíbrio, e o estudo destacou a influência da pressão na regeneração e capacidade de captura.

A análise concluiu que o reator multietapa SARC atinge altos coeficientes de transferência de calor (487 W/m<sup>2</sup>·K), indicando uma fluidização eficiente, enquanto os separadores de placas perfuradas melhoram o fluxo em pistão, prolongando a vida útil e eficiência da captura. Em operação contínua por cinco ciclos, a captura de CO<sub>2</sub> manteve-se em 90%, embora ajustes adicionais sejam necessários para mitigar deslizamentos de CO<sub>2</sub> e produção de finos, apontando para a viabilidade de escala e implicações tecno-econômicas em sistemas industriais maiores. A Tabela 13 traz os subtemas de trabalhos sobre adsorção e sistemas SARC.

Tabela 13 - Subtemas de trabalhos sobre adsorção e SARC

| <b>Autores</b>                          | <b>Estudo</b>   | <b>Subtema</b>                 |
|---|---|--------------------------------|
| (Rodríguez-Albelo <i>et al.</i> , 2017) | Estudo sobre a captura seletiva de dióxido de enxofre em estruturas metal-orgânicas com defeitos cristalinos.   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Ribeiro; Grande; Rodrigues, 2013b)     | Desenvolvimento de um sistema híbrido de monólito de carbono ativado e zeólita 13x para captura de CO <sub>2</sub> .  | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Dhoke <i>et al.</i> , 2019a)           | Avaliação do conceito de swing adsorption reactor cluster (SARC) para captura de CO <sub>2</sub> pós-combustão.   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Kong <i>et al.</i> , 2015)             | Síntese de aerogel híbrido de amina com alta eficiência de adsorção e regenerabilidade.   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Querejeta; Rubiera; Pevida, 2019)      | Desenvolvimento de biocarbono dopado com potássio para captura de CO <sub>2</sub> em condições úmidas.  | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Ribeiro; Grande; Rodrigues, 2013b)     | Desenvolvimento de um sistema híbrido de monólito de carbono ativado e zeólita 13x para captura de CO <sub>2</sub> .  | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Zekeňák <i>et al.</i> , 2018)          | Adsorção de dióxido de carbono em sílica modificada com amina.  | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Chen <i>et al.</i> , 2016)             | Investigação experimental da capacidade de captura de CO <sub>2</sub> usando sílica mesoporosa sba-15 impregnada com monoetanolamina e dietanolamina.   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Rodríguez-Albelo <i>et al.</i> , 2017) | Adsorção seletiva de dióxido de enxofre em estruturas metal-orgânicas com defeitos cristalinos.   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Mondino <i>et al.</i> , 2022)          | Avaliação da tecnologia MBTSA para captura de CO <sub>2</sub> em plantas de energia a partir de resíduos.   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Zhao <i>et al.</i> , 2021)             | Conversão de cascas de castanha-d'água em carbonos porosos dopados com nitrogênio para captura de CO <sub>2</sub> .   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Arenillas <i>et al.</i> , 2005)        | Materiais de carbono derivados de cinzas volantes como sorventes de CO <sub>2</sub> .   | Desenvolvimento de adsorventes |
| (Dhoke <i>et al.</i> , 2020b)           | Demonstração do conceito de swing adsorption reactor cluster (SARC) em um leito fluidizado multistágio com superfícies de transferência de calor para captura de CO <sub>2</sub> pós-combustão. | SARC                           |

| <b>Autores</b>                  | <b>Estudo</b>   | <b>Subtema</b> |
|---------------------------------|---|----------------|
| (Zaabout <i>et al.</i> , 2017b) | Avaliação termodinâmica do conceito de swing adsorption reactor cluster (SARC) para captura de CO <sub>2</sub> pós-combustão.   | SARC           |
| (Dhoke <i>et al.</i> , 2021)    | Estudo das reduções de custo alcançáveis com o conceito SARC de captura de CO <sub>2</sub> usando um modelo de reator validado. | SARC           |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.4 MEMBRANAS

O sistema de membranas para separação de gases, especialmente para a captura de CO<sub>2</sub>, utiliza membranas semipermeáveis que permitem a separação de componentes de uma mistura gasosa com base em suas propriedades físicas e químicas. Essas membranas são projetadas para permitir a passagem seletiva de determinados gases, enquanto bloqueiam outros, com base em diferenças de pressão, solubilidade e difusividade dos gases através do material da membrana (Chabanon *et al.*, 2014a).

No contexto da captura de CO<sub>2</sub>, as membranas são frequentemente empregadas em processos de múltiplas etapas, com o objetivo de aumentar a eficiência da separação. Em um sistema convencional, o gás de combustão é direcionado para uma membrana seletiva para CO<sub>2</sub>, permitindo que o CO<sub>2</sub> permeie através da membrana, enquanto gases como o N<sub>2</sub> são retidos. Esse processo pode ser repetido em várias etapas para aumentar a pureza do CO<sub>2</sub> capturado (Zhao *et al.*, 2010).

As membranas podem ser fabricadas a partir de diferentes materiais, incluindo polímeros, membranas inorgânicas e matrizes híbridas. Cada tipo de material apresenta vantagens específicas em termos de seletividade e permeabilidade. As membranas de matriz mista (MMMs), por exemplo, combinam polímeros com partículas inorgânicas para melhorar o desempenho da separação, aumentando a permeabilidade ao CO<sub>2</sub> e mantendo uma alta seletividade na separação CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> (Muldoon *et al.*, 2020).

A avaliação econômica e energética desses sistemas determina sua viabilidade em larga escala, especialmente quando comparados a outras tecnologias de captura de carbono, como a absorção química (Zhou *et al.*, 2019).

A máxima concentração de CO<sub>2</sub> que pode ser alcançada em um sistema com membranas é de 95% em base seca, conforme descrito no estudo de (Song *et al.*, 2017), que propõe um processo de duas etapas utilizando membranas altamente seletivas para CO<sub>2</sub>.

O custo operacional de um sistema de captura de CO<sub>2</sub> utilizando membranas varia em função do design e das condições operacionais específicas. No estudo conduzido por (Janusz-Cygan *et al.*, 2020), o consumo de energia para um processo híbrido de adsorção-membrana foi estimado em 555 kWh por tonelada de CO<sub>2</sub> capturado. Além disso, o desempenho e a viabilidade econômica das membranas são influenciados por fatores como a vida útil, que geralmente varia de 3 a 5 anos, e a redução da permeabilidade, que pode atingir pelo menos 30% nos primeiros 3 a 4 anos de operação. O consumo energético é outro fator relevante, principalmente em processos que demandam grandes áreas de membrana, como a remoção de CO<sub>2</sub> em plantas de energia, onde essa demanda pode representar entre 16% e 24% da energia total produzida. Dessa forma, tanto a eficiência energética quanto a durabilidade das membranas desempenham um papel crucial na viabilidade econômica de processos de captura de CO<sub>2</sub> baseados em membranas.

Nessa mesma linha, o desenvolvimento de novos materiais das membranas norteou as pesquisas desse grupo. Os pesquisadores estão explorando novos materiais, como misturas de polímeros e estruturas metal-orgânicas, para criar membranas com propriedades aprimoradas, como alta permeabilidade e estabilidade em condições adversas como temperatura e a qualidade dos gases. A Tabela 14 mostra alguns trabalhos, autores e subtemas das pesquisas sobre membranas.

Tabela 14 - Autores e subtemas das pesquisas sobre membranas.

| <b>Autores</b>                   | <b>Estudo</b>   | <b>Subtema</b>     |
|----------------------------------|---|--------------------|
| (Ghobadi <i>et al.</i> , 2019)   | Um Estudo Experimental de um Sistema de Contato com Membrana de Fibras Ocas para Separação de Dióxido de Carbono/Metano           | Separação de gases |
| (Chabanon <i>et al.</i> , 2014b) | Processos de Separação por Membranas para Captura de Dióxido de Carbono Pós-Combustão: Estado da Arte e Visão Crítica             | Separação de gases |
| (Zhao <i>et al.</i> , 2010)      | Processos de Membranas de Separação de Gás em Múltiplas Etapas Usados na Captura Pós-Combustão: Análises Energéticas e Econômicas | Separação de gases |

| <b>Autores</b>                 | <b>Estudo</b>  | <b>Subtema</b>                                 |
|--------------------------------|--|--|
| (Muldoon <i>et al.</i> , 2020) | Membranas de Matriz Mista a partir de uma Mistura de Polímero Microporoso e Estruturas Metal-Orgânicas Nanoestruturadas com Desempenho Excepcional de Separação de CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> . | Desenvolvimento de novos materiais de membrana |
| (Kusuma <i>et al.</i> , 2020)  | Blendas de Polifosfazeno Reticulado como Membranas Robustas para Separação de CO <sub>2</sub> .  | Desenvolvimento de novos materiais de membrana |
| (Venturi <i>et al.</i> , 2018) | Efeito da Umidade e do Conteúdo de Nanocelulose em Membranas Híbridas de Polivinilamina-Nanocelulose para Captura de CO <sub>2</sub> .   | Desenvolvimento de novos materiais de membrana |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.5 OXI-COMBUSTÍVEL

Os artigos relacionados à captura de CO<sub>2</sub> pela tecnologia oxi-combustão abordam-se os processos de combustão em leito fluidizado circulante. De acordo com (Damiani *et al.*, 2012), as tecnologias oxi-combustível utilizam oxigênio de alta pureza para a queima de combustíveis fósseis, com objetivo de captura de CO<sub>2</sub> para posterior sequestro, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Estudos demonstram uma redução nas emissões de NOx e variabilidade nas formas de mercúrio liberadas. A pesquisa de (Damiani *et al.*, 2012) continua a focar na otimização da captura de SO<sub>2</sub> e na compreensão dos efeitos da presença de água nos processos de sulfatação com um impacto ambiental reduzido.

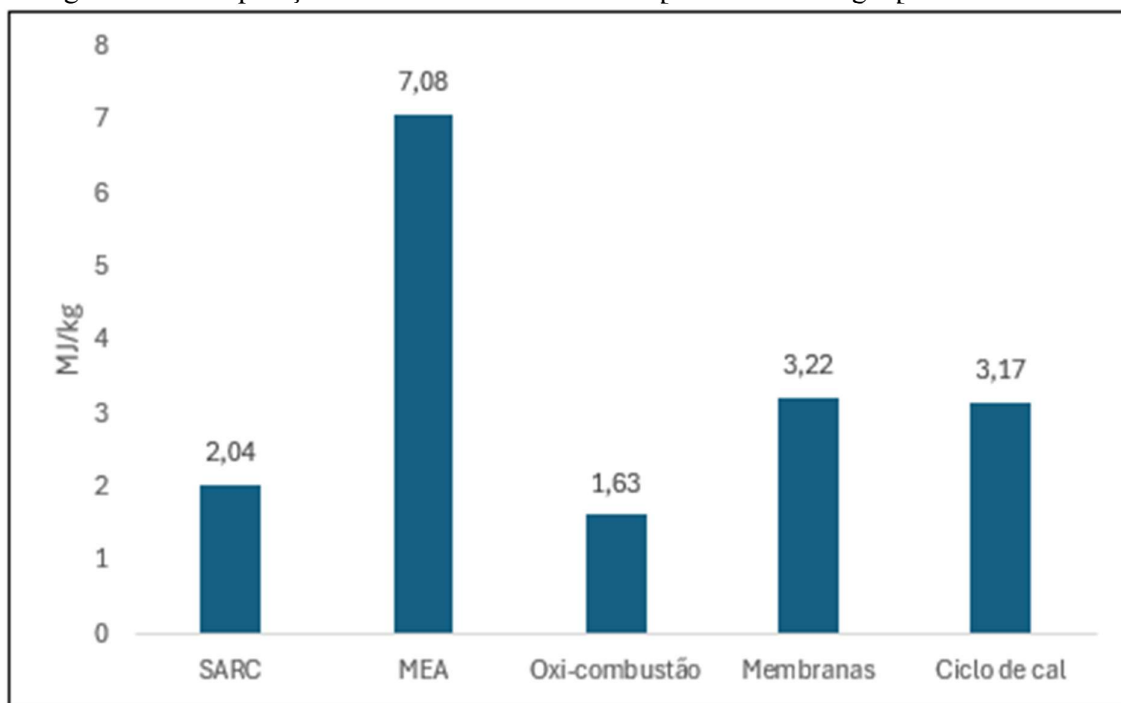
Já o estudo de (Zhou *et al.*, 2019) investiga como o enriquecimento de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O afeta a adsorção e oxidação de mercúrio em biochar. O estudo ainda destaca a importância do cloro nos processos de remoção de mercúrio para o controle de emissões.

O estudo de (Smart; G.S. Riley, 2012), investiga os impactos na geração de cinzas e na emissão de gases gerados pela combustão com a mistura de combustível e ar enriquecido em oxigênio alta pureza. Verificou-se que o enriquecimento do ar com oxigênio afeta significativamente a transferência de calor dentro da câmara de combustão. O aumento no nível de oxigênio, em torno de 23%, melhora o fluxo de calor convectivo quanto o radiativo. Condições ótimas de enriquecimento resultam em temperaturas de chama mais elevadas, o que intensifica o fluxo de calor radiativo.

Em relação ao conteúdo de carbono nas cinzas, a menor quantidade de carbono nas cinzas sugere que a combustão está ocorrendo de forma mais eficiente, minimizando a quantidade de carbono não queimado.

Quanto à composição do gás de exaustão, o estudo evidencia que o enriquecimento de oxigênio leva a um aumento na concentração de CO<sub>2</sub>. Esse aumento é benéfico para os processos de captura de CO<sub>2</sub>, via sistema de absorção com amina. Além disso, a presença de maiores concentrações de CO<sub>2</sub> pode permitir a redução do tamanho das instalações de absorção com amina e das unidades de separação de ar. A Figura 19 traz a comparação dos valores de consumo específico de energia por CO<sub>2</sub> evitado, por tecnologia de captura de CO<sub>2</sub>.

Figura 19 - Comparação dos valores de consumo específico de energia por CO<sub>2</sub> evitado.



Fonte: (Dhoke *et al.*, 2019a)

Nesse sentido, a tecnologia Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) para captura de CO<sub>2</sub>, foi possível evidenciar uma eficiência energética relativamente baixa e compatível com outras tecnologias, ficando atrás apenas da oxi-combustão.

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo abordou como o tema de captura de CO<sub>2</sub> tem sido estudado ao redor do mundo, incluindo o Brasil e destacou as principais tecnologias disponíveis em escala industrial e em escala piloto para a captura de CO<sub>2</sub> e as nuances para a integração com as instalações industriais existentes, com foco em tecnologias e no custo-benefício.

Essa revisão sistemática destacou quatro principais tecnologias: absorção química com aminas, adsorção, membranas e oxi-combustão, cada uma com vantagens específicas e desafios técnicos. A absorção com aminas, mostrou eficiência (até 90%) mas com significativa demanda energética para regeneração. A tecnologia emergente, como o sistema SARC (Swing Adsorption Reactor Cluster), foi a que mais se destacou pela flexibilidade e menor demanda por vapor para regeneração e embora traga penalidade energética, é promissoras para integração em instalações industriais.

Conclui-se que, apesar de o sistema de oxi-combustão apresentar uma relação custo-benefício mais vantajosa, o sistema SARC é o mais promissor para captura de CO<sub>2</sub>, combinando viabilidade econômica com redução de emissões. Este trabalho reforça a necessidade de aprimoramentos tecnológicos para superar desafios operacionais e maximizar a eficiência das tecnologias de captura de carbono, principalmente no desenvolvimento de adsorvedores eficientes e que penalizem menos o consumo energético do sistema, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a sustentabilidade industrial.

O sistema SARC foi o escolhido para a simulação de captura de CO<sub>2</sub> de uma caldeira de biomassa, para a aplicação para a produção de PCC (Precipitado de Carbonato de Cálcio) para a aplicação em indústrias fabricantes de papel.



## 5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA FAPESP. FAPESP e Fundação Nacional de Ciências Naturais da China planejam ampliar a cooperação em pesquisa. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/fapesp-e-fundacao-nacional-de-ciencias-naturais-da-china-planejam-ampliar-a-cooperacao-em-pesquisa/52056>. Acesso em: 4 jan. 2025.

AHMADALINEZHAD, Asieh; TAILOR, Ritesh; SAYARI, Abdelhamid. Molecular-level insights into the oxidative degradation of grafted amines. *Chemistry - A European Journal*, [s. l.], v. 19, n. 32, p. 10543–10550, 2013.

ARENILLAS, A. *et al.* CO<sub>2</sub> capture using some fly ash-derived carbon materials. *In:* , 2005. *Fuel*. [S. l.: s. n.], 2005. p. 2204–2210.

BOLLINI, Praveen *et al.* Oxidative degradation of aminosilica adsorbents relevant to postcombustion CO<sub>2</sub> capture. *Energy and Fuels*, [s. l.], v. 25, n. 5, p. 2416–2425, 2011.

BRASKEM. Combate às mudanças climáticas. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/combateasmudancasclimaticas>. Acesso em: 8 set. 2024.

BYUNG DON LEE, Dong Min Kim, Jungho Cho, Sang Wook Park. A comparative study on the carbon dioxide capture power between 30. [s. l.], 2008.

CHABANON, E. *et al.* Hollow fiber membrane contactors for post-combustion CO<sub>2</sub> capture: A scale-up study from laboratory to pilot plant. *Oil and Gas Science and Technology*, [s. l.], v. 69, n. 6, p. 1035–1045, 2014a.

CHABANON, E. *et al.* Hollow fiber membrane contactors for post-combustion CO<sub>2</sub> capture: A scale-up study from laboratory to pilot plant. *Oil and Gas Science and Technology*, [s. l.], v. 69, n. 6, p. 1035–1045, 2014b.

CHEN, Hongwei *et al.* Experimental Investigation of CO<sub>2</sub> Capture Capacity: Exploring Mesoporous Silica SBA-15 Material Impregnated with Monoethanolamine and Diethanolamine. *Energy and Fuels*, [s. l.], v. 30, n. 11, p. 9554–9562, 2016.

CLOETE, Schalk *et al.* The swing adsorption reactor cluster for post-combustion CO<sub>2</sub> capture from cement plants. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 223, p. 692–703, 2019.

DAMIANI, Darin *et al.* The US Department of Energy's R&D program to reduce greenhouse gas emissions through beneficial uses of carbon dioxide. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 9–16, 2012.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Demonstration of the novel swing adsorption reactor cluster concept in a multistage fluidized bed with heat-transfer surfaces for postcombustion CO<sub>2</sub> capture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 59, n. 51, p. 22281–22291, 2020a.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Demonstration of the novel swing adsorption reactor cluster concept in a multistage fluidized bed with heat-transfer surfaces for postcombustion CO<sub>2</sub> capture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 59, n. 51, p. 22281–22291, 2020b.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Sorbents screening for post-combustion CO<sub>2</sub> capture via combined temperature and pressure swing adsorption. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 380, 2020c.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Study of the Cost Reductions Achievable from the Novel SARC CO<sub>2</sub> Capture Concept Using a Validated Reactor Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 60, n. 33, p. 12390–12402, 2021.

DHOKE, Chaitanya *et al.* The swing adsorption reactor cluster (SARC) for post combustion CO<sub>2</sub> capture: Experimental proof-of-principle. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 377, 2019a.

DHOKE, Chaitanya *et al.* The swing adsorption reactor cluster (SARC) for post combustion CO<sub>2</sub> capture: Experimental proof-of-principle. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 377, 2019b.

EWERT, Günter *et al.* Degradations- und Energieverhalten reaktiver Amin-Lösungen bei der CO<sub>2</sub>-Absorption/Desorption. *Chemie-Ingenieur-Technik*, [s. l.], v. 83, n. 12, p. 2121–2130, 2011.

GHOBADI, Jalil *et al.* An experimental study of a hollow-fiber membrane-contacting system for carbon dioxide/methane separation. *SPE Production and Operations*, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 400–408, 2019.

JANUSZ-CYGAN, Aleksandra *et al.* The separative performance of modules with polymeric membranes for a hybrid adsorptive/membrane process of CO<sub>2</sub> capture from flue gas. *Membranes*, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 1–18, 2020.

KONG, Yong *et al.* Facile synthesis of an amine hybrid aerogel with high adsorption efficiency and regenerability for air capture via a solvothermal-assisted sol-gel process and supercritical drying. *Green Chemistry*, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 3436–3445, 2015.

KUSUMA, Victor A. *et al.* Cross-Linked Polyphosphazene Blends as Robust CO<sub>2</sub> Separation Membranes. *ACS Applied Materials and Interfaces*, [s. l.], v. 12, n. 27, p. 30787–30795, 2020.

LEGKOV, Sergey A. *et al.* Structural Features of Monoethanolamine Aqueous Solutions with Various Compositions: A Combined Experimental and Theoretical Study Using Vibrational Spectroscopy. *Molecules*, [s. l.], v. 28, n. 1, 2023.

LEIE, Ji Hyun *et al.* Techno-economic and environmental evaluation of CO<sub>2</sub> mineralization technology based on bench-scale experiments. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, [s. l.], v. 26, p. 522–536, 2018.

LIAN, Yahui *et al.* Numerical analysis on CO<sub>2</sub> capture process of temperature swing adsorption (TSA): Optimization of reactor geometry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, [s. l.], v. 85, p. 187–198, 2019.

LIU, Bowen *et al.* Experimental investigation on separation and energy-efficiency performance of temperature swing adsorption system for CO<sub>2</sub> capture. *Separation and Purification Technology*, [s. l.], v. 227, 2019.

MENDES, Luiza *et al.* Production of methanol and organic carbonates for chemical sequestration of CO<sub>2</sub> from an NGCC power plant. CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY, 233 SPRING ST, NEW YORK, NY 10013 USA, v. 16, n. 6, p. 1095–1105, 2014.

MONDINO, Giorgia *et al.* Evaluation of MBTSA technology for CO<sub>2</sub> capture from waste-to-energy plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, [s. l.], v. 118, 2022.

MULDOON, Patrick F. *et al.* Mixed Matrix Membranes from a Microporous Polymer Blend and Nanosized Metal-Organic Frameworks with Exceptional CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation Performance. ACS Materials Letters, [s. l.], v. 2, n. 7, p. 821–828, 2020.

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA. [S. l.], 2020. Disponível em: <[https://www.nsf.gov.cn/english/site\\_1/news/A2/2020/03-06/188.html](https://www.nsf.gov.cn/english/site_1/news/A2/2020/03-06/188.html)>. Acesso em: 13 set. 2024.

NATURE. [S. l.], 2023. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/d41586-023-00102-2>>. Acesso em: 13 set. 2024.

OLAJIRE, Abass A. CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications - A review. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2010.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change,. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 4 jan. 2025.

PRAJAPATI, Aditya *et al.* Fully-integrated electrochemical system that captures CO<sub>2</sub> from flue gas to produce value-added chemicals at ambient conditions. ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE, THOMAS GRAHAM HOUSE, SCIENCE PARK, MILTON RD, CAMBRIDGE CB4 0WF, CAMBS, ENGLAND, v. 15, n. 12, p. 5105–5117, 2022.

PROTOCOLO DE QUIOTO EDITADO E TRADUZIDO PELO MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA COM O APOIO DO MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. . [S. l.: s. n.], [s. d.].

QUEREJETA, Nausika; RUBIERA, Fernando; PEVIDA, Covadonga. Enhanced capacity to CO<sub>2</sub> sorption in humid conditions with a K-doped biocarbon. *Journal of Energy Chemistry*, [s. l.], v. 34, p. 208–219, 2019.

RAO, Anand B.; RUBIN, Edward S. A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO<sub>2</sub> capture technology for power plant greenhouse gas control. *Environmental Science and Technology*, [s. l.], v. 36, n. 20, p. 4467–4475, 2002.

RIBEIRO, R. P.P.L.; GRANDE, C. A.; RODRIGUES, A. E. Activated carbon honeycomb monolith - Zeolite 13X hybrid system to capture CO<sub>2</sub> from flue gases employing Electric Swing Adsorption. *Chemical Engineering Science*, [s. l.], v. 104, p. 304–318, 2013a.

RIBEIRO, R. P.P.L.; GRANDE, C. A.; RODRIGUES, A. E. Activated carbon honeycomb monolith - Zeolite 13X hybrid system to capture CO<sub>2</sub> from flue gases employing Electric Swing Adsorption. *Chemical Engineering Science*, [s. l.], v. 104, p. 304–318, 2013b.

RIBOLDI, Luca; BOLLAND, Olav. Comprehensive analysis on the performance of an IGCC plant with a PSA process integrated for CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, [s. l.], v. 43, p. 57–69, 2015.

RODRÍGUEZ-ALBELO, L. Marleny *et al.* Selective sulfur dioxide adsorption on crystal defect sites on an isorecticular metal organic framework series. *Nature Communications*, [s. l.], v. 8, 2017.

SAIDUR, R. *et al.* A review on biomass as a fuel for boilers. [S. l.: s. n.], 2011.

SANDHU, Navjot Kaur *et al.* Steam Regeneration of Polyethylenimine-Impregnated Silica Sorbent for Postcombustion CO<sub>2</sub> Capture: A Multicyclic Study. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 55, n. 7, p. 2210–2220, 2016.

SHORT, Gabriel N. *et al.* Single-Walled Zeolitic Nanotubes: Advantaged Supports for Poly(ethylenimine) in CO<sub>2</sub> Separation from Simulated Air and Flue Gas. *JACS Au*, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 62–69, 2023.

SIMINICEANU, Ilie; TATARU-FARMUS, Ramona-Elena; BOUALLOU, Chakib. KINETICS OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION INTO AQUEOUS SOLUTIONS OF 1, 5, 8, 12- TETRAAZADODECANE (APEDA). [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>. .

SMART, J. P.; G.S. RILEY. Use of oxygen enriched air combustion to enhance combined effectiveness of oxyfuel combustion and post-combustion flue gas cleanup Part 1 - Combustion. *Journal of the Energy Institute*, [s. l.], v. 85, n. 3, p. 123–130, 2012.

SONG, Chunfeng *et al.* Reducing the energy consumption of membrane-cryogenic hybrid CO<sub>2</sub> capture by process optimization. *Energy*, [s. l.], v. 124, p. 29–39, 2017.

THIRION, Damien *et al.* Robust C-C bonded porous networks with chemically designed functionalities for improved CO<sub>2</sub> capture from flue gas. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, [s. l.], v. 12, p. 2274–2279, 2016.

VELOSO, Maria Cecília R. de A. O resíduo de bauxita no Brasil e no mundo Uma revisão bibliométrica e sistemática. 2024. 1 f. - UFSCAR, Sorocaba, 2024.

VENTURI, Davide *et al.* Effect of humidity and nanocellulose content on Polyvinylamine-nanocellulose hybrid membranes for CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 548, p. 263–274, 2018.

YE, Bin *et al.* Technical and economic analysis of amine-based carbon capture and sequestration at coal-fired power plants. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 222, p. 476–487, 2019.

ZAABOUT, Abdelghafour *et al.* A Novel Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) for Cost Effective Post-combustion CO<sub>2</sub> Capture: A Thermodynamic Assessment. *In:* , 2017a. *Energy Procedia*. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2017. p. 2488–2496.

ZAABOUT, Abdelghafour *et al.* Thermodynamic assessment of the swing adsorption reactor cluster (SARC) concept for post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, [s. l.], v. 60, p. 74–92, 2017b.

ZELEŇÁK, Vladimír *et al.* Carbon dioxide adsorption over amine modified silica: Effect of amine basicity and entropy factor on isosteric heats of adsorption. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 348, p. 327–337, 2018.

ZHAO, Li *et al.* Multi-stage gas separation membrane processes used in post-combustion capture: Energetic and economic analyses. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 359, n. 1–2, p. 160–172, 2010.

ZHAO, Zhenning *et al.* Water caltrop shell-derived nitrogen-doped porous carbons with high CO<sub>2</sub> adsorption capacity. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 145, 2021.

ZHOU, Yuming *et al.* Mercury adsorption and oxidation over magnetic biochar in oxyfuel combustion atmosphere: Impact of enriched CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. *Fuel*, [s. l.], v. 251, p. 458–465, 2019.



# CAPÍTULO 3

## CENÁRIO TEÓRICO DE CAPTURA E UTILIZAÇÃO DE CO<sub>2</sub> COM O SISTEMA SARC INTEGRADO À PRODUÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO PRECIPITADO (PCC) NA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL

### RESUMO

A integração do sistema Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) para captura de CO<sub>2</sub> foi avaliada para determinar sua viabilidade ambiental e econômica na produção de Precipitado de Carbonato de Cálcio (PCC) na indústria de celulose e papel. Desenvolveu-se um modelo conceitual de uma planta de PCC, simulando três cenários operacionais: a produção atual baseada em dados reais da planta, a produção utilizando CO<sub>2</sub> proveniente de caldeira de biomassa sem captura e a produção com CO<sub>2</sub> capturado pelo sistema SARC. O estudo utilizou o software Vulcano 2.5 para caracterizar as propriedades dos gases de combustão e o ASPEN Plus V.14 para modelar o processo de produção de PCC. A caldeira de biomassa, alimentada com cavacos de eucalipto, emite gases com concentração média de CO<sub>2</sub> de 11,88% em peso. Embora inicialmente se tenha assumido uma eficiência de captura de 80% para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e fornecer CO<sub>2</sub> para a síntese do PCC, gargalos operacionais nos hidratadores reduziram a eficiência efetiva para 27,2%. Mesmo assim, o modelo prevê uma produção teórica diária de PCC de 701,4 toneladas, em comparação com 301,4 toneladas sob as condições atuais, representando um aumento de 204% na margem de contribuição, mesmo considerando a demanda energética adicional imposta pelo sistema SARC. A análise econômica revela que a substituição da celulose pelo PCC na produção de papel poderia liberar celulose excedente para vendas externas, com um potencial de aumento de receita estimado em aproximadamente R\$ 3,02 milhões para cada incremento de 1% no teor de PCC, desde que a qualidade do papel não seja comprometida.

**Palavras-chave:** Sistema SARC, PCC, Captura de CO<sub>2</sub>, Caldeira de biomassa, Indústria de papel e celulose.

### ABSTRACT

The integration of the Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) system for CO<sub>2</sub> capture was evaluated to determine its environmental and economic viability in the production of Precipitated Calcium Carbonate (PCC) within the pulp and paper industry. A conceptual model of a PCC plant was developed, simulating three operational scenarios: the current production based on actual plant data, production using CO<sub>2</sub> from a biomass boiler without capture, and production with CO<sub>2</sub> captured by the SARC system. The study employed Vulcano 2.5 for characterizing combustion gas properties and ASPEN Plus V.14 to model the PCC production process. The biomass boiler, using eucalyptus chips, emits gases with an average CO<sub>2</sub> concentration of 11.88% by weight. Although an initial assumption of 80% CO<sub>2</sub> capture efficiency was adopted to reduce greenhouse gas emissions and provide CO<sub>2</sub> for PCC synthesis, operational bottlenecks in the hydrators reduced the effective capture efficiency to 27.2%. Despite this, the model predicts a theoretical daily PCC production of 701.4 tons, compared to 301.4 tons under current conditions—a 204% increase in contribution margin even after accounting for the additional energy demand imposed by the SARC system. Economic analysis further reveals that substituting cellulose with PCC in paper production could release surplus cellulose for external sales, with a potential revenue increase estimated at approximately R\$ 3.02 million for every 1% enhancement in PCC content, assuming paper quality remains unaffected.

**Keywords:** SARC System, PCC, CO<sub>2</sub> Capture, Biomass Boiler, Pulp and Paper Industry.

## 1. INTRODUÇÃO

A história do papel remonta à China, sendo tradicionalmente atribuída a Cai Lun, que, em 105 d.C., durante a dinastia Han, apresentou ao imperador um método de produção que utilizava cascas de árvores e restos de tecidos (Helman-Waz'ny, 2021). Ao longo dos séculos, o processo de fabricação de papel passou por significativas inovações tecnológicas. No século XIX, o desenvolvimento de processos químicos, como o método Kraft introduzido por Carl F. Dahl em 1879, permitiu a produção de celulose resistente em larga escala, consolidando a indústria de papel em países com vastos recursos florestais, como Brasil, Canadá e Suécia (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP), 2017).

Com o objetivo de reduzir custos e melhorar as propriedades do papel, a indústria adotou aditivos inorgânicos, como o Carbonato de Cálcio Precipitado (PCC), que ganhou destaque no século XX. O PCC contribui para melhorar a opacidade e a brancura do papel, além de reduzir custos ao substituir parcialmente as fibras de celulose (Pruszyński, 2016). Produzido principalmente pelas rotas sólido-líquido e sólido-líquido-gás, o método mais utilizado na indústria de papel envolve a carbonatação de uma suspensão de hidróxido de cálcio com  $\text{CO}_2$ , proveniente de fornos ou caldeiras instalados nas fábricas (Ghiasi *et al.*, 2020)(Kuparinen; Vakkilainen; Tynjälä, 2019).

Conforme citação de (Kuparinen; Vakkilainen; Tynjälä, 2019) a utilização do  $\text{CO}_2$  gerado na indústria de papel e celulose para a fabricação de PCC que será adicionado na formulação do papel não está apenas alinhado as demandas de sustentabilidade e redução na emissão dos gases de efeito estufa (GEE), mas com questões de redução de custos operacionais com logística e disponibilidade.

A indústria de celulose e papel caracteriza-se pelo alto consumo de energia e elevados custos operacionais, principalmente devido ao uso intensivo de produtos químicos durante o processo de polpação (Lim; Kim, 2022). Em função disso, apresenta potencial para integrar aos seus processos as mais recentes tecnologias para a captura de  $\text{CO}_2$ , como o sistema SARC, elevando os ganhos operacionais e ambientais em seus processos. Outra vantagem essencial dessa indústria, na aplicação da captura de  $\text{CO}_2$  é a possibilidade de estocar na formação do  $\text{CaCO}_3$  (Precipitado de Carbonato de Cálcio).

Para este estudo de caso, foi considerada uma caldeira a biomassa como fonte de geração  $\text{CO}_2$ , instalada em uma indústria de papel e celulose. Para a caldeira estudada, devido à falta de dados do projeto, foi assumido de maneira fictícia o modelo VS-5200, do fabricante HPB Engenharia e Equipamentos Ltda, movida a biomassa,

especificamente com cavaco de eucalipto, para gerar vapor, como aquecimento e geração de energia. Equipamentos como economizadores e pré-aquecedores de ar otimizam a eficiência energética, entretanto não foram objetos de análise nesse estudo. Segundo (Saidur *et al.*, 2011), na indústria americana, cerca de 37% dos combustíveis fósseis são empregados na geração de vapor. Nesse contexto, o uso de caldeiras alimentadas por biomassa surge como uma alternativa promissora para a descarbonização das operações industriais. Para a obtenção dos dados termodinâmicos dos gases de combustão, considerando o modelo da caldeira, realizou-se uma simulação utilizando o software Vulcano 2.5. Para os dados relativos à produção de PCC, foram consideradas as informações de projeto da planta no cenário representativo da condição atual e esse por sua vez foi comparado com outros dois cenários, sendo um sem a captura de CO<sub>2</sub>, utilizando apenas os dados da simulação do Vulcano 2.5 para os gases de combustão e o cenário da captura de CO<sub>2</sub>, sendo que nesse cenário, os dados termodinâmicos da geração de gases de combustão também foram simulados pelo Vulcano. Para a produção de PCC, nesses três cenários, atual, sem captura e com captura de CO<sub>2</sub>, foi utilizado o software ASPEN PLUS V.14.

Em relação às informações referentes à captura de CO<sub>2</sub>, assumiu-se que a eficiência do processo se fundamenta nos estudos mais recentes realizados com o sistema SARC (Swing Adsorption Reactor Cluster).

O sistema Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) é uma tecnologia avançada para a captura de CO<sub>2</sub> em processos de pós-combustão, utilizando oscilações de temperatura e pressão para maior eficiência. Equipado com bombas de vácuo e de calor, o sistema reduz penalidades energéticas e é especialmente eficaz em indústrias, com concentrações de CO<sub>2</sub> de até 22% nos gases de combustão (Dhoke *et al.*, 2021). Apesar do desempenho promissor desse sistema, ele ainda não foi testado em escala industrial, o que nos sinaliza que estudos futuros devem ser intensificados nessa linha de pesquisa, principalmente no desenvolvimento de novos adsorventes.

O objetivo deste estudo foi a avaliação comparativa da margem percentual de contribuição (despesas operacionais dividido pelas receitas brutas), de uma planta de PCC associados a três cenários distintos: o cenário atual de produção (110.000 toneladas por ano de PCC seco com CO<sub>2</sub> a 18%), a utilização exclusiva de CO<sub>2</sub> oriundo da caldeira de biomassa (dados simulados) sem o sistema de captura, e a utilização de CO<sub>2</sub> da caldeira de biomassa após a instalação do sistema de captura (dados simulados), ainda, nesses três

cenários comparar a de produção de PCC, a utilização de utilidades como energia elétrica, vapor e consumo de celulose.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 GASES DE COMBUSTÃO

A aquisição dos dados de vazão e concentração dos gases de combustão foi executada utilizando o software Vulcano Versão 2.5, da empresa Dynamis – Mecânica Aplicada Ltda. Com isso, foi assumido os seguintes parâmetros, vide Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros assumidos para a obtenção de vazão e concentração de CO<sub>2</sub> dos gases de combustão

| Parâmetros assumidos                                | Informações/Valores |
|---|---------------------|
| Vazão de vapor - (kg/h)                             | 200.000             |
| Pressão de vapor - kgf/cm <sup>2</sup>              | 22                  |
| Estado da substância                                | Vapor saturado      |
| Tipo de combustível                                 | Biomassa            |
| Tipo de biomassa                                    | Cavaco de Eucalipto |
| Umidade da biomassa - %                             | 40                  |
| Conversão (produção de vapor / consumo de biomassa) | 3,50                |
| Consumo de biomassa - (kg/h)                        | 57.143              |

Fonte: Elaborada pelo autor

Para os cálculos da relação ar / combustível para a de combustão do cavaco de eucalipto, foi utilizada a composição disponibilizada pela base de dados do software Vulcano, conforme descrito na Tabela 16.

Tabela 16 - Composição do combustível sólido – Eucalipto (Com 40% de umidade)

| Componente       | Fração Mássica | Número de moles       |
|------------------|----------------|-----------------------|
| C                | 28,27%         | 2,36                  |
| H                | 3,39%          | 1,70 <sup>2</sup>     |
| O                | 27,92%         | 0,87 <sup>3</sup>     |
| N                | 0,24%          | 0,00857 <sup>4</sup>  |
| S                | 0,04%          | 0,00125               |
| H <sub>2</sub> O | 40,00%         | 2,22                  |
| Teor de cinzas   | 0,14%          | **** <sup>5</sup>     |
| PCI - kJ/kg      | 9.673,6        | 14.723,6 <sup>6</sup> |
| PCS - kJ/kg      | 11.399,4       | 16.147,1 <sup>7</sup> |

Fonte: Elaborada pelo autor

<sup>2</sup> Considerado o peso molecular do H<sub>2</sub> em 2,016 g/gmol

<sup>3</sup> Considerado o peso molecular do O<sub>2</sub> em 32,000 g/gmol

<sup>4</sup> Considerado o peso molecular do N<sub>2</sub> em 28,000 g/gmol

<sup>5</sup> A massa molecular da cinza não foi considerada devido à complexidade em estimar sua composição

<sup>6</sup> Madeira com 15,11 % de umidade

<sup>7</sup> Madeira com 15,11 % de umidade

De acordo com o trabalho (Rabelo; Filho, [s. d.]), a combustão industrial, quando realizada com a quantidade teórica exata de ar, pode resultar em uma queima incompleta do combustível. Para evitar essa ineficiência, é necessário utilizar uma quantidade maior de ar, conhecida como excesso de ar. Neste estudo, foi adotado um valor de 30%, ou seja, à relação ar/combustível calculada deve-se adicionar 30% à vazão de ar. Esse excesso é responsável pela geração da quantidade adequada de gases de combustão na caldeira (Pinheiro; Valle, 2010).

## **2.2 SISTEMA DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> – SARC**

Conforme definido no trabalho de Dhoke et al. (2020a), o sistema SARC (Swing Adsorption Reactor Cluster) é composto por vários reatores de leito fluidizado que operam utilizando oscilações combinadas de temperatura e vácuo para capturar CO<sub>2</sub> pós-combustão, no caso desse estudo, dos gases de escape da caldeira biomassa e regenerar esse gás em adsorventes sólidos. Os ciclos de operação dos reatores são adsorção, evacuação, regeneração e resfriamento.

Para os dados da simulação, adotou-se uma eficiência conservadora de captura de CO<sub>2</sub>, proveniente da queima de biomassa na caldeira, de 80%, valor inferior ao utilizado por (Dhoke *et al.*, 2020a), que foi de 90%.

## **2.3 PRODUÇÃO DE PAPEL**

Conforme mencionado no trabalho de (Gaudreault *et al.*, 2015) a utilização de enchimentos inorgânicos na fabricação de papel reduz os custos operacionais, uma vez que se diminui a quantidade de celulose aplicada. Esses enchimentos, principalmente composto por PCC (Precipitado de Carbonato de Cálcio) são incorporados em proporções que variam entre 3% e 30% em massa. Nesse estudo, foi considerado o valor de 18%.

Devido a confidencialidade das informações foi assumido que as máquinas de produção de papel, em conjunto produzem 1.677 toneladas de papel por dia, ou seja, consumindo 301<sup>8</sup> toneladas de PCC por dia, vide Tabela 17.

---

<sup>8</sup> Valores assumidos como reais, para preservar a confidencialidade dos dados

Tabela 17 - Produção de papel e consumo de PCC por dia

|                    | Produção média de papel - t/dia | Consumo de PCC - t/dia |
|--------------------|---------------------------------|------------------------|
| Máquina de papel 1 | 522                             | 94                     |
| Máquina de papel 2 | 505                             | 91                     |
| Máquina de papel 3 | 650                             | 117                    |
| Total              | 1.677 <sup>9</sup>              | 301                    |

Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto à produção de celulose, considerando que as informações não estão disponíveis no site da empresa produtora, assumiu-se que toda a celulose produzida seja utilizada exclusivamente para a fabricação de papel na própria unidade. Dessa forma, não há destinação para vendas externas deste material, tampouco a necessidade de aquisição de celulose de fontes externas.

Assumindo que, para a produção de papel, 18% em massa sejam de PCC, os 82% restante se referem a celulose. Logo a produção de celulose assumida foi de: 1.375 t/dia (Equação 3).

$$Q_{\text{celulose}} = Q_{\text{papel}} \times 0,82$$

$$Q_{\text{celulose}} = 1.677 \times 0,82 = 1.375 \text{ t/dia} \quad (\text{Eq.3})$$

Onde: Q celulose: Produção celulose

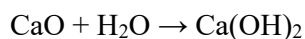
Q papel: Produção papel

## 2.4 PRODUÇÃO DE PCC

A produção de Precipitado de Carbonato de Cálcio (PCC) é um processo químico que utiliza cal virgem (CaO), água e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para obter partículas de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) com pureza e propriedades ajustáveis. O processo envolve duas etapas principais:

### 2.4.1 REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO

A cal virgem reage com água, formando hidróxido de cálcio

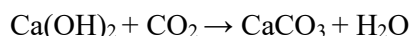


Para cada 56 kg de CaO, são necessários 18 kg de água, resultando em 74 kg de hidróxido de cálcio.

<sup>9</sup> Valores de produção de papel, fictícios devido questões confidenciais

## 2.4.2 REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO

O hidróxido de cálcio reage com CO<sub>2</sub>, formando PCC e água:



Nesta etapa, 74 kg de Ca(OH)<sub>2</sub> reagem com 44 kg de CO<sub>2</sub> para formar 100 kg de PCC, liberando 18 kg de água.

## 2.4.3 SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO DE PCC

Neste estudo, o software ASPEN PLUS V.14 foi utilizado para simular a produção de Carbonato de Cálcio Precipitado (PCC). Considerou-se, para a condição operacional atual da planta de PCC, uma produção de 110.000<sup>10</sup> toneladas de PCC seco por ano, o que corresponde a uma média diária de 301,4 toneladas. Essa produção está fundamentada no fornecimento de CO<sub>2</sub> com concentração de 18,0%, proveniente do forno de cal da unidade de papel e celulose.

Inicialmente, a simulação foi conduzida considerando as condições operacionais vigentes. Posteriormente, as mesmas condições de equipamentos foram mantidas para avaliar cenários alternativos de produção de PCC, mas com variações na concentração de CO<sub>2</sub>. Para o cenário sem captura de CO<sub>2</sub>, os dados de concentração do gás foram obtidos a partir de uma simulação da queima de biomassa (cavacos de eucalipto), realizada com o software Vulcano 2.5.

No cenário com captura de CO<sub>2</sub>, considerou-se uma taxa de recuperação de 80% do dióxido de carbono gerado na combustão da caldeira de biomassa. Essa recuperação foi atribuída à utilização de um sistema de captura denominado SARC, o qual desempenha um papel crucial na mitigação das emissões de carbono no processo em estudo.

Para a análise do desempenho do sistema de captura de CO<sub>2</sub> utilizando o SARC, não foi considerada a penalização energética associada ao processo. Essa consideração foi incluída apenas na análise da margem de contribuição e no consumo de utilidades.

## 2.4.4 MARGEM DE CONTRIBUIÇÃO DA PLANTA DE PCC E CONSUMO DE UTILIDADES

Com base nos dados operacionais da planta de PCC referentes ao período de janeiro a outubro de 2024, foram utilizados os valores absolutos de consumo de energia

---

<sup>10</sup> Valores assumidos como reais, para preservar a confidencialidade dos dados

elétrica e vapor. Assumiu-se que o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> não gera aumento adicional no consumo de vapor. Para o consumo de água, o aumento será proporcional ao aumento da produção, permanecendo o mesmo valor específico, tanto para a condição atual, sem a captura e com a captura de CO<sub>2</sub>. Para o consumo de energia elétrica, foi considerado que a penalização energética de 2,04 MJ por quilograma de CO<sub>2</sub> recuperado (o equivalente a 0,0005667 MWh/kg CO<sub>2</sub>), conforme reportado por (Dhoke *et al.*, 2019a).

No que diz respeito à margem de contribuição associada à produção de PCC, os dados foram calculados com base no período de janeiro a outubro de 2024. Para preservar questões de confidencialidade, foram utilizados valores percentuais com base na média de referência do ano de 2024 para o cálculo da condição atual (Equação 4).

A determinação dos valores médios da margem de contribuição foi realizada por meio do cálculo da média aritmética, de acordo com a metodologia descrita na Equação 5. Essa abordagem permitiu obter uma representação da margem de contribuição ao longo do período analisado. Para o caso da captura de CO<sub>2</sub> com o sistema SARC, devido a penalização energética de 0,0005667 MWh/kg CO<sub>2</sub>, o valor assumido para a energia elétrica, tomou-se como base o maior valor do PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) registrado em 2024, de R\$ 630/MWh, alcançado em 26 de setembro, por representar o cenário de maior impacto financeiro e relevância econômica CCEE (2024).

$$\% \text{ Média da margem de contribuição} = \sum_{k=i}^{10} \left( \frac{\% \text{ margem contribuição do mês } i}{10} \right) \quad (\text{Eq.4})$$

$$\text{Margem de contribuição do mês } 1 = \left( \frac{\text{Margem de contribuição do mês}}{\text{Margem de contribuição média 2024}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq.5})$$

Para as demais condições, sem a captura de CO<sub>2</sub> e com a captura de CO<sub>2</sub>, foi assumido que os novos dados de produção foram vendidos (no mesmo valor unitário do PCC) e que as despesas permaneceram inalteradas. Ainda, as comparações foram realizadas contra a média da condição atual.

Os valores considerados para o consumo de utilidades foram obtidos com base na média dos consumos absolutos relacionados à produção de PCC, para o período de janeiro a outubro de 2024, e são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores de consumo médio de energia elétrica e vapor (jan-out/24)

|                            | <b>Média</b> | <b>DesvPad</b> | <b>Erro Padrão</b> |
|----------------------------|--------------|----------------|--------------------|
| Energia Elétrica (MWh/mês) | 956,8        | 18,0           | 1,88%              |
| Vapor (t/mês)              | 80,3         | 1,5            | 1,88%              |

Fonte: Elaborada pelo autor

## 2.5 CONSUMO DE CELULOSE

Na produção de papel, a adição de PCC reduz proporcionalmente o uso de celulose no processo. Com o aumento da disponibilidade de PCC, proporcionado pela recuperação de CO<sub>2</sub>, e considerando que a celulose possui um valor agregado superior ao do PCC, é estratégico aumentar a concentração de PCC no papel, que nesse estudo foi considerado 18% em massa. Esse aumento permitiria uma maior disponibilização de celulose não utilizada na produção local de papel, que poderia ser destinada à comercialização, gerando receita adicional para a empresa produtora de celulose.

Estima-se que 75% da produção mundial de celulose seja consumida internamente nos próprios países produtores, não gerando desbalanço entre oferta e procura desse produto. Entretanto, alguns fatores externos, como economia, políticas e avanços tecnológicos podem impactar a oferta e o consumo de celulose mundialmente (Márcio Funcha, 2024).

O preço da celulose no mercado internacional, cotado em dólares, variou em 2024 entre US\$ 1.200 e US\$ 1.440 por tonelada (Márcio Funcha, 2024) e com uma taxa de câmbio de R\$ 5,00 por dólar, foi considerado nos cálculos o valor assumido em reais, em R\$ 6.000 por tonelada de celulose<sup>11</sup>.

## 2.6 SIMULAÇÕES

Para a simulação da produção de PCC apresentada neste estudo, foram assumidos dados do projeto da planta, comparando-se as condições de produção com aumento na concentração de CO<sub>2</sub>, decorrente da utilização de um sistema de recuperação desse gás, e as condições sem recuperação, limitadas ao CO<sub>2</sub> gerado na combustão da caldeira de biomassa. Os dados referentes às condições com e sem o sistema de recuperação foram inseridos no software termodinâmico ASPEN Plus V.14 para análise da síntese de produção de PCC.

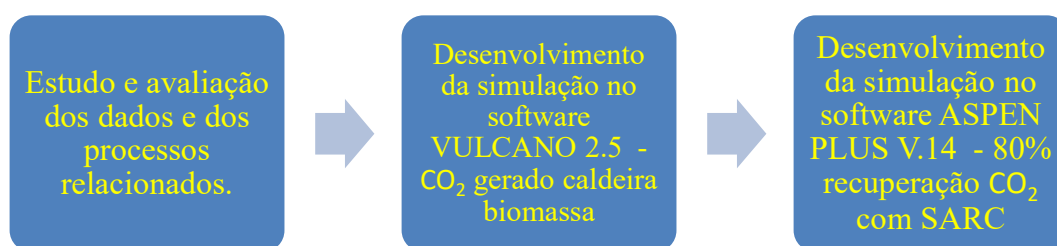
---

<sup>11</sup> Celulose de fibras curtas

Devido à ausência de informações detalhadas sobre os gases de combustão da caldeira de biomassa instaladas na planta de fabricação de papel e celulose, foi necessário realizar uma simulação adicional, utilizando o software Vulcano 2.5. A base de dados para essa simulação foi construída considerando uma caldeira de biomassa de porte compatível com as necessidades típicas de uma indústria de papel e celulose. Assumiu-se o modelo VS-5200, do fabricante HPB Engenharia e Equipamentos Ltda.

A metodologia adotada seguiu uma sequência lógica, conforme ilustrado na Figura 20, e foi estruturada para executar os procedimentos definidos nesta abordagem.

Figura 20 - Fluxograma da metodologia utilizada para as simulações



Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação aos dados de processo que serviram de base para as simulações, foram assumidos os dados da planta de PCC, conforme demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 - Variáveis de processo

| <b>Variáveis de processo</b>        |
|-------------------------------------|
| Vazão de CaO                        |
| Vazão de água                       |
| Temperatura d'água                  |
| Concentração do Hidróxido de Cálcio |
| Vazão dos gases de combustão        |
| Concentração de CO <sub>2</sub>     |
| Densidade dos gases de combustão    |
| Temperatura de CO <sub>2</sub>      |
| Vazão de PCC (CaCO <sub>3</sub> )   |
| Temperatura do PCC formado          |

Fonte: Elaborada pelo autor

A simulação foi desenvolvida utilizando a base de dados do próprio Aspen Plus V14. Os componentes e suas nomenclaturas de identificação, estão na Tabela 20.

Tabela 20 - Identificação dos componentes

| Id do componente    | Tipo         | Nome do componente  | Fórmula                        | Número CAS  |
|---------------------|--------------|---------------------|--------------------------------|-------------|
| CaO                 | Convencional | Óxido de Cálcio     | CaO                            | 1305-78-8   |
| Água                | Convencional | Água                | H <sub>2</sub> O               | 7732-18-5   |
| Ca(OH) <sub>2</sub> | Convencional | Hidróxido de Cálcio | Ca(OH) <sub>2</sub>            | 1305-62-0   |
| CaCO <sub>3</sub>   | Convencional | Carbonato de Cálcio | CaCO <sub>3</sub>              | 471-34-1    |
| CO <sub>2</sub>     | Convencional | Dióxido de Carbono  | CO <sub>2</sub>                | 124-38-9    |
| Ar                  | Convencional | Ar                  | N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> | 132259-10-0 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Para a realização da simulação e interação dos componentes, os métodos escolhidos estão definidos na Tabela 21.

De acordo com o manual do ASPEN PLUS V.14, a seleção do método ELECNRTL e do filtro "Chemical", baseia-se nas especificidades químicas e termodinâmicas do sistema que envolve reações entre CaO, H<sub>2</sub>O e Ca(OH)<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub>.

O método ELECNRTL (Electrolyte Non-Random Two-Liquid Model) é adequado para sistemas que contêm eletrólitos e apresentam reações químicas em fase líquida ou entre diferentes fases, por isso foi o escolhido para representarmos essas simulações. Além disso, o ELECNRTL fornece cálculos confiáveis de propriedades termodinâmicas, como atividades, coeficientes de fugacidade e solubilidades, essenciais para prever o comportamento dos produtos gerados na reação.

Tabela 21 - Método de interação entre os componentes

| Filtro do método | Método base | Método Água-livre | Solubilidade d'água |
|------------------|-------------|-------------------|---------------------|
| Chemical         | ELECNRTL    | Steam - TA        | 3                   |

Fonte: Elaborada pelo autor

Já no bloco dos reatores, para a realização das simulações, das opções mais utilizadas e disponíveis, vide Tabela 22, o bloco dos reatores RSTOIC foi o escolhido, devido a possibilidade para modelar as reações de hidratação do CaO e carbonatação do Ca(OH)<sub>2</sub>, pois permite representar sistemas com estequiometria fixa e rendimentos definidos, que nesse estudo foi de 85% em ambas as reações, ou seja tanto na hidratação quanto na carbonatação.

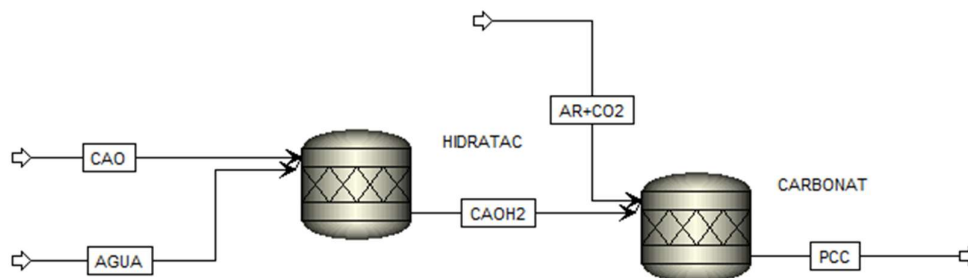
Tabela 22 - Bloco de reatores disponíveis no ASPEN PLUS V.14

| Bloco  | Base                            | Quando Usar?   |
|--------|---------------------------------|--|
| RStoic | Reação com estequiometria fixa  | Quando as reações e seus rendimentos são conhecidos e fixos.           |
| RYield | Rendimento direto               | Quando o produto final é conhecido, mas a reação não é explícita.      |
| REquil | Equilíbrio químico              | Quando as reações chegam ao equilíbrio e as constantes são conhecidas. |
| RGibbs | Minimização de energia de Gibbs | Quando o equilíbrio químico deve ser calculado automaticamente.        |

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 21 apresenta o fluxograma definido para a simulação da hidratação e da carbonatação detalhando a sequência dos blocos e as interações entre as etapas do processo. Para configurar cada bloco, foram atribuídos os valores médios das variáveis de processo, baseado tanto nos dados coletados da planta de PCC, garantindo que os parâmetros utilizados na simulação reflitam as condições operacionais especificadas.

Figura 21 - Fluxograma da simulação do processo de produção de PCC ( $\text{CaCO}_3$ )



Fonte: Aspen Plus (2024)

O CaO representado na corrente “CAO” e é a corrente de matéria-prima que abastece o reator de hidratação (“HIDRATAC”), que reagirá com a água “AGUA” formando o hidróxido de cálcio (“CAOH2”), que por sua vez reagirá no reator de carbonatação (“CARBONAT”), com uma corrente contendo  $\text{CO}_2$  (“AR +  $\text{CO}_2$ ”), proveniente da caldeira, sendo essa corrente alterada com uma nova concentração hipotética de  $\text{CO}_2$ , gerada pelo sistema SARC. A saída do reator “CARBONAT” é o PCC fabricado e que será enviado para a indústria de papel e celulose.

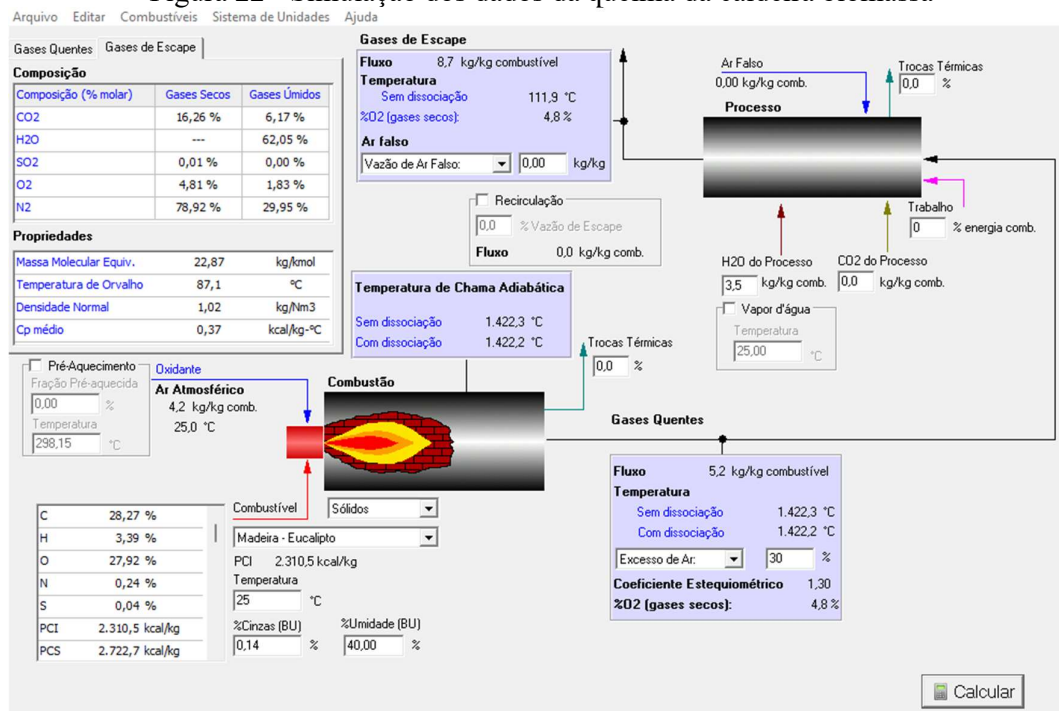


### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 GASES DE EXAUSTÃO – CALDEIRA BIOMASSA

Foi simulado no software Vulcano 2.5 os dados de vazão dos gases de combustão, baseado no modelo da caldeira de biomassa. O combustível escolhido foi o cavaco de eucalipto devido sua disponibilidade na indústria de papel e celulose. A relação entre a massa de ar já com os 30% de excesso, e a massa de combustível, para esse estudo foi de 5,2. A Figura 22, ilustra os dados da simulação.

Figura 22 - Simulação dos dados da queima da caldeira biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os experimentos de (Dhoke *et al.*, 2020b), a captura ocorreu a temperatura de 60 °C e com CO<sub>2</sub> na concentração de 12,5% de CO<sub>2</sub> em uma corrente de N<sub>2</sub>, valores bem próximos dos valores obtidos na simulação utilizando o Vulcano 2.5, onde a concentração de CO<sub>2</sub> foi de 11,88% no escape da caldeira biomassa. Vide Tabela 23. Essa proximidade dos valores nos permite assumir que os resultados dos experimentos de (Dhoke *et al.*, 2020b), possam ser representados nesse estudo.

Considerando a vazão da caldeira de 200 t/h de vapor e uma relação de 3,5 entre a produção de vapor e o consumo de cavaco de eucalipto, obteve-se um consumo de biomassa de 57,143 t/h. O fluxo simulado de gases de escape foi de 8,7 kg para cada 1,0

kg de combustível, resultando em uma vazão total de gases de escape de 497,14 t/h, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Simulação dos gases de escape/exaustão



Fonte: Elaborada pelo autor

A simulação realizada no software Vulcano 2.5 foi essencial para determinar a composição dos gases de combustão gerados por uma caldeira de biomassa, fornecendo dados para análises térmicas e ambientais. As propriedades e composição dos gases de escape também foram simuladas.

Tabela 23 - Dados da composição e algumas propriedades dos gases de escape

| Composição                            | % molar | % mássica |
|---------------------------------------|---------|-----------|
| CO <sub>2</sub>                       | 6,17    | 11,88     |
| H <sub>2</sub> O                      | 62,05   | 48,87     |
| SO <sub>2</sub>                       | 0,00    | 0,00      |
| O <sub>2</sub>                        | 1,83    | 2,56      |
| N <sub>2</sub>                        | 29,95   | 36,69     |
| Massa Molecular Equivalente - kg/kmol | 22,87   | -         |
| Temperatura de Orvalho - °C           | 87,10   | -         |
| Densidade Normal - kg/Nm <sup>3</sup> | 1,02    | -         |
| Cp médio - kcal/kg-°C                 | 0,37    | -         |

Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados obtidos, como a concentração de vapor d'água (62,05% molar) e dióxido de carbono (6,17% molar), são característicos da combustão de biomassa e indicam seu potencial para aplicações em sistemas de captura e reaproveitamento de CO<sub>2</sub>, embora o ponto de orvalho indique a temperatura mínima de trabalho, a fim de evitar a formação de condensados ácidos que vão danificar dutos e equipamentos.

Em cima dos dados gerados na simulação da caldeira de biomassa, foi possível calcular a quantidade absoluta de CO<sub>2</sub> disponível na corrente de gases de escape, vide Tabela 24.

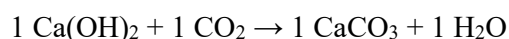
Tabela 24 - Demonstração da quantidade de CO<sub>2</sub> contida nos gases de escape da caldeira de biomassa

| Parâmetros                                  | Dados de processo |
|---|-------------------|
| Vazão de vapor - (kg/h)                     | 200.000           |
| Consumo de biomassa - (kg/h)                | 57.143            |
| Razão dos gases de exaustão                 | 8,7               |
| Vazão de gases de combustão - (kg/h)        | 497.143           |
| Concentração de CO <sub>2</sub> - %         | 11,88             |
| Vazão de CO <sub>2</sub> - (kg/h) / (t/dia) | 59.061 / 1.417    |

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando a aplicação teórica da capacidade do sistema SARC em recuperar 80% do CO<sub>2</sub> contido nos gases de escape da caldeira biomassa, temos  $1.417 \times 80\% = 1.134$  t de CO<sub>2</sub> por dia.

De acordo com (Osman *et al.*, 2021) a produção de precipitado de carbonato de cálcio (PCC) ocorre pela reação química entre o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, conforme descrito pela equação:



Em cima desses dados, é possível estimar a produção de PCC (CaCO<sub>3</sub>), pela quantidade de CO<sub>2</sub> disponível, vide Tabela 25.

Tabela 25 - Produção teórica da planta de PCC, com CO<sub>2</sub> disponível de 1.134 t/dia

| Molécula          | Peso Molecular<br>kg/kmol | Relação estequiométrica<br>em relação ao CO <sub>2</sub> | Para um CO <sub>2</sub> disponível<br>de 1.134 t/dia |
|-------------------|---------------------------|--|--|
| CaCO <sub>3</sub> | 100                       | 2,3  | 2.577  |

Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme demonstrado na Tabela 25, com 1.134 t de CO<sub>2</sub> disponível por dia, seria possível a produção teórica de 2.577 t de PCC. Entretanto o reator de hidratação não teria capacidade de geração suficiente de hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, para atender toda essa demanda para a produção de PCC, sendo portanto o novo gargalo da planta.

Nesse sentido, foi considerado a capacidade de produção nominal do Ca(OH)<sub>2</sub>, no valor de 519 t/dia, já considerando a indisponibilidade do equipamento, para manutenções, de 9%.

Como o gargalo da produção passou a ser produção de hidróxido de cálcio, a quantidade de CO<sub>2</sub> necessária para a nova demanda de produção de PCC foi de 308,6 t/dia

de CO<sub>2</sub>, fazendo com que a eficiência do sistema SARC fosse menor, apenas 27,2%, conforme Equação 6.

$$\text{Eficiência SARC} = \frac{308,6}{1.134} \times 100 = 27,2\% \quad \text{(Eq.6)}$$

Com esse novo valor de 519 t/dia de Ca(OH)<sub>2</sub> foi determinado qual seria a produção de PCC teórica e a quantidade de CO<sub>2</sub> necessária para tal produção. Essas informações teóricas estão informadas na Tabela 26 e foram utilizadas na simulação dos dados no ASPEN PLUS V.14.

Tabela 26 - Dados de produção de PCC teóricos – Cenários atual, sem e com captura de CO<sub>2</sub>

| #                               | Consumo de CaO - t/dia | Consumo d'água - t/dia | Ca(OH) <sub>2</sub> <sup>12</sup> t/dia | Concentração de CO <sub>2</sub> - % | Demais gases - % | Consumo de CO <sub>2</sub> - t/dia | Produção de CaCO <sub>3</sub> - t/dia |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|---|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Condição atual planta PCC       | 168,8                  | 760,5                  | 223,0                                   | 18,0                                | 82,0             | 132,6                              | 301,4                                 |
| Gases da caldeira biomassa      |                        |                        |   |                                     |                  |                                    |                                       |
| -                               | 112,1                  | 505,1                  | 148,1                                   | 11,9                                | 88,1             | 88,1                               | 200,2                                 |
| Sem recuperação CO <sub>2</sub> |                        |                        |   |                                     |                  |                                    |                                       |
| Gases da caldeira biomassa      |                        |                        |   |                                     |                  |                                    |                                       |
| -                               | 392,8                  | 1.769,7                | <b><u>519,0</u></b>                     | 43,6                                | 56,4             | 308,6                              | 701,4                                 |
| Com recuperação CO <sub>2</sub> |                        |                        |   |                                     |                  |                                    |                                       |

Fonte: Elaborada pelo autor

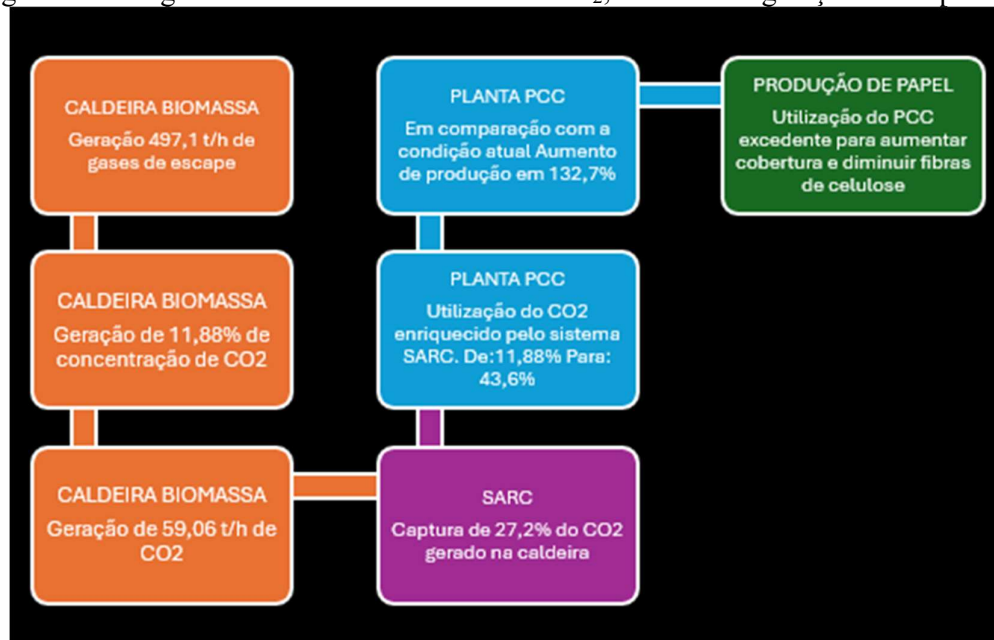
<sup>12</sup> Considerado que todo o Ca(OH)<sub>2</sub> gerado é consumido na etapa da carbonatação

### 3.2 DADOS DA SIMULAÇÃO NO ASPEN PLUS V.14

A simulação no ASPEN PLUS V.14 foi conduzida utilizando correntes geradas automaticamente pelo software. Nas Figuras 25 e 27, são detalhados os parâmetros e informações inseridos no programa para a realização das análises. As streams ou correntes, foram consideradas: CaO, Água, Ca(OH)<sub>2</sub>, Ar + CO<sub>2</sub> e PCC. Quanto aos reatores, ambos foram RStoic, nominalmente definidos como HIDRATAC, para a hidratação do CaO e CARBONAT, para a carbonatação do Ca(OH)<sub>2</sub> com CO<sub>2</sub>.

Conforme demonstrado na Figura 24, a rota da captura do CO<sub>2</sub> desde a sua geração até a aplicação, passando pela captura com o sistema SARC.

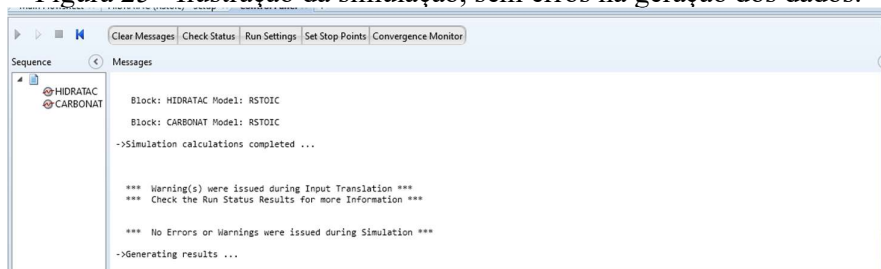
Figura 24 - Diagrama demonstrativo da rota do CO<sub>2</sub>, desde a sua geração até a aplicação



Fonte: Elaborada pelo autor

Para que se garanta que as simulações foram geradas sem erros, o software ASPEN PLUS V14 emite um relatório trazendo tais informações, conforme podemos verificar na Figura 25.

Figura 25 - Ilustração da simulação, sem erros na geração dos dados.



Fonte: Aspen Plus

### 3.2.1 CAO

Das Figuras 26 e 27 podemos verificar os dados inseridos no software ASPEN PLUS V.14. Já as Tabelas 27 a 31 foram os resultados das simulações.

Tabela 27 - Dados simulação CaO

| #           | Nome | Temperatura - °C | Pressão - bar | Vazão - t/dia | Fração Mássica |
|-------------|------|------------------|---------------|---------------|----------------|
| Atual       | CAO  | 25               | 1             | 169           | 1              |
| Sem captura | CAO  | 25               | 1             | 112           | 1              |
| Com captura | CAO  | 25               | 1             | 393           | 1              |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.2 ÁGUA

Tabela 28 - Dados simulação Água

| #           | Nome | Temperatura - °C | Pressão - bar | Vazão - t/dia | Fração Mássica |
|-------------|------|------------------|---------------|---------------|----------------|
| Atual       | AGUA | 35               | 2             | 760           | 1              |
| Sem captura | AGUA | 35               | 2             | 505           | 1              |
| Com captura | AGUA | 35               | 2             | 1.770         | 1              |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.3 AR + CO<sub>2</sub>

Tabela 29 - Dados simulação gases de escape

| #           | Nome                | Temperatura - °C | Pressão - bar | Vazão - t/dia | Fração Mássica  |
|-------------|---------------------|------------------|---------------|---------------|-----------------|
| Atual       | AR+ CO <sub>2</sub> | 45               | 2             | 737           | 0,82 / 0,18     |
| Sem captura | AR+ CO <sub>2</sub> | 45               | 2             | 741           | 0,8812 / 0,1188 |
| Com captura | AR+ CO <sub>2</sub> | 45               | 2             | 708           | 0,564 / 0,436   |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.4 HIDRATAÇÃO

Tabela 30 - Dados simulação reator de hidratação

| #           | Nome     | Temperatura - °C | Pressão<br>bar | Reação                                      | Rendimento |
|-------------|----------|------------------|----------------|---|------------|
| Atual       | HIDRATAC | 85               | 1              | CaO+ H <sub>2</sub> O ->Ca(OH) <sub>2</sub> | 0,85       |
| Sem captura | HIDRATAC | 85               | 1              | CaO+ H <sub>2</sub> O ->Ca(OH) <sub>2</sub> | 0,85       |
| Com captura | HIDRATAC | 85               | 1              | CaO+ H <sub>2</sub> O ->Ca(OH) <sub>2</sub> | 0,85       |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 26 - Dados da hidratação inseridos no ASPEN PLUS V.14

| Rxn No. | Specification type | Molar extent | Units   | Fractional conversion | Fractional Conversion of Component | Stoichiometry                  |
|---------|--------------------|--------------|---------|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1       | Frac. conversion   |              | kmol/hr | 0,85                  | CAO                                | CAO + WATER --> CA(OH)2(MIXED) |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.5 CARBONATAÇÃO

Tabela 31 - Dados simulação reator de carbonatação

| #           | Nome     | Temperatura<br>°C | Pressão<br>bar | Reação   | Rendimento |
|-------------|----------|-------------------|----------------|--|------------|
| Atual       | CARBONAT | 65                | 2              | Ca(OH) <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → CaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O | 0,85       |
| Sem captura | CARBONAT | 65                | 2              | Ca(OH) <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → CaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O | 0,85       |
| Com captura | CARBONAT | 65                | 2              | Ca(OH) <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → CaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O | 0,85       |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 27 - Dados da carbonatação inseridos no ASPEN PLUS V.14

| Rxn No. | Specification type | Molar extent | Units   | Fractional conversion | Fractional Conversion of Component | Stoichiometry                                 |
|---------|--------------------|--------------|---------|-----------------------|------------------------------------|---|
| 1       | Frac. conversion   |              | kmol/hr | 0,85                  | CA(OH)2                            | CA(OH)2 + CO2 --> CACO3(MIXED) + WATER(MIXED) |

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 32 - Dados simulação demanda de calor e fração de vapor do reator de carbonatação

|                          | Atual                 | Sem captura           | Com captura           |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Demanda de calor - cal/s | 3,506x10 <sup>6</sup> | 2,478x10 <sup>6</sup> | 7,536x10 <sup>6</sup> |
| Fração de vapor          | 0,370                 | 0,496                 | 0,148                 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda, sobre a relação entre a demanda de calor e a fração de vapor estão relacionadas as propriedades termodinâmicas do sistema, da concentração do CO<sub>2</sub>, uma vez que as alterações na composição dos reagentes, influenciam o equilíbrio líquido-

vapor e a eficiência da transferência de calor, impactando diretamente a fração de vapor gerada.

### 3.3 MARGEM DE CONTRIBUIÇÃO

Os dados operacionais da planta de PCC, referentes ao período de janeiro a outubro de 2024, para a captura de CO<sub>2</sub>, de acordo com (Dhoke *et al.*, 2019a) considerou-se uma penalização energética de 0,0005667 MWh/kg CO<sub>2</sub> recuperado, com base no maior PLD registrado em 2024 (R\$ 630/MWh), para representar o cenário de maior impacto financeiro (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), 2024). As margens de contribuição foram calculadas pela média aritmética (Equações 2 e 3) e comparadas entre as condições atuais e com captura de CO<sub>2</sub>, considerando que as despesas operacionais permaneceram inalteradas e são demonstradas conforme Tabela 33.

Tabela 33 - Comparação entre as das margens de contribuição

|                                     | Média % Margem contribuição |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Cenário Atual                       | 100%                        |
| Cenário sem captura CO <sub>2</sub> | 27%                         |
| Cenário com captura CO <sub>2</sub> | 304%                        |

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.4 CONSUMO DE UTILIDADES

Os valores de consumo de utilidades para a produção de PCC foram calculados com base na média dos dados operacionais coletados entre janeiro e outubro de 2024. O consumo médio de energia elétrica foi de 956,8 MWh/mês, com desvio padrão de 18,0 e erro padrão de 1,88%, enquanto o consumo médio de vapor foi de 80,3 t/mês, com os mesmos parâmetros de variação. Assumiu-se que o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> não implica acréscimo no consumo de vapor, e que o consumo de água cresce proporcionalmente à produção, mantendo-se constante o valor específico em todas as condições operacionais (com e sem captura). Para o consumo de energia elétrica, considerou-se a penalização energética de 2,04 MJ/kg CO<sub>2</sub> recuperado (equivalente a 0,0005667 MWh/kg CO<sub>2</sub>), conforme descrito por (Dhoke *et al.*, 2019a).

A Tabela 34 apresenta os dados de consumo específico de energia elétrica e vapor para a produção de PCC, considerando as seguintes condições operacionais: condição

atual, condição sem captura de CO<sub>2</sub> e condição com captura de CO<sub>2</sub>. Essas informações permitem uma análise comparativa entre os diferentes cenários avaliados.

Tabela 34 - Utilização das utilidades.

|                                | Energia Elétrica - MWh/t PCC | t Vapor/t PCC |
|--------------------------------|------------------------------|---------------|
| Condição Atual                 | 0,1044                       | 0,0088        |
| Sem captura de CO <sub>2</sub> | 0,1593                       | 0,0134        |
| Com captura de CO <sub>2</sub> | 0,1876                       | 0,0038        |

Fonte: Elaborada pelo autor

A análise dos dados operacionais históricos da planta de produção de PCC, e a aplicação da penalização energética para o sistema de captura de CO<sub>2</sub> com o sistema SARC, foram fundamentais para que a comparação fosse a mais justa possível, ainda mais pelo fato da assunção de que todo acréscimo de produção de PCC em virtude da captura de CO<sub>2</sub> fosse vendido.

### 3.5 PRECIPITADO DE CARBONATO DE CÁLCIO (PCC)

Os dados relacionados a produção de PCC, comparado entre os cenários Atual, sem e com captura de CO<sub>2</sub> estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Dados simulação produção PCC

|                           | Units     | PCC - Atual | PCC – Sem<br>captura | PCC – Com<br>captura |
|---------------------------|-----------|-------------|----------------------|----------------------|
| Temperatura               | C         | 65          | 65                   | 65                   |
| Pressão                   | Bar       | 2           | 2                    | 2                    |
| Fração Molar de Vapor     |           | 0,37        | 0,50                 | 0,15                 |
| Fração Molar de Líquido   |           | 0,63        | 0,50                 | 0,85                 |
| Fração Molar de Sólido    |           | 0,00        | 0,00                 | 0,00                 |
| Fração Mássica de Vapor   |           | 0,42        | 0,55                 | 0,18                 |
| Fração Mássica de Líquido |           | 0,58        | 0,45                 | 0,82                 |
| Fração Mássica de Sólido  |           | 0,00        | 0,00                 | 0,00                 |
| Entalpia Molar            | cal/mol   | -49.845     | -41.370              | -64.776              |
| Entalpia Mássica          | cal/gm    | -2.009      | -1.623               | -2.743               |
| Entropia Molar            | cal/mol-K | -28         | -22                  | -37                  |
| Entropia Mássica          | cal/gm-K  | -1,1        | -0,9                 | -1,6                 |
| Densidade Molar           | mol/cc    | 0,0002      | 0,0001               | 0,0005               |
| Densidade Mássica         | gm/cc     | 0,0048      | 0,0037               | 0,0112               |
| Fluxo de Entalpia         | cal/sec   | -38.367.292 | -25.318.375          | -89.957.054          |
| Massa Molecular Média     |           | 24,8        | 25,5                 | 23,6                 |
| Fluxo Molar               | kmol/hr   | 2.771,0     | 2.203,2              | 4.999,5              |
| Fluxo de Massa            | kg/hr     | 68.766,2    | 56.174,1             | 118.074,5            |
| Fluxo de Volume           | l/min     | 241.275,2   | 256.455,6            | 175.749,6            |

Fonte: Elaborada pelo autor

Nos três cenários avaliados para a produção de PCC, tanto a temperatura quanto a pressão operacional permaneceram constantes em 65°C e 2,0 bar respectivamente.

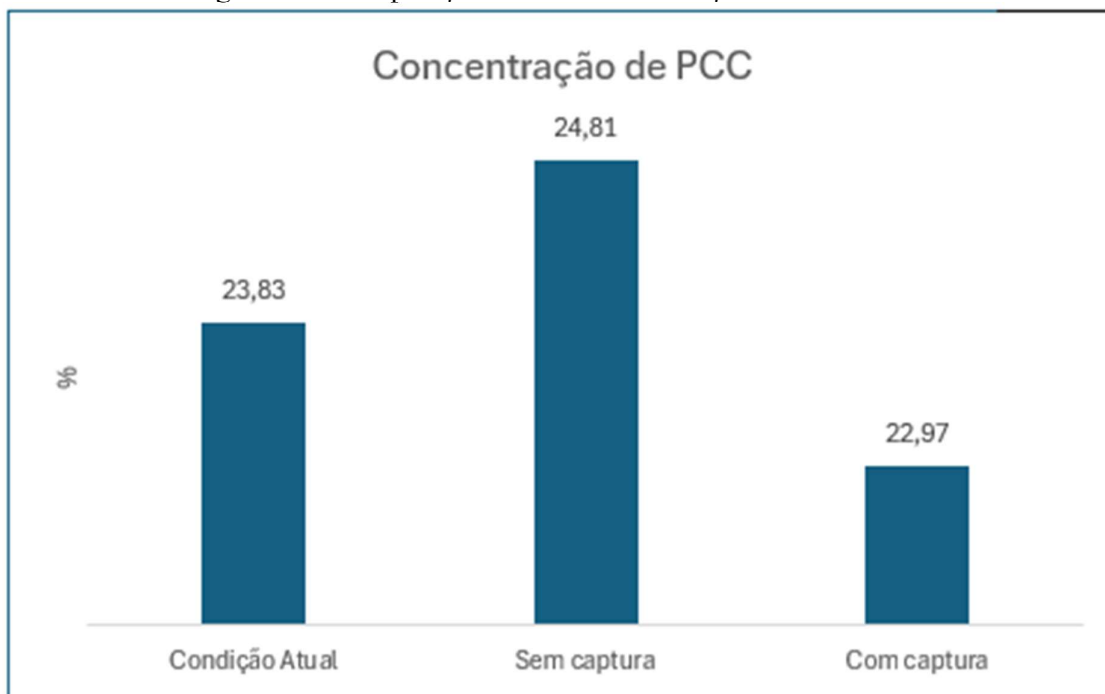
A análise das frações molares e mássicas revela que, no cenário atual, a fase líquida é predominante, correspondendo a 63% molar, enquanto a fase vapor representa 37% molar. No cenário sem captura, as proporções das fases vapor e líquida são iguais, com 50% cada. Já no cenário com captura, ocorre um aumento significativo da fase líquida, atingindo 85% molar, atribuído à remoção de CO<sub>2</sub> e ao consequente aumento da condensação.

No cenário com captura, a entalpia molar apresenta o valor negativo de -64.776 cal/mol, o que reflete o maior consumo energético necessário para o processo de captura de CO<sub>2</sub>. A entropia molar também é menor (-37 cal/mol-K), indicando uma menor dispersão energética no sistema, característica de processos mais estáveis e organizados.

A densidade molar e mássica no cenário com captura é maior (0,0005 mol/cc e 0,0112 g/cc, respectivamente), demonstrando uma maior concentração de massa no sistema. Em contrapartida, o fluxo volumétrico diminui, o que pode ser explicado pela maior densidade do material processado, que ocupa menos espaço.

Já em relação a concentração de PCC varia devido às diferenças nas frações de vapor e líquido e na eficiência do uso de CO<sub>2</sub> nos três cenários, evidenciamos maior condensação (85% molar líquido) para o cenário de captura, isso conciliado ao aumento da densidade da pseudo-solução, justificaria a menor concentração, conforme evidenciado na Figura 28.

Figura 28 - Comparação entre as concentrações de PCC

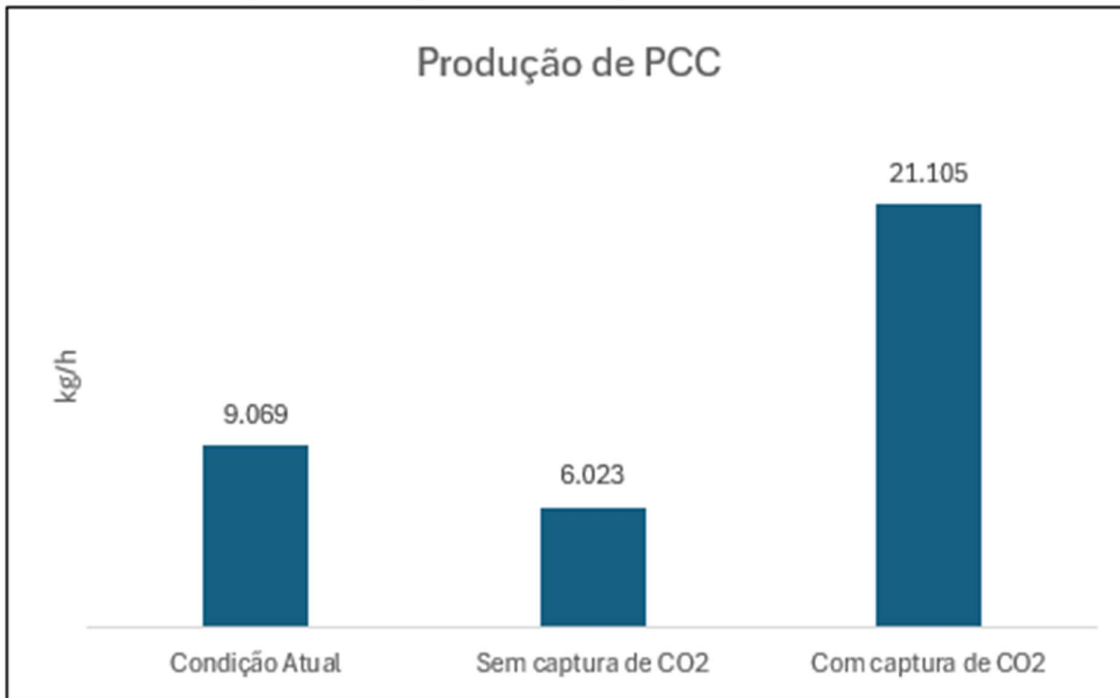


Fonte: Elaborada pelo autor

Embora o cenário com captura demande mais energia, ele viabiliza a remoção de CO<sub>2</sub> dos gases emitidos, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Essa capacidade torna o processo ambientalmente vantajoso, mesmo considerando os custos energéticos associados à sua implementação.

A Figura 29 traz uma comparação entre a captura de CO<sub>2</sub>, comparando os dados atuais, sem o sistema de captura e com sistema de captura.

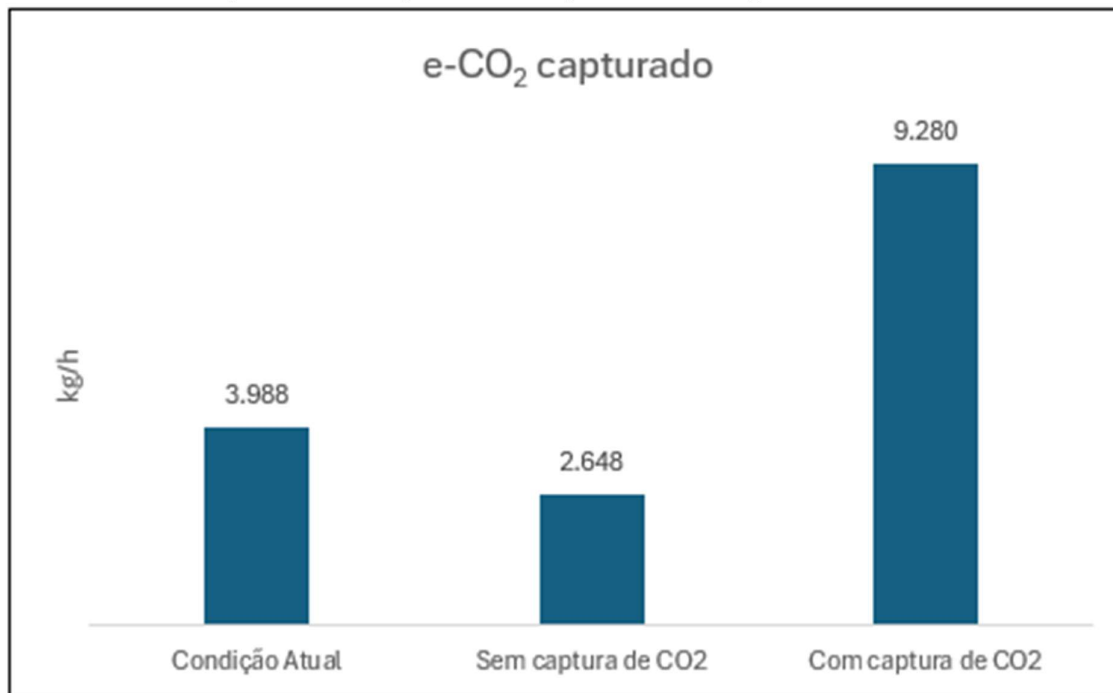
Figura 29 - Comparação entre as produções de PCC



Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda, sobre a produção de PCC, a reação de carbonatação do hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), faz com que o  $\text{CO}_2$  capturado seja aplicado/armazenado na molécula formada de carbonato de cálcio, o que contribui para a diminuição líquida das emissões de gases de efeito estufa. Com a implementação do sistema SARC de captura, observou-se um aumento significativo na quantidade de  $\text{CO}_2$  capturada e aplicada no PCC, indicando que o sistema simulado está removendo mais  $\text{CO}_2$  do que é emitido. A Figura 30 apresenta a relação entre a quantidade de  $\text{CO}_2$  equivalente<sup>13</sup> capturado nesse processo.

<sup>13</sup> O Aspen Plus quantifica emissões de gases de efeito estufa em  $\text{CO}_2$  equivalente, categorizando-as em escopo 1 (diretas) e escopo 2 (combustão), conforme normas internacionais, viabilizando análise de impacto ambiental.

Figura 30 - Comparação de captura de CO<sub>2</sub> equivalente

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.6 CELULOSE

A cada 1% a mais de PCC no papel, o potencial de receita com a venda da celulose que seria deixada de utilizar na fábrica para a produção de papel poderia ser de R\$3.018.600.

A Tabela 36 e a Figura 31 abaixo apresentam essa relação entre o incremento da adição do PCC ao papel e a redução proporcional de celulose, disponibilizando esse último para a venda ao mercado. No entanto, é essencial realizar o aumento da concentração de PCC no papel com cautela, uma vez que a alteração da relação entre celulose e PCC pode influenciar as propriedades de qualidade do produto final (Mohamadzadeh-Saghavaz; Resalati; Ghasemian, 2014).

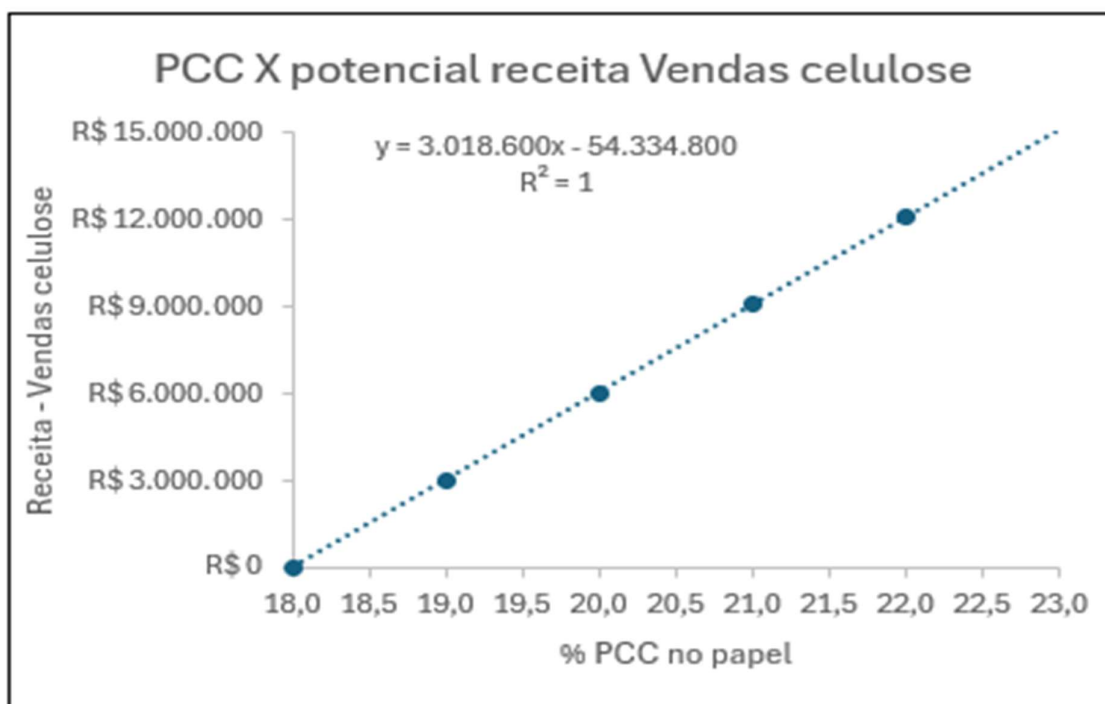
Tabela 36 - Aumento de PCC e disponibilização de celulose para a venda

| Produção papel (t/dia) | % PCC | % Celulose | Utilização de PCC (t/dia) | Utilização de Celulose (t/dia) | Celulose disponível (t/dia) | Preço celulose (R\$/t) | Receita bruta c/ venda celulose (R\$) |
|------------------------|-------|------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 1.677                  | 18    | 82         | 302                       | 1.375                          | 0                           | R\$ 6.000              | 0                                     |
| 1.677                  | 19    | 81         | 319                       | 1.358                          | 16,77                       | R\$ 6.000              | 3.018.600                             |
| 1.677                  | 20    | 80         | 335                       | 1.342                          | 33,54                       | R\$ 6.000              | 6.037.200                             |
| 1.677                  | 21    | 79         | 352                       | 1.325                          | 50,31                       | R\$ 6.000              | 9.055.800                             |
| 1.677                  | 22    | 78         | 369                       | 1.308                          | 67,08                       | R\$ 6.000              | 12.074.400                            |

| Produção<br>papel<br>(t/dia) | % PCC | % Celulose | Utilização<br>de PCC<br>(t/dia) | Utilização de<br>Celulose<br>(t/dia) | Celulose<br>disponível<br>(t/dia) | Preço<br>celulose<br>(R\$/t) | Receita bruta c/<br>venda<br>celulose<br>(R\$) |
|------------------------------|-------|------------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--|
| 1.677                        | 23    | 77         | 386                             | 1.291                                | 83,85                             | R\$ 6.000                    | 15.093.000                                     |
| 1.677                        | 24    | 76         | 402                             | 1.275                                | 100,62                            | R\$ 6.000                    | 18.111.600                                     |
| 1.677                        | 25    | 75         | 419                             | 1.258                                | 117,39                            | R\$ 6.000                    | 21.130.200                                     |

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 31 - Aumento de PCC e potencial receita adicional de venda de celulose excedente.



Fonte: Elaborada pelo autor

A análise dos dados indica que o aumento na concentração de PCC no papel apresenta um significativo potencial econômico de geração de receita adicional à empresa produtora de papel, isso pelo fato do aumento da recuperação de CO<sub>2</sub>, proporcionar maior produção de PCC e abrir campo para a pesquisa e desenvolvimento de aumentar a carga de PCC (que nesse estudo foi considerado 18%), em detrimento a redução da utilização de celulose, obviamente sem que haja penalidades em parâmetros de qualidade no papel produzido, habilitando esse excedente de celulose para a venda no mercado nacional e / ou internacional.

A cada incremento de 1% na substituição de celulose por PCC, a produção diária de papel permanece constante em 1.677 toneladas, enquanto a quantidade de celulose

disponível para comercialização aumenta proporcionalmente, resultando em receitas adicionais relevantes. Por exemplo, ao elevar o teor de PCC de 18% para 19%, são liberadas 16,77 toneladas de celulose por dia, o que corresponde a uma receita adicional de R\$ 3.018.600, considerando o preço unitário de R\$ 6.000 por tonelada.

Embora os benefícios financeiros sejam evidentes, a elevação da concentração de PCC requer cautela, uma vez que alterações na proporção de celulose e PCC podem impactar diretamente propriedades essenciais do papel, como resistência, opacidade e brilho, afetando a qualidade do produto final. Estudos como os de (Mohamadzadeh-Saghavaz; Resalati; Ghasemian, 2014) ressaltam a necessidade de equilibrar a viabilidade econômica com a manutenção das características técnicas do papel.

Portanto, a substituição de celulose por PCC representa uma estratégia promissora do ponto de vista econômico, desde que sejam realizadas avaliações criteriosas para determinar os limites aceitáveis de modificação das propriedades do papel e os possíveis impactos nos processos de produção. A decisão de implementar tal mudança deve ser embasada em análises técnico-econômicas robustas, garantindo a sustentabilidade do processo e a competitividade do produto no mercado.

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que a integração do sistema SARC à produção de PCC não apenas aumenta a margem percentual de contribuição, como também promove ganhos na eficiência operacional e sustentabilidade ambiental. Ao comparar os três cenários avaliados, verificou-se que o cenário com captura de CO<sub>2</sub> possibilitou um aumento na produção teórica de PCC para 701,4 toneladas por dia, em contraste com 301,4 toneladas no cenário atual, representando um crescimento de 204% na margem de contribuição. Esses resultados destacam o potencial econômico da captura de CO<sub>2</sub>, que viabiliza esforços para aumentar a participação do PCC na composição do papel e em contrapartida a redução de celulose, liberando excedentes de celulose para comercialização para o mercado interno e ou externo, com receita potencial adicional de R\$ 3,02 milhões por cada 1% de aumento no teor de PCC, sem que haja comprometimento na qualidade do papel produzido.

Além disso, as análises comparativas dos consumos de energia elétrica e vapor mostraram que, embora o cenário com captura exija maior consumo energético, a valorização econômica decorrente da comercialização de celulose e do PCC sustentável compensa os custos operacionais adicionais. A eficiência do sistema SARC, estimada em 27,2%, evidencia o impacto das limitações operacionais atuais da planta de PCC, como gargalos nos hidratadores, apontando a necessidade de melhorias nos processos de integração.

Por fim, este estudo reforça que a captura de CO<sub>2</sub> na indústria de papel e celulose é uma estratégia viável, sendo importante ressaltar que não há indicações em literatura sobre o investimento em uma planta de captura de CO<sub>2</sub>, utilizando o sistema SARC, o que nos possibilita a recomendar estudos futuros com ênfase na escalabilidade do sistema SARC e em tecnologias que reduzam ainda mais as penalidades energéticas, consolidando esta abordagem como uma solução eficiente e sustentável para a indústria de papel e celulose, com planta de PCC on site.



## 5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL (ABTCP). O Processo Kraft de Fabricação de Celulose. [S. l.], 2017. Disponível em: [https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2017\\_Processo%2BKraft%2BBook%2BABTCP.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2017_Processo%2BKraft%2BBook%2BABTCP.pdf).

Acesso em: 4 jan. 2025.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). InfoPLD – Boletim Semanal. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/dados-e-analises/dados-pld>. Acesso em: 20 nov. 2024.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Demonstration of the novel swing adsorption reactor cluster concept in a multistage fluidized bed with heat-transfer surfaces for postcombustion CO<sub>2</sub> capture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 59, n. 51, p. 22281–22291, 2020a.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Demonstration of the novel swing adsorption reactor cluster concept in a multistage fluidized bed with heat-transfer surfaces for postcombustion CO<sub>2</sub> capture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 59, n. 51, p. 22281–22291, 2020b.

DHOKE, Chaitanya *et al.* Study of the Cost Reductions Achievable from the Novel SARC CO<sub>2</sub> Capture Concept Using a Validated Reactor Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 60, n. 33, p. 12390–12402, 2021.

DHOKE, Chaitanya *et al.* The swing adsorption reactor cluster (SARC) for post combustion CO<sub>2</sub> capture: Experimental proof-of-principle. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 377, 2019.

GAUDREAU, Roger *et al.* Structure and Strength of Floes of Precipitated Calcium Carbonate Induced by Various Polymers Used in Papermaking. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 54, n. 24, p. 6234–6246, 2015.

GHIASI, Meisam *et al.* Control of the morphology, specific surface area and agglomeration of precipitated calcium carbonate crystals through a multiphase carbonation process. *CrystEngComm*, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 1970–1984, 2020.

HELMAN-WAZ'NY, Agnieszka. A tale of papermaking along the Silk Road. *In: EXPLORING WRITTEN ARTEFACTS*. [S. l.]: De Gruyter, 2021. p. 423–440.

KUPARINEN, Katja; VAKKILAINEN, Esa; TYNJÄLÄ, Tero. Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, [s. l.], v. 24, n. 7, p. 1213–1230, 2019.

LIM, Jonghun; KIM, Junghwan. Optimizing ash deposit removal system to maximize biomass recycling as renewable energy for CO<sub>2</sub> reduction. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 190, p. 1006–1017, 2022.

MÁRCIO FUNCHA. Comportamento do mercado mundial do setor de celulose e papel. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.sinpacel.org.br/wp-content/uploads/2024/10/comportamento-do-mercado-mundial-do-setor-de-celulose-e-papel.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

MOHAMADZADEH-SAGHAHAZ, Kamel; RESALATI, Hossein; GHASEMIAN, Ali. Cellulose-precipitated calcium carbonate composites and their effect on paper properties. *Chemical Papers*, [s. l.], v. 68, n. 6, p. 774–781, 2014.

OSMAN, Ahmed I. *et al.* Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021.

PINHEIRO, Paulo César C; VALLE, Ramon Molina. Controle de Combustão: Otimização do excesso de ar. [s. l.], n. 2, p. 157–162, 2010. Disponível em: <http://www.demec.ufmg.br/professor/paulocpinheiro/papers/excesso.pdf>.

PRUSZYNSKI, Przemyslaw. Recent developments in papermaking chemicals. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/287528124>.

RABELO, Ricardo; FILHO, Arruda. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE BAURU

METODOLOGIA PARA ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR COM QUEIMA DE BAGAÇO DE CANA. [S. l.: s. n.], [s. d.].

SAIDUR, R. *et al.* A review on biomass as a fuel for boilers. [S. l.: s. n.], 2011.



# CONCLUSÃO GERAL

Este estudo apresenta uma análise aprofundada das questões ambientais globais, com foco no aumento das emissões de gases de efeito estufa desde a Revolução Industrial. Embora tenha fornecido um panorama relevante sobre o tema, a conexão entre esses desafios e a aplicação prática das tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, especialmente as baseadas em biomassa, poderia ser mais explorada em estudos futuros. A biomassa, tratada como uma fonte renovável de CO<sub>2</sub> com base nos dados simulados dos gases de combustão, apresenta desafios relacionados à viabilidade da captura, particularmente devido à condensação de gases ácidos, o que pode comprometer a infraestrutura das instalações industriais.

A pesquisa também trouxe informações sobre as principais tendências globais na captura de CO<sub>2</sub>, destacando os avanços e as limitações atuais, com ênfase nas tecnologias mais estudadas. Embora os estudos apresentem algumas restrições, especialmente no que tange à aplicabilidade prática das tecnologias, a análise oferece uma visão da produção acadêmica, apontando tendências e áreas críticas que necessitam de mais investigação.

Com base nas tendências globais, a pesquisa sobre captura de CO<sub>2</sub> tem mostrado um esforço crescente, especialmente em resposta a acordos internacionais como o Acordo de Paris. A liderança da China e dos EUA nesse campo evidencia a importância estratégica do tema, e o Brasil tem se destacado na produção de artigos relevantes, especialmente durante a pandemia.

O sistema Swing Adsorption Reactor Cluster (SARC) se apresenta como uma solução promissora para captura de CO<sub>2</sub>, devido à sua competitividade em comparação com outros sistemas, como as aminas. No entanto, a implementação em larga escala ainda depende de avanços técnicos e operacionais. A oxi-combustão, embora tenha se mostrado vantajosa devido ao baixo consumo energético, enfrenta limitações na aplicação em instalações existentes, devido aos altos custos e à necessidade de grandes áreas dentro de uma instalação industrial existente.

A discussão sobre a aplicação prática do SARC em outras indústrias poderia fortalecer ainda mais a viabilidade dessa tecnologia. Por isso, recomenda-se que as pesquisas sobre o SARC continuem, com foco na superação dos desafios de integração em plantas industriais existentes e na melhoria da eficiência dos adsorvedores. Detalhar como superar essas barreiras é essencial para consolidar o SARC como uma tecnologia de grande potencial para contenção das emissões dos GEE's, como CO<sub>2</sub>.

Este trabalho também trouxe contribuições técnicas, especialmente ao apresentar uma modelagem econômica baseada na experiência do autor. A comparação da margem de contribuição de uma planta de PCC, com e sem a implementação do SARC versus as condições atuais, mostrou que a captura de CO<sub>2</sub> de uma caldeira movida a biomassa, aplicada na produção de papel, resulta em uma margem de contribuição maior. O estudo evidenciou que, embora o aumento teórico da produção de PCC seja significativo, com um crescimento de até 204%, a eficácia do sistema depende do equilíbrio entre o custo operacional e a eficiência da captura de CO<sub>2</sub>. Ainda, se manter as qualidades físicas e ópticas do papel, o aumento da produção de PCC poderá trazer a indústria produtora de papel e celulose, um ganho em disponibilizar celulose para o mercado externo.

Em conclusão, este estudo avançou o conhecimento sobre a captura de CO<sub>2</sub> e suas soluções sustentáveis, especialmente no uso do CO<sub>2</sub> na produção de PCC e papel. A continuidade das pesquisas, particularmente no Brasil, fortalece essas tecnologias, ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promovendo a sustentabilidade industrial. As futuras investigações, especialmente na melhoria da eficiência energética e na escalabilidade do SARC, têm grande potencial para transformar a captura de CO<sub>2</sub> em uma solução viável e aplicada no setor industrial.

## 6. APÊNDICE

### Apêndice A. Lista de artigos selecionados para a análise sistemática

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                       | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|----------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,999958845             | 1         | Warmuzinski, K;<br>Janusz-Cygan, A;<br>Jaschik, M;<br>Tanczyk, M;<br>Wojdyla, A                       | Use of commercial membrane modules for the capture of carbon dioxide from flue gases   | WYDAWNICTWO SIGMA-N O T SP Z O O | 0033-2496 | PRZEM CHEM            | DEC                | 2012              |
| 0,999929396             | 2         | Luo, Y; Hu, Y;<br>Guo, GJ; Ma, QL;<br>Liu, AX;<br>Sun, Q; Guo, XQ                                     | Multiphase flash calculation for system containing TBAB semiclathrate: Application to semiclathrate-based post-combustion CO <sub>2</sub> capture                | ELSEVIER SCIENCE BV              | 0378-3812 | FLUID PHASE EQUILIBR  | NOV 25             | 2018              |
| 0,999796871             | 3         | Chen, HW;<br>Liang, ZW;<br>Yang, X; Zhang, Z;<br>Zhang, ZY  | Experimental Investigation of CO <sub>2</sub> Capture Capacity: Exploring Mesoporous Silica SBA-15 Material Impregnated with Monoethanolamine and Diethanolamine | AMER CHEMICAL SOC                | 0887-0624 | ENERG FUEL            | NOV                | 2016              |
| 0,999289251             | 4         | García-Bordejé, E;<br>Dongil, AB;<br>Moral, J; Conesa, JM;<br>Guerrero-Ruiz, A;<br>Rodríguez-Ramos, I | Cyclic performance in CO <sub>2</sub> capture-methanation of bifunctional Ru with different base metals: Effect of the reactivity of CO <sub>x</sub> ad-species  | ELSEVIER SCI LTD                 | 2212-9820 | J CO2 UTIL            | FEB                | 2023              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                    | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,998846951             | 5         | Wang, L; Liu, WZ; Hu, JP; Liu, Q; Yue, HR; Liang, B; Zhang, GQ; Luo, DM; Xie, HP; Li, C   | Indirect mineral carbonation of titanium-bearing blast furnace slag coupled with recovery of TiO <sub>2</sub> and Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | CHEMICAL INDUSTRY PRESS       | 1004-9541 | CHINESE J CHEM ENG    | MAR                | 2018              |
| 0,998726988             | 6         | Layding, SJ; Caram, HS  | Comparing the energy requirements for amine absorption processes for CO <sub>2</sub> capture from flue gases calculated using a minimal information simple thermodynamic model with experimental and detailed simulation results | ELSEVIER SCI LTD              | 1750-5836 | INT J GREENH GAS CON  | MAR                | 2022              |
| 0,998681417             | 7         | Sun, J; Sato, Y; Sakai, Y; Kansha, Y  | Ternary deep eutectic solvents: Evaluations based on how their physical properties affect energy consumption during post-combustion CO <sub>2</sub> capture  | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0360-5442 | ENERGY                | MAY 1              | 2023              |
| 0,998508084             | 8         | Nezam, I; Xie, JW; Golub, KW; Carneiro, J; Olsen, K; Ping, EW; Jones, CW; Sakwa-Novak, MA | Chemical Kinetics of the Autoxidation of Poly(ethylenimine) in CO <sub>2</sub> Sorbents  | AMER CHEMICAL SOC             | 2168-0485 | ACS SUSTAIN CHEM ENG  | JUN 28             | 2021              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                    | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,998316699             | 9         | Zhang, Y; Gao, JM; Feng, DD; Du, Q; Wu, SH  | Effect of magnetic field on the ammonia-based CO <sub>2</sub> absorption process   | WILEY                         | 0008-4034 | CAN J CHEM ENG        | JUL                | 2018              |
| 0,998308246             | 10        | De Guido, G; Pellegrini, LA   | Calculation of solid-vapor equilibria for cryogenic carbon capture   | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0098-1354 | COMPUT CHEM ENG       | JAN                | 2022              |
| 0,998242273             | 11        | Yu, HM; Wang, XX; Shu, Z; Fujii, M; Song, CS  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and CeO <sub>2</sub> -promoted MgO sorbents for CO <sub>2</sub> capture at moderate temperatures                              | SPRINGER                      | 2095-0179 | FRONT CHEM SCI ENG    | MAR                | 2018              |
| 0,998025087             | 12        | Ghojavand, S; Coasne, B; Clatworthy, EB; Guillet-Nicolas, R; Bazin, P; Desmurs, M; Aguilera, LJ; Ruaux, V; Mintova, S | Alkali Metal Cations Influence the CO <sub>2</sub> Adsorption Capacity of Nanosized Chabazite: Modeling vs Experiment  | AMER CHEMICAL SOC             |           | ACS APPL NANO MATER   | APR 22             | 2022              |
| 0,997945593             | 13        | Verougstraete, B; Schuddinck, D; Lefevere, J; Baron, GV; Denayer, JFM   | A 3D-Printed Zeolitic Imidazolate Framework-8 Monolith For Flue- and Biogas Separations by Adsorption: Influence of Flow Distribution and Process Parameters | FRONTIERS MEDIA SA            |           | FRONT CHEM ENG        | NOV 16             | 2020              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,997910854                    | 14               | Liang, ZW; Gao, HX; Rongwong, W; Na, YQ                                | Comparative studies of stripper overhead vapor integration-based configurations for post-combustion CO <sub>2</sub> capture                          | ELSEVIER SCI LTD    | 1750-5836   | INT J GREENH GAS CON         | MAR                       | 2015                     |
| 0,997646043                    | 15               | Packer, M  | Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy | ELSEVIER SCI LTD    | 0301-4215   | ENERG POLICY                 | SEP                       | 2009                     |
| 0,997063315                    | 16               | Wang, Q; Han, L; Wang, YT; He, Z; Meng, QT; Wang, SQ; Xiao, P; Jia, XL | Conversion of coal into N-doped porous carbon for high-performance SO <sub>2</sub> adsorption  | ROYAL SOC CHEMISTRY |             | RSC ADV                      | JUL 14                    | 2022                     |
| 0,996806002                    | 17               | Chang, EE; Chiu, AC; Pan, SY; Chen, YH; Tan, CS; Chiang, PC            | Carbonation of basic oxygen furnace slag with metalworking wastewater in a slurry reactor  | ELSEVIER SCI LTD    | 1750-5836   | INT J GREENH GAS CON         | JAN                       | 2013                     |
| 0,996272111                    | 18               | Yang, BQ; Zhang, QH; Fei, YQ; Zhou, F; Wang, PX; Deng, YQ              | Biodegradable betaine-based aprotic task-specific ionic liquids and their application in efficient SO <sub>2</sub> absorption                        | ROYAL SOC CHEMISTRY | 1463-9262   | GREEN CHEM                   |                           | 2015                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>       | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,996159328                    | 19               | Mattisson, T;<br>Lyngfelt, A; Cho,<br>P  | The use of iron oxide as an oxygen carrier in chemical-looping combustion of methane with inherent separation of CO <sub>2</sub>                             | ELSEVIER SCI<br>LTD     | 0016-<br>2361 | FUEL                         | OCT                       | 2001                     |
| 0,995938002                    | 20               | Zhang, XP;<br>Zhang, H; Zhu,<br>HD; Li, CF;<br>Zhang, N; Bao,<br>JJ; He, GH                                      | Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Nanorods with a Great Amount of Oxygen Vacancies for Highly Efficient Hg <sup>0</sup> Oxidation from Coal Combustion Flue Gas | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 0887-<br>0624 | ENERG FUEL                   | JUL                       | 2019                     |
| 0,99587971                     | 21               | Dubskikh, VA;<br>Kovalenko, KA;<br>Nizovtsev, AS;<br>Lysova, AA;<br>Samsonenko,<br>DG; Dybtsev,<br>DN; Fedin, VP | Enhanced Adsorption Selectivity of Carbon Dioxide and Ethane on Porous Metal-Organic Framework Functionalized by a Sulfur-Rich Heterocycle                   | MDPI                    |               | NANOMATERI<br>ALS-BASEL      | DEC                       | 2022                     |
| 0,995648569                    | 22               | Guo, TX; Zhang,<br>YH; Chen, JH;<br>Liu, WS; Geng,<br>YH; Bedane, AH;<br>Du, YR                                  | Investigation of CO <sub>2</sub> adsorption on nitrogen-doped activated carbon based on porous structure and surface acid-base sites                         | ELSEVIER                | 2214-<br>157X | CASE STUD<br>THERM ENG       | JAN                       | 2024                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador              | ISSN          | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|-------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,995349891             | 23        | Chung, C;<br>Pottimurthy, Y;<br>Xu, MY; Hsieh,<br>TL; Xu, DK;<br>Zhang, YT;<br>Chen, YY; He,<br>PF; Pickarts, M;<br>Fan, LS; Tong, A | Fate of sulfur in coal-direct<br>chemical looping systems   | ELSEVIER SCI<br>LTD     | 0306-<br>2619 | APPL ENERG            | DEC 15             | 2017              |
| 0,995331021             | 24        | Hutson, ND;<br>Speakman, SA;<br>Payzant, EA  | Structural effects on the<br>high temperature adsorption<br>of CO <sub>2</sub> on a synthetic<br>hydrotalcite   | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 0897-<br>4756 | CHEM MATER            | OCT 19             | 2004              |
| 0,995278558             | 25        | Smart, JP; Riley,<br>GS  | Use of oxygen enriched air<br>combustion to enhance<br>combined effectiveness of<br>oxyfuel combustion and<br>post-combustion flue gas<br>cleanup Part 1-combustion | MANEY<br>PUBLISHING     | 1743-<br>9671 | J ENERGY INST         | AUG                | 2012              |
| 0,995223245             | 26        | Lee, JH;<br>Hyldgaard, P;<br>Neaton, JB  | An assessment of density<br>functionals for predicting<br>CO <sub>2</sub> adsorption in diamine-<br>functionalized metal-<br>organic frameworks                     | AIP Publishing          | 0021-<br>9606 | J CHEM PHYS           | APR 21             | 2022              |
| 0,995089702             | 27        | Bahamon, D;<br>Vega, LF  | Systematic evaluation of<br>materials for post-<br>combustion CO <sub>2</sub> capture in<br>a Temperature Swing<br>Adsorption process                               | ELSEVIER<br>SCIENCE SA  | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J            | JAN 15             | 2016              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador                             | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|--|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,994868495             | 28        | Ahsan, S; Ayub, A; Meeroff, D; Lashak, MJ  | A comprehensive comparison of zeolite-5A molecular sieves and amine-grafted SBA-15 silica for cyclic adsorption-desorption of carbon dioxide in enclosed environments   | ELSEVIER SCIENCE SA                    | 1385-8947 | CHEM ENG J            | JUN 1              | 2022              |
| 0,994659065             | 29        | Salehi, M; Sogaard, M; Esposito, V; Foghmoes, SPV; Persoon, ES; Schroeder, M; Hendriksen, PV | Oxygen permeation and stability study of (La <sub>0.6</sub> Ca <sub>0.4</sub> ) <sub>0.98</sub> (Co <sub>0.8</sub> Fe <sub>0.2</sub> )O <sub>3-δ</sub> membranes        | ELSEVIER SCIENCE BV                    | 0376-7388 | J MEMBRANE SCI        | NOV 15             | 2017              |
| 0,994619354             | 30        | Vu, QT; Yamada, H; Yogo, K   | Stability of Polyamine Based Adsorbents to Gas Impurities for CO <sub>2</sub> Capture   | IRON STEEL INST JAPAN KEIDANREN KAIKAN | 0915-1559 | ISI INT               |                    | 2022              |
| 0,994358246             | 31        | Bell, JG; Benham, MJ; Thomas, KM   | Adsorption of Carbon Dioxide, Water Vapor, Nitrogen, and Sulfur Dioxide on Activated Carbon for Capture from Flue Gases: Competitive Adsorption and Selectivity Aspects | AMER CHEMICAL SOC                      | 0887-0624 | ENERG FUEL            | MAY 6              | 2021              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador                    | ISSN      | Abreviação da revista  | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|-------------------------------|-----------|------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,993920536             | 32        | Vaz, BD;<br>Mastrantonio,<br>DJD; Costa, JAV;<br>de Moraes, MG | Green alga cultivation with nanofibers as physical adsorbents of carbon dioxide: Evaluation of gas biofixation and macromolecule production                   | ELSEVIER SCI LTD              | 0960-8524 | BIORESOURCE TECHNOLOG  | SEP                | 2019              |
| 0,993906017             | 33        | Barzagli, F;<br>Bhatti, UH;<br>Kazmi, WW;<br>Peruzzini, M      | Solid acid catalysts for low-temperature regeneration of non-aqueous sorbents: An innovative technique for energy-efficient CO <sub>2</sub> capture processes | ELSEVIER                      | 2772-6568 | CARBON CAPTURE SCI T   | SEP                | 2023              |
| 0,993885283             | 34        | Kumar, S   | The effect of elevated pressure, temperature and particles morphology on the carbon dioxide capture using zinc oxide  | ELSEVIER SCI LTD              | 2212-9820 | J CO <sub>2</sub> UTIL | DEC                | 2014              |
| 0,993380263             | 35        | Siminiceanu, I;<br>Tataru-Farmus,<br>RE; Bouallou, C           | Kinetics of carbon dioxide absorption into aqueous solutions of 1,5,8,12-tetraazadodecane (APEDA)   | GH ASACHI TECHNICAL UNIV IASI | 1582-9596 | ENVIRON ENG MANAG J    | NOV-DEC            | 2007              |
| 0,993249684             | 36        | Liu, FQ; Wang,<br>LL; Li, GH; Li,<br>W; Li, CQ                 | Hierarchically Structured Graphene Coupled Microporous Organic Polymers for Superior CO <sub>2</sub> Capture  | AMER CHEMICAL SOC             | 1944-8244 | ACS APPL MATER INTER   | OCT 4              | 2017              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b> | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,993216963                    | 37               | Lv, GZ; Li, Q;<br>Wang, SJ; Li, XY   | Key techniques of reservoir engineering and injection-production process for CO <sub>2</sub> flooding in China's SINOPEC Shengli Oilfield              | ELSEVIER SCI LTD  | 2212-9820   | J CO <sub>2</sub> UTIL       | SEP                       | 2015                     |
| 0,993167347                    | 38               | Huang, B; Xu, SS; Gao, SW;<br>Liu, LB; Tao, JY;<br>Niu, HW; Cai, M;<br>Cheng, JA | Industrial test and techno-economic analysis of CO <sub>2</sub> capture in Huaneng Beijing coal-fired power station                                    | ELSEVIER SCI LTD  | 0306-2619   | APPL ENERG                   | NOV                       | 2010                     |
| 0,993129163                    | 39               | Blamey, J;<br>Paterson, NPM;<br>Dugwell, DR;<br>Fennell, PS                      | Mechanism of Particle Breakage during Reactivation of CaO-Based Sorbents for CO <sub>2</sub> Capture   | AMER CHEMICAL SOC | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | AUG                       | 2010                     |
| 0,993120093                    | 40               | Fisher, JC;<br>Tanthana, J;<br>Chuang, SSC                                       | Oxide-Supported Tetraethylenepentamine for CO <sub>2</sub> Capture   | WILEY-BLACKWELL   | 1944-7442   | ENVIRON PROG SUSTAIN         | DEC                       | 2009                     |
| 0,993097384                    | 41               | Palakkal, AS;<br>Pillai, RS  | Evaluating the performance of Cr-Soc-MOF Super-Adsorbents for CO <sub>2</sub> capture from flue gas under humid condition through molecular simulation | ELSEVIER          | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | AUG 15                    | 2022                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,992958998                    | 42               | Cohen, SM;<br>Chalmers, HL;<br>Webber, ME;<br>King, CW | Comparing post-combustion CO <sub>2</sub> capture operation at retrofitted coal-fired power plants in the Texas and Great Britain electric grids | IOP PUBLISHING LTD  | 1748-9326   | ENVIRON RES LETT             | APR-JUN                   | 2011                     |
| 0,99272684                     | 43               | Sheth, AC;<br>Morton, SA                               | High-temperature combustion of pyrolyzed char containing calcium sulfide   | AMER CHEMICAL SOC   | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | JAN-FEB                   | 2001                     |
| 0,992305661                    | 44               | Wang, Z; Li, Z;<br>Liu, LY; Cao, PZ;<br>Li, SP; Li, GK | Green synthesis of polypyrrole for CO <sub>2</sub> capture from humid flue gases   | ROYAL SOC CHEMISTRY | 1463-9262   | GREEN CHEM                   | FEB 20                    | 2023                     |
| 0,992203204                    | 45               | Pei, SL; Pan, SY;<br>Li, YM; Chiang, PC                | Environmental Benefit Assessment for the Carbonation Process of Petroleum Coke Fly Ash in a Rotating Packed Bed                                  | AMER CHEMICAL SOC   | 0013-936X   | ENVIRON SCI TECHNOL          | SEP 19                    | 2017                     |
| 0,992159052                    | 46               | Wang, H; Wang, S;<br>Duan, YF; Li, YN;<br>Ying, ZF     | Experimental study of homogeneous Hg oxidation in air and oxy-simulated flue gas   | ELSEVIER SCI LTD    | 1743-9671   | J ENERGY INST                | APR                       | 2019                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,991895395                    | 47               | Ochoa-González, R; Díaz-Somoano, M; Martínez-Tarazona, MR                                     | A comprehensive evaluation of the influence of air combustion and oxy-fuel combustion flue gas constituents on Hg <sup>0</sup> re-emission in WFGD systems | ELSEVIER SCIENCE BV | 0304-3894   | J HAZARD MATER               | JUL 15                    | 2014                     |
| 0,991791761                    | 48               | Zhang, HP; Du, AJ; Shi, QB; Zhou, YF; Zhang, YP; Tang, YH                                     | Adsorption behavior of CO <sub>2</sub> on pristine and doped phosphorenes: A dispersion corrected DFT study  | ELSEVIER SCI LTD    | 2212-9820   | J CO <sub>2</sub> UTIL       | MAR                       | 2018                     |
| 0,991317526                    | 49               | Ju, Y; Oh, HT; Lee, CH  | Sensitivity analysis of CO <sub>2</sub> capture process in cyclic fluidized-bed with regeneration of solid sorbent   | ELSEVIER SCIENCE SA | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | JAN 1                     | 2020                     |
| 0,990887866                    | 50               | Kosaka, F; Sasayama, T; Liu, YY; Chen, SY; Mochizuki, T; Matsuoka, K; Urakawa, A; Kuramoto, K | Direct and continuous conversion of flue gas CO <sub>2</sub> into green fuels using dual function materials in a circulating fluidized bed system          | ELSEVIER SCIENCE SA | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | DEC 15                    | 2022                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>       | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|-------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,990868032                    | 51               | Gusnawan, P;<br>Ganegamage, S;<br>Heagy, M; Yu, JJ               | Reactive CO <sub>2</sub> absorption mechanism of a soybean-based (SBB) solvent containing 18 amino acid salts in polyvinylidene fluoride (PVDF) hollow fiber membrane-based gas-liquid membrane contactor | ELSEVIER<br>SCIENCE SA  | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J                   | NOV 1                     | 2020                     |
| 0,990746809                    | 52               | Stoin, U; Barnea,<br>Z; Sasson, Y                                | New technology for post-combustion abatement of carbon dioxide via an in situ generated superoxide anion-radical  | ROYAL SOC<br>CHEMISTRY  |               | RSC ADV                      |                           | 2014                     |
| 0,990564132                    | 53               | Yokozeki, A;<br>Shiflett, MB                                     | Separation of Carbon Dioxide and Sulfur Dioxide Gases Using Room-Temperature Ionic Liquid [hmim][Tf <sub>2</sub> N]   | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 0887-<br>0624 | ENERG FUEL                   | SEP                       | 2009                     |
| 0,990559046                    | 54               | Rodriguez, CT;<br>Le, QD; Focsa,<br>C; Pirim, C;<br>Chazallon, B | Influence of crystallization parameters on guest selectivity and structures in a CO <sub>2</sub> -based separation process using TBAB semi-clathrate hydrates   | ELSEVIER<br>SCIENCE SA  | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J                   | FEB 15                    | 2020                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador                    | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,990399983             | 55        | Bien, CE; Cai, ZZ; Wade, CR                                | Using Postsynthetic X-Type Ligand Exchange to Enhance CO <sub>2</sub> Adsorption in Metal-Organic Frameworks with Kuratowski-Type Building Units                      | AMER CHEMICAL SOC             | 0020-1669 | INORG CHEM            | AUG 16             | 2021              |
| 0,990126203             | 56        | Wu, DW; Liu, J; Yang, YJ; Zheng, Y                         | Nitrogen/Oxygen Co-Doped Porous Carbon Derived from Biomass for Low-Pressure CO <sub>2</sub> Capture  | AMER CHEMICAL SOC             | 0888-5885 | IND ENG CHEM RES      | AUG 5              | 2020              |
| 0,989818847             | 57        | Plouffe, P; McEvoy, JG; Ball, R; Anthony, EJ               | Object-oriented simulation of an Endex reactor for separation of carbon dioxide from flue emissions   | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0098-1354 | COMPUT CHEM ENG       | MAY 11             | 2012              |
| 0,989683673             | 58        | Lu, TY; Li, Q; Shao, JW; Wang, LL; Pang, RX; Wu, XY; Hu, X | Nitrogen and sulfur co-doped porous carbons from polyacrylonitrile fibers for CO <sub>2</sub> adsorption  | ELSEVIER                      | 1876-1070 | J TAIWAN INST CHEM E  | NOV                | 2021              |
| 0,989679585             | 59        | Won, W; Lee, KS  | Adaptive predictive collocation with a cubic spline interpolation function for convection-dominant fixed-bed processes: Application to a fixed-bed adsorption process | ELSEVIER SCIENCE SA           | 1385-8947 | CHEM ENG J            | JAN 1              | 2011              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador        | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,989412555             | 60        | Hassanpouryouzb and, A; Yang, JH; Okwananke, A; Burgass, R; Tohidi, B; Chuvilin, E; Istomin, V; Bukhanov, B | An Experimental Investigation on the Kinetics of Integrated Methane Recovery and CO <sub>2</sub> Sequestration by Injection of Flue Gas into Permafrost Methane Hydrate Reservoirs | NATURE PORTFOLIO  | 2045-2322 | SCI REP-UK            | NOV 7              | 2019              |
| 0,989348222             | 61        | Mondino, G; Grande, CA; Blom, R; Nord, LO   | Evaluation of MBTSA technology for CO <sub>2</sub> capture from waste-to-energy plants   | ELSEVIER SCI LTD  | 1750-5836 | INT J GREENH GAS CON  | JUL                | 2022              |
| 0,989333065             | 62        | Zhu, K; Lu, HF; Liu, CJ; Wu, KJ; Jiang, W; Cheng, JX; Tang, SY; Yue, HR; Liu, YY; Liang, B                  | Investigation on the Phase-Change Absorbent System MEA plus Solvent A (SA) + H <sub>2</sub> O Used for the CO <sub>2</sub> Capture from Flue Gas                                   | AMER CHEMICAL SOC | 0888-5885 | IND ENG CHEM RES      | MAR 6              | 2019              |
| 0,988992989             | 63        | Cui, GK; Zhao, N; Li, YN; Wang, HY; Zhao, YL; Li, ZY; Wang, JJ  | Limited Number of Active Sites Strategy for Improving SO <sub>2</sub> Capture by Ionic Liquids with Fluorinated Acetylacetonate Anion  | AMER CHEMICAL SOC | 2168-0485 | ACS SUSTAIN CHEM ENG  | SEP                | 2017              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo  | Publicador               | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|---|--------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,988924573             | 64        | Wilk, A; Spietz, T; Wieclaw-Solny, L; Krótki, A; Tarnowska, J   | DEGRADATION OF AMINE SOLVENTS USED FOR CO <sub>2</sub> REMOVAL FROM FLUE GAS WITH HIGH CO <sub>2</sub> CONCENTRATION  | SILESIAN UNIV TECHNOLOGY | 1899-0142 | ARCHIT CIV ENG ENVIR  |                    | 2021              |
| 0,988860809             | 65        | Sun, SZ; Zhang, C; Chen, SN; Zhao, XT; Wang, YY; Xu, SJ; Wu, CF | Integrated CO <sub>2</sub> capture and reverse water-gas shift reaction over CeO <sub>2</sub> -CaO dual functional materials  | ROYAL SOC                | 2054-5703 | ROY SOC OPEN SCI      | APR 5              | 2023              |
| 0,98853347              | 66        | Liu, H; Guo, W; Fan, Z; Huang, FL; Liu, SQ                      | Comparative life cycle energy, water consumption and carbon emissions analysis of deep in-situ gasification based coal-to-hydrogen with carbon capture and alternative routes | ELSEVIER SCI LTD         | 0959-6526 | J CLEAN PROD          | NOV 10             | 2023              |
| 0,988460266             | 67        | Aboud, MFA; ALOthman, ZA; Bagabas, AA                           | Impact of ammonia treatment and platinum group or nickel metal decoration on the activated carbon storage of carbon dioxide and methane                                       | IOP Publishing Ltd       |           | MATER RES EXPRESS     | SEP 1              | 2022              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>                   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,988428142                    | 68               | Lu, H; Reddy, EP; Smirniotis, PG   | Calcium oxide based sorbents for capture of carbon dioxide at high temperatures  | AMER CHEMICAL SOC                   | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | MAY 24                    | 2006                     |
| 0,988421123                    | 69               | Morales-Mora, MA; Pretelin-Vergara, CF; Martínez-Delgado, SA; Iuga, C; Nolasco-Hipolito, C | Environmental assessment of a combined heat and power plant configuration proposal with post-combustion CO <sub>2</sub> capture for the Mexican oil and gas industry | SPRINGER                            | 1618-954X   | CLEAN TECHNOL ENVIR          | JAN                       | 2019                     |
| 0,988188016                    | 70               | Lee, BD; Kim, DM; Cho, JH; Park, SW  | A comparative study on the carbon dioxide capture power between 30 wt% 2-amino-2-methyl-1-propanol and 30 wt% methyldiethanol amine aqueous solutions                | KOREAN INSTITUTE CHEMICAL ENGINEERS | 0256-1115   | KOREAN J CHEM ENG            | MAY                       | 2009                     |
| 0,987985527                    | 71               | Roy, B; Bhattacharya, S  | Oxy-fuel fluidized bed combustion using Victorian brown coal: An experimental investigation  | ELSEVIER SCIENCE BV                 | 0378-3820   | FUEL PROCESS TECHNOL         | JAN                       | 2014                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b> | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,98795662                     | 72               | Singh, A;<br>Shivapuji, AM;<br>Dasappa, S; Rao, DM;<br>Sivaramakrishna, G; Badhe, RM;<br>Srivastva, U | Competitive multi-component bio-syngas separation for hydrogen production: breakthrough dynamics, thermal effects, and adsorbent stability analysis under practical operating conditions | ELSEVIER          | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | APR 14                    | 2024                     |
| 0,987878911                    | 73               | Alam, S; Kumar, JP; Rani, KY;<br>Sumana, C  | Self-sustained process scheme for high purity hydrogen production using sorption enhanced steam methane reforming coupled with chemical looping combustion                               | ELSEVIER SCI LTD  | 0959-6526   | J CLEAN PROD                 | SEP 20                    | 2017                     |
| 0,987772617                    | 74               | Li, Q; Fan, SS;<br>Wang, YH; Lang, XM; Chen, J  | CO <sub>2</sub> Removal from Biogas Based on Hydrate Formation with Tetra-n-Butylammonium Bromide Solution in the Presence of 1-Butyl-3-Methylimidazolium Tetrafluoroborate              | AMER CHEMICAL SOC | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | MAY                       | 2015                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,98773425                     | 75               | Feng, MG;<br>Cheng, M; Ji, X;<br>Zhou, L; Bi, KX;<br>Dai, ZD; Dai, YY    | Finding the optimal CO <sub>2</sub> adsorption material: Prediction of multi-properties of metal-organic frameworks (MOFs) based on DeepFM                     | ELSEVIER            | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | DEC 1                     | 2022                     |
| 0,987307415                    | 76               | Chau, J; Jie, XM;<br>Sirkar, KK  | Polyamidoamine-facilitated poly(ethylene glycol)/ionic liquid based pressure swing membrane absorption process for CO <sub>2</sub> removal from shifted syngas | ELSEVIER SCIENCE SA | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | DEC 1                     | 2016                     |
| 0,987266411                    | 77               | Liu, ZL; Teng, Y;<br>Zhang, K; Chen, HG; Yang, YP                        | CO <sub>2</sub> adsorption performance of different amine-based siliceous MCM-41 materials   | ELSEVIER SCIENCE BV | 2095-4956   | J ENERGY CHEM                | MAY                       | 2015                     |
| 0,986993052                    | 78               | Elmehalmey, WA; Azzam, RA;<br>Hassan, YS;<br>Alkordi, MH;<br>Madkour, TM | Imide-Based Polymers of Intrinsic Microporosity: Probing the Microstructure in Relation to CO <sub>2</sub> Sorption Characteristics                            | AMER CHEMICAL SOC   | 2470-1343   | ACS OMEGA                    | MAR                       | 2018                     |
| 0,986865031                    | 79               | Pörzse, G; Csedo, Z; Zavarkó, M  | Disruption Potential Assessment of the Power-to-Methane Technology   | MDPI                |             | ENERGIES                     | APR                       | 2021                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador           | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|----------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,986740852             | 80        | Yu, YN; Shen, Y; Wang, K; Zhao, JK; Ye, JX; Wang, LD; Zhang, SH        | A facile synthesized robust catalyst for efficient regeneration of biphasic solvent in CO <sub>2</sub> capture: characterization, performance, and mechanism | ELSEVIER             | 1383-5866 | SEP PURIF TECHNOL     | AUG 15             | 2023              |
| 0,986674983             | 81        | Boushaki, T; Merlo, N; Chauveau, C; Gökalp, I                          | Study of pollutant emissions and dynamics of non-premixed turbulent oxygen enriched flames from a swirl burner   | ELSEVIER SCIENCE INC | 1540-7489 | P COMBUST INST        |                    | 2017              |
| 0,986661239             | 82        | Liu, Q; Shi, Y; Zheng, SD; Ning, LQ; Ye, Q; Tao, MN; He, Y             | Amine-functionalized low-cost industrial grade multi-walled carbon nanotubes for the capture of carbon dioxide   | ELSEVIER SCIENCE BV  | 2095-4956 | J ENERGY CHEM         | JAN                | 2014              |
| 0,986552851             | 83        | Farajzadeh, R; Eftekhari, AA; Dafnomilis, G; Lake, LW; Bruining, J     | On the sustainability of CO <sub>2</sub> storage through CO <sub>2</sub> - Enhanced oil recovery   | ELSEVIER SCI LTD     | 0306-2619 | APPL ENERG            | MAR 1              | 2020              |
| 0,98644781              | 84        | Ghobadi, J; Ramirez, D; Khoramfar, S; Jerman, RE; Crane, M; Oladosu, O | An Experimental Study of a Hollow-Fiber Membrane-Contacting System for Carbon Dioxide/Methane Separation   | SOC PETROLEUM ENG    | 1930-1855 | SPE PROD OPER         | MAY                | 2019              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b> | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|-------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,986412097                    | 85               | Chen, YH; Shen, MT; Chang, H; Ho, CD  | Control of Solvent-Based Post-Combustion Carbon Capture Process with Optimal Operation Conditions                                       | MDPI              | 2227-9717   | PROCESSES                    | JUN                       | 2019                     |
| 0,986294281                    | 86               | Cloete, S; Giuffrida, A; Romano, MC; Zaabout, A   | The swing adsorption reactor cluster for post-combustion CO <sub>2</sub> capture from cement plants                                     | ELSEVIER SCI LTD  | 0959-6526   | J CLEAN PROD                 | JUN 20                    | 2019                     |
| 0,986084541                    | 87               | Moura, PAS; Vilarrasa-Garcia, E; Maia, DAS; Bastos-Neto, M; Ania, CO; Parra, JB; Azevedo, DCS | Assessing the potential of nanoporous carbon adsorbents from polyethylene terephthalate (PET) to separate CO <sub>2</sub> from flue gas | SPRINGER          | 0929-5607   | ADSORPTION                   | APR                       | 2018                     |
| 0,986010122                    | 88               | Kazepidis, P; Papadopoulos, AI; Tzirakis, F; Seferlis, P                                      | Optimum design of industrial post-combustion CO <sub>2</sub> capture processes using phase-change solvents                              | ELSEVIER          | 0263-8762   | CHEM ENG RES DES             | NOV                       | 2021                     |
| 0,985980083                    | 89               | Hu, YK; Li, X; Li, HL; Yan, JY  | Peak and off-peak operations of the air separation unit in oxy-coal combustion power generation systems                                 | ELSEVIER SCI LTD  | 0306-2619   | APPL ENERG                   | DEC                       | 2013                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>      | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,985679929                    | 90               | Pan, SY; Shi, XD; Dong, BB; Skvaril, J; Zhang, HR; Liang, YT; Li, HL | Multivariate time series prediction for CO <sub>2</sub> concentration and flowrate of flue gas from biomass-fired power plants                             | ELSEVIER SCI LTD       | 0016-2361   | FUEL                         | MAR 1                     | 2024                     |
| 0,985589104                    | 91               | Wu, HB; Mao, Y; Liu, ZH; Zhang, Y; Liao, HY                          | Numerical simulation of oxy-fuel combustion characteristics in a 200 MWe coal-fired boiler   | WILEY PERIODICALS, INC | 2152-3878   | GREENH GASES                 | APR                       | 2019                     |
| 0,985577025                    | 92               | Mukherjee, S; Samanta, AN  | Low to high-pressure CO <sub>2</sub> separation using amine-functionalized Mobile Composite Matter, isotherm modelling and heat of adsorption study        | TAYLOR & FRANCIS INC   | 0149-6395   | SEP SCI TECHNOL              | JAN 22                    | 2022                     |
| 0,985316526                    | 93               | Habib, N; Durak,; Uzun, A; Keskin, S                                 | Incorporation of a pyrrolidinium-based ionic liquid/MIL-101(Cr) composite into Pebax sets a new benchmark for CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> selectivity | ELSEVIER               | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | MAY 1                     | 2023                     |
| 0,985185359                    | 94               | Martínez, A; Lara, Y; Lisbona, P; Romeo, LM                          | Operation of a Mixing Seal Valve in Calcium Looping for CO <sub>2</sub> Capture  | AMER CHEMICAL SOC      | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | MAR                       | 2014                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>            | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,985131908                    | 95               | Seggiani, M;<br>Stefanelli, E;<br>Puccini, M;<br>Vitolo, S   | CO <sub>2</sub> sorption/desorption performance study on K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -doped Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -based pellets | ELSEVIER<br>SCIENCE SA       | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J                   | MAY 1                     | 2018                     |
| 0,984674278                    | 96               | Yave, W; Car, A;<br>Wind, J;<br>Peinemann, KV  | Nanometric thin film membranes manufactured on square meter scale: ultra-thin films for CO <sub>2</sub> capture                                | IOP<br>PUBLISHING<br>LTD     | 0957-<br>4484 | NANOTECHNO<br>LOGY           | OCT 1                     | 2010                     |
| 0,984602024                    | 97               | Kusuma, VA;<br>McNally, JS;<br>Baker, JS; Tong,<br>Z; Zhu, LX;<br>Orme, CJ;<br>Stewart, FF;<br>Hopkinson, DP | Cross-Linked Polyphosphazene Blends as Robust CO <sub>2</sub> Separation Membranes   | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC      | 1944-<br>8244 | ACS APPL<br>MATER INTER      | JUL 8                     | 2020                     |
| 0,984316893                    | 98               | Qi, GG; Fu, LL;<br>Duan, XN; Choi,<br>BH; Abraham,<br>M; Giannelis, EP                                       | Mesoporous amine-bridged polysilsesquioxane for CO <sub>2</sub> capture  | WILEY<br>PERIODICALS,<br>INC | 2152-<br>3878 | GREENH<br>GASES              | SEP                       | 2011                     |
| 0,98398249                     | 99               | Liu, YF; Ma, YL;<br>Xu, QQ; Yin, JZ  | Supported Ionic Liquid Membrane : Preparation, Characterization and Stability  | CHINESE ACAD<br>SCIENCES     | 1005-<br>281X | PROG CHEM                    | OCT 24                    | 2013                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b> | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|-------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,983953285                    | 100              | Igalavithana, AD;<br>Choi, SW; Shang,<br>J; Hanif, A;<br>Dissanayake, PD;<br>Tsang, DCW;<br>Kwon, JH; Lee,<br>KB; Ok, YS | Carbon dioxide capture in biochar produced from pine sawdust and paper mill sludge: Effect of porous structure and surface chemistry          | ELSEVIER          | 0048-9697   | SCI TOTAL ENVIRON            | OCT 15                    | 2020                     |
| 0,983911583                    | 101              | Fan, JM; Zhu, L;<br>Jiang, P; Li, LL;<br>Liu, HM   | Comparative exergy analysis of chemical looping combustion thermally coupled and conventional steam methane reforming for hydrogen production | ELSEVIER SCI LTD  | 0959-6526   | J CLEAN PROD                 | SEP 10                    | 2016                     |
| 0,98369089                     | 102              | Chen, YS; Kan,<br>M; Yan, S;<br>Zhang, JB; Liu,<br>KH; Yan, YQ;<br>Guan, AX; Lv,<br>XM; Qian, LP;<br>Zheng, GF           | Electroreduction of air-level CO <sub>2</sub> with high conversion efficiency   | ELSEVIER          | 0253-9837   | CHINESE J CATAL              | JUL                       | 2022                     |
| 0,983629678                    | 103              | Yousuf, A;<br>Hossain, MS;<br>Paul, N; Shikder,<br>MW; Kumar, D;<br>Pirozzi, D; Sakib,<br>AN; Kazempoor,<br>P            | Process Integration Approach to the Methanol (MeOH) Production Variability from Syngas and Industrial Waste Gases                             | MDPI              |             | ENERGIES                     | SEP                       | 2023                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador                    | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,983599255             | 104       | Wang, RT; Guo, T; Xiang, XJ; Yin, YM; Guo, QJ; Wang, YX            | Antioxidative degradation mechanism of 2-mercaptobenzimidazole modified TEPA-MCM-41 adsorbents for carbon capture from flue gas  | WILEY                         | 0008-4034 | CAN J CHEM ENG        | NOV                | 2023              |
| 0,983276506             | 105       | Li, Y; Wang, NN; Guan, HJ; Jia, ZG; Zhang, YL; Zhao, GQ; Gao, M    | Optimization study of CO <sub>2</sub> capture unit for subcritical coal-fired power generation unit based on Epsilon and Aspen plus  | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0196-8904 | ENERG CONVERS MANAGE  | OCT 1              | 2022              |
| 0,983247836             | 106       | Brennan, PJ; Thakkar, H; Li, X; Rownaghi, AA; Koros, WJ; Rezaei, F | Effect of Post-Functionalization Conditions on the Carbon Dioxide Adsorption Properties of Aminosilane-Grafted Zirconia/Titania/Silica-Poly(amide-imide) Composite Hollow Fiber Sorbents | WILEY-VCH VERLAG GMBH         | 2194-4288 | ENERGY TECHNOL-GER    | FEB                | 2017              |
| 0,983026365             | 107       | Liu, BW; Lian, YH; Li, SJ; Deng, S; Zhao, L; Chen, B; Wang, DH     | Experimental investigation on separation and energy-efficiency performance of temperature swing adsorption system for CO <sub>2</sub> capture  | ELSEVIER                      | 1383-5866 | SEP PURIF TECHNOL     | NOV 15             | 2019              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>       | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,983006867                    | 108              | Kim, H; Lee, HY;<br>Kang, DW;<br>Kang, M; Choe,<br>JH; Lee, WR;<br>Hong, CS          | Control of the Metal<br>Composition in Bimetallic<br>Mg/Zn(dobpdc)<br>Constructed from a One-<br>Dimensional Zn-Based<br>Template        | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 0020-<br>1669 | INORG CHEM                   | OCT 21                    | 2019                     |
| 0,982870742                    | 109              | Wang, JW; Song,<br>Z; Cheng, HY;<br>Chen, LF; Deng,<br>LY; Qi, ZW                    | Computer-Aided Design of<br>Ionic Liquids as Absorbent<br>for Gas Separation<br>Exemplified by CO <sub>2</sub><br>Capture Cases          | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 2168-<br>0485 | ACS SUSTAIN<br>CHEM ENG      | SEP                       | 2018                     |
| 0,982856121                    | 110              | Hong, SY; Kim,<br>H; Kim, YJ;<br>Jeong, J; Cheong,<br>M; Lee, H; Kim,<br>HS; Lee, JS | Nitrile-functionalized<br>tertiary amines as highly<br>efficient and reversible SO <sub>2</sub><br>absorbents                            | ELSEVIER<br>SCIENCE BV  | 0304-<br>3894 | J HAZARD<br>MATER            | JAN 15                    | 2014                     |
| 0,982837241                    | 111              | Wu, HB; Wu, JH;<br>Li, YB; Shen, JC  | Study on the Key<br>Technology of CO <sub>2</sub><br>Compression and<br>Purification in Oxy-Fuel<br>Combustion Coal-Fired<br>Power Plant | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 0887-<br>0624 | ENERG FUEL                   | APR                       | 2019                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,982665454                    | 112              | Escudero, AI;<br>Espatolero, S;<br>Romeo, LM;<br>Lara, Y;<br>Paufique, C;<br>Lesort, AL;<br>Liszka, M          | Minimization of CO <sub>2</sub> capture energy penalty in second generation oxy-fuel power plants                                    | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 1359-4311   | APPL THERM ENG               | JUN 25                    | 2016                     |
| 0,982659662                    | 113              | Mat, NC;<br>Lipscomb, GG   | Global sensitivity analysis for hybrid membrane-cryogenic post combustion carbon capture process                                     | ELSEVIER SCI LTD              | 1750-5836   | INT J GREENH GAS CON         | FEB                       | 2019                     |
| 0,98250886                     | 114              | Wang, DL; Xie, JP; Zhou, HR;<br>Liu, L; Li, HW;<br>Li, GX; Fan, XY   | Multiscale energy reduction of amine-based absorbent SO <sub>2</sub> capture technology: Absorbent screening and process improvement | ELSEVIER                      | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | NOV 15                    | 2022                     |
| 0,982277309                    | 115              | Quang, DV;<br>Soukri, M;<br>Tanthana, J;<br>Sharma, P;<br>Nelson, TO; Lail, M; Coleman, LJI;<br>Abu-Zahra, MRM | Investigation of CO <sub>2</sub> adsorption performance and fluidization behavior of mesoporous silica supported polyethyleneimine   | ELSEVIER SCIENCE BV           | 0032-5910   | POWDER TECHNOL               | NOV                       | 2016                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador        | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,982251581             | 116       | Zhao, YQ; Dou, JX; Dai, RJ; Bai, HC; Rish, SK; Xiao, XX; Yu, JL                 | Superefficient Absorption of Low-Concentration SO <sub>2</sub> in Flue Gas Using New Ternary Imidazole-Based Deep Eutectic Solvents: Mechanism, Thermodynamics, and Process Analysis | AMER CHEMICAL SOC | 0887-0624 | ENERG FUEL            | 2022 JUL 22        | 2022              |
| 0,98208151              | 117       | Vega, F; Baena-Moreno, FM; Fernandez, LMG; Portillo, E; Navarrete, B; Zhang, ZE | Current status of CO <sub>2</sub> chemical absorption research applied to CCS: Towards full deployment at industrial scale   | ELSEVIER SCI LTD  | 0306-2619 | APPL ENERG            | FEB 15             | 2020              |
| 0,982018413             | 118       | Rao, AB; Rubin, ES  | A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO <sub>2</sub> capture technology for power plant greenhouse gas control   | AMER CHEMICAL SOC | 0013-936X | ENVIRON SCI TECHNOL   | OCT 15             | 2002              |
| 0,981970081             | 119       | Kamran, U; Rhee, KY; Lee, SY; Park, SJ  | Solvent-free conversion of cucumber peels to N-doped microporous carbons for efficient CO <sub>2</sub> capture performance   | ELSEVIER SCI LTD  | 0959-6526 | J CLEAN PROD          | OCT 1              | 2022              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,981741841                    | 120              | Fan, BG; Jia, L; Wang, YL; Zhao, R; Mei, XS; Liu, YY; Jin, Y | Study on Adsorption Mechanism and Failure Characteristics of CO <sub>2</sub> Adsorption by Potassium-Based Adsorbents with Different Supports                  | MDPI                          |             | MATERIALS                    | DEC                       | 2018                     |
| 0,981688149                    | 121              | Wang, ZM; Zhang, Z; Mitch, WA                                | Role of absorber and desorber units and operational conditions for N-nitrosamine formation during amine-based carbon capture                                   | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0043-1354   | WATER RES                    | MAR 1                     | 2020                     |
| 0,981447861                    | 122              | Salim, W; Vakharia, V; Chen, YX; Wu, DZ; Han, Y; Ho, WSW     | Fabrication and field testing of spiral-wound membrane modules for CO <sub>2</sub> capture from flue gas   | ELSEVIER                      | 0376-7388   | J MEMBRANE SCI               | JUN 15                    | 2018                     |
| 0,981361645                    | 123              | Jing, Y; Wei, L; Wang, YD; Yu, YM                            | Synthesis, characterization and CO <sub>2</sub> capture of mesoporous SBA-15 adsorbents functionalized with melamine-based and acrylate-based amine dendrimers | ELSEVIER SCIENCE BV           | 1387-1811   | MICROPOR MESOPOR MAT         | JAN 1                     | 2014                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>      | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,981263563                    | 124              | Sedighi, M;<br>Talaie, MR;<br>Sabzyan, H;<br>Aghamiri, SF | A computational investigation on the roles of binding affinity and pore size on CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> overall adsorption process performance of MOFs through modifying MIL-101 structure | ELSEVIER               | 2214-9937   | SUSTAIN<br>MATER<br>TECHNO   | DEC                       | 2023                     |
| 0,981211118                    | 125              | Chowdhury, S;<br>Parshetti, GK;<br>Balasubramanian, R     | Post-combustion CO <sub>2</sub> capture using mesoporous TiO <sub>2</sub> /graphene oxide nanocomposites  | ELSEVIER<br>SCIENCE SA | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | MAR 1                     | 2015                     |
| 0,980891175                    | 126              | Lin, ZF; Wei, JW; Geng, LL; Mei, DJ; Liao, L              | Composites ZSM-5/KIT-6 Synthesized Via Assembly Modification Procedure and Mechanical Grinding Procedure, Respectively, and Their Application to CO <sub>2</sub> Adsorption                         | SPRINGER               | 0049-6979   | WATER AIR<br>SOIL POLL       | NOV                       | 2017                     |
| 0,980616073                    | 127              | Ridha, FN;<br>Manovic, V;<br>Macchi, A;<br>Anthony, EJ    | CO <sub>2</sub> capture at ambient temperature in a fixed bed with CaO-based sorbents   | ELSEVIER SCI<br>LTD    | 0306-2619   | APPL ENERG                   | FEB 15                    | 2015                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador              | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,980526833             | 128       | Peng, X; Cao, DP  | Computational screening of porous carbons, zeolites, and metal organic frameworks for desulfurization and decarburization of biogas, natural gas, and flue gas               | WILEY                   | 0001-1541 | AICHE J               | AUG                | 2013              |
| 0,98032199              | 129       | Ling, J; Zhou, AN; Wang, WZ; Jia, XY; Ma, MD; Li, YZ                                      | One-Pot Method Synthesis of Bimetallic MgCu-MOF-74 and Its CO <sub>2</sub> Adsorption under Visible Light  | AMER CHEMICAL SOC       | 2470-1343 | ACS OMEGA             | JUN 14             | 2022              |
| 0,98025717              | 130       | Khan, AA; Halder, GN; Saha, AK  | Experimental investigation of sorption characteristics of capturing carbon dioxide into piperazine activated aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol solution in a packed column | ELSEVIER SCI LTD        | 1750-5836 | INT J GREENH GAS CON  | JAN                | 2016              |
| 0,980036841             | 131       | Rodríguez-Albelo, LM; López-Maya, E; Hamad, S; Ruiz-Salvador, AR; Calero, S; Navarro, JAR | Selective sulfur dioxide adsorption on crystal defect sites on an isoreticular metal organic framework series  | NATURE PUBLISHING GROUP | 2041-1723 | NAT COMMUN            | FEB 15             | 2017              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>     | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-----------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,979920717                    | 132              | Karve, VV;<br>Espin, J; Asgari, M; Van Gele, S; Oveisi, E; Queen, WL                                      | N-Containing Carbons Derived from Microporous Coordination Polymers for Use in Post-Combustion Flue Gas Capture  | WILEY-VCH VERLAG GMBH | 1616-301X   | ADV FUNCT MATER              | MAY                       | 2023                     |
| 0,979638214                    | 133              | Loganathan, S; Tikmani, M; Ghoshal, AK  | Pore-expanded MCM-41 for CO <sub>2</sub> adsorption: Experimental and isotherm modeling studies  | ELSEVIER SCIENCE SA   | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | NOV 15                    | 2015                     |
| 0,979270046                    | 134              | Song, CF; Kitamura, Y; Li, SH; Jiang, WZ  | Parametric Analysis of a Novel Cryogenic CO <sub>2</sub> Capture System Based on Stirling Coolers  | AMER CHEMICAL SOC     | 0013-936X   | ENVIRON SCI TECHNOL          | NOV 20                    | 2012                     |
| 0,978954132                    | 135              | Young, B; Krynock, M; Carlson, D; Hawkins, TR; Marriott, J; Morelli, B; Jamieson, M; Cooney, G; Skone, TJ | Comparative environmental life cycle assessment of carbon capture for petroleum refining, ammonia production, and thermoelectric power generation in the United States | ELSEVIER SCI LTD      | 1750-5836   | INT J GREENH GAS CON         | DEC                       | 2019                     |
| 0,978749768                    | 136              | Xiao, H; Ma, H; Wang, L; Liu, ZB; Yang, ZJ; Dong, JH; Shao, L   | Intensification of HCl removal from flue gas using a rotor-stator reactor  | ELSEVIER SCI LTD      | 0016-2361   | FUEL                         | FEB 15                    | 2022                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>                                      | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b> | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,978680843                    | 137              | Wotzka, A;<br>Jorabchi, MN;<br>Wohlrab, S           | Separation of H <sub>2</sub> O / CO <sub>2</sub> Mixtures by MFI Membranes: Experiment and Monte Carlo Study                                     | MDPI              |             | MEMBRANES-BASEL              | JUN                       | 2021                     |
| 0,978575898                    | 138              | Chen, L; Cheng, Y; Liu, YJ; Luo, DM                 | Amine-impregnated carbon aerogels with ultra-high pore volume synthesized by pH adjusting for efficient CO <sub>2</sub> Capture                  | SPRINGER          | 1380-2224   | J POROUS MAT                 | OCT                       | 2019                     |
| 0,9781891                      | 139              | Zhou, YM; Zhao, YC; Zhang, JY; Zheng, CG            | Mercury adsorption and oxidation over magnetic biochar in oxyfuel combustion atmosphere: Impact of enriched CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O | ELSEVIER SCI LTD  | 0016-2361   | FUEL                         | SEP 1                     | 2019                     |
| 0,978130255                    | 140              | Chaikittisilp, W; Khunsupat, R; Chen, TT; Jones, CW | Poly(allylamine)-Mesoporous Silica Composite Materials for CO <sub>2</sub> Capture from Simulated Flue Gas or Ambient Air                        | AMER CHEMICAL SOC | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | DEC 21                    | 2011                     |
| 0,97808188                     | 141              | Hägg, MB; Lindbråthen, A                            | CO <sub>2</sub> capture from natural gas fired power plants by using membrane technology   | AMER CHEMICAL SOC | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | SEP 28                    | 2005                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                    | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,978065587             | 142       | Araújo, ODF; de Medeiros, JL; Yokoyama, L; Morgado, CDV   | Metrics for sustainability analysis of post-combustion abatement of CO <sub>2</sub> emissions: Microalgae mediated routes and CCS (carbon capture and storage) | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0360-5442 | ENERGY                | DEC 1              | 2015              |
| 0,977968634             | 143       | Li, KW; White, S; Zhao, B; Geng, CM; Halliburton, B; Wang, ZB; Zhao, YY; Yu, H; Yang, W; Bai, ZP; Azzi, M | Evaluation of a New Chemical Mechanism for 2-Amino-2-methyl-1-propanol in a Reactive Environment from CSIRO Smog Chamber Experiments                           | AMER CHEMICAL SOC             | 0013-936X | ENVIRON SCI TECHNOL   | AUG 18             | 2020              |
| 0,977764099             | 144       | Khalili, S; Khoshandam, B; Jahanshahi, M  | Synthesis of activated carbon/polyaniline nanocomposites for enhanced CO <sub>2</sub> adsorption   | ROYAL SOC CHEMISTRY           |           | RSC ADV               |                    | 2016              |
| 0,977751102             | 145       | Xu, D; Zhang, J; Li, G; Xiao, PN; Zhai, YC  | Separation of H <sub>2</sub> O / CO <sub>2</sub> Mixtures with Layered Adsorption Method for Greenhouse Gas Control  | HIGHER EDUCATION PRESS        | 1005-9040 | CHEM RES CHINESE U    | JAN 25             | 2012              |
| 0,97764586              | 146       | Kosowska-Golachowska, M; Luckos, A; Czakiert, T   | Composition of Flue Gases during Oxy-Combustion of Energy Crops in a Circulating Fluidized Bed   | MDPI                          |           | ENERGIES              | OCT                | 2022              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>      | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,977524849                    | 147              | Fernandez, ES;<br>del Rio, MS;<br>Chalmers, H;<br>Khakharia, P;<br>Goetheer, ELV;<br>Gibbins, J;<br>Lucquiaud, M | Operational flexibility options in power plants with integrated post-combustion capture  | ELSEVIER SCI LTD       | 1750-5836   | INT J GREENH GAS CON         | MAY                       | 2016                     |
| 0,977221705                    | 148              | Ferrari, MC;<br>Amelio, A;<br>Nardelli, GM;<br>Costi, R  | Assessment on the Application of Facilitated Transport Membranes in Cement Plants for CO <sub>2</sub> Capture  | MDPI                   |             | ENERGIES                     | AUG                       | 2021                     |
| 0,977216569                    | 149              | Shen, MH; Kong, FL; Guo, W; Zuo, ZQ; Gao, T; Chen, S; Tong, LG; Zhang, PK; Wang, L; Chu, PK; Ding, YL            | Impact of H <sub>2</sub> O on CO <sub>2</sub> adsorption and co-adsorption: Mechanism and high-performance adsorbents for efficient H <sub>2</sub> O - CO <sub>2</sub> capture | ELSEVIER SCIENCE SA    | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | JAN 1                     | 2024                     |
| 0,977166871                    | 150              | Chen, JC; Huang, JS  | Partitioning characteristics and particle size distributions of heavy metals in the O <sub>2</sub> /RFG waste incineration system  | ELSEVIER               | 0304-3894   | J HAZARD MATER               | DEC 30                    | 2009                     |
| 0,976935153                    | 151              | Anthony, EJ  | Oxyfuel CFBC: status and anticipated development   | WILEY PERIODICALS, INC | 2152-3878   | GREENH GASES                 | APR                       | 2013                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador              | ISSN          | Abreviação da revista   | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|-------------------------|---------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,976779543             | 152       | Monazam, ER;<br>Spenik, J; Shadle,<br>LJ   | CO <sub>2</sub> Desorption Kinetics<br>for Immobilized<br>Polyethylenimine (PEI)   | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 0887-<br>0624 | ENERG FUEL              | JAN                | 2014              |
| 0,976718749             | 153       | Rütters, H;<br>Stadler, S;<br>Bässler, R;<br>Bettge, D;<br>Jeschke, S;<br>Kather, A;<br>Lempp, C;<br>Lubenau, U;<br>Ostertag-<br>Henning, C;<br>Schmitz, S;<br>Schütz, S;<br>Waldmann, S | Towards an optimization of<br>the CO <sub>2</sub> stream<br>composition-A whole-chain<br>approach  | ELSEVIER SCI<br>LTD     | 1750-<br>5836 | INT J GREENH<br>GAS CON | NOV                | 2016              |
| 0,97666698              | 154       | Lee, JH; Lee, JH;<br>Park, IK; Lee,<br>CH  | Techno-economic and<br>environmental evaluation of<br>CO <sub>2</sub> mineralization<br>technology based on bench-<br>scale experiments  | ELSEVIER SCI<br>LTD     | 2212-<br>9820 | J CO <sub>2</sub> UTIL  | JUL                | 2018              |
| 0,976570422             | 155       | Dai, N; Mitch,<br>WA   | Effects of Flue Gas<br>Compositions on<br>Nitrosamine and Nitramine<br>Formation in<br>Postcombustion CO <sub>2</sub><br>Capture Systems | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 0013-<br>936X | ENVIRON SCI<br>TECHNOL  | JUL 1              | 2014              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador                  | ISSN          | Abreviação da revista   | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|-----------------------------|---------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,976527533             | 156       | Deng, ZJ;<br>Gopalan, A;<br>Sarkisov, L                | In silico engineering of ion-exchanged zeolites for high-performance carbon capture in PSA processes  | ELSEVIER<br>SCIENCE SA      | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J              | MAR 1              | 2023              |
| 0,976518672             | 157       | Wang, HB;<br>Jessop, PG; Liu,<br>GJ                    | Support-Free Porous Polyamine Particles for CO <sub>2</sub> Capture   | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC     | 2161-<br>1653 | ACS MACRO<br>LETT       | AUG                | 2012              |
| 0,9764573               | 158       | Pankhedkar, N;<br>Dwivedi, A;<br>Gudi, R; Biswas,<br>P | Intensified Chemical Looping Combustion Based Polygeneration for CO <sub>2</sub> Valorization to Value-Added Chemicals (Methanol and DME)           | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC     | 0888-<br>5885 | IND ENG CHEM<br>RES     | AUG 17             | 2022              |
| 0,976167169             | 159       | Canepa, R;<br>Wang, MH;<br>Biliyok, C; Satta,<br>A     | Thermodynamic analysis of combined cycle gas turbine power plant with post-combustion CO <sub>2</sub> capture and exhaust gas recirculation         | SAGE<br>PUBLICATIONS<br>LTD | 0954-<br>4089 | P I MECH ENG<br>E-J PRO | MAY                | 2013              |
| 0,976158772             | 160       | Lin, KY; Xie,<br>ZM; Hong, LS;<br>Jiang, JC            | Insights into the capture mechanism of CO <sub>2</sub> by diamine-appended Mg <sub>2</sub> (dobpdc): a combined DFT and microkinetic modeling study | ROYAL SOC<br>CHEMISTRY      | 2050-<br>7526 | J MATER CHEM<br>C       | OCT 5              | 2023              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                    | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,976094487             | 161       | Oignet, J;<br>Delahaye, A;<br>Torré, JP;<br>Dicharry, C;<br>Hoarng, HM;<br>Clain, P;<br>Osswald, V;<br>Youssef, Z;<br>Fournaison, L | Rheological study of CO <sub>2</sub> hydrate slurry in the presence of Sodium Dodecyl Sulfate in a secondary refrigeration loop  | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0009-2509 | CHEM ENG SCI          | FEB 2              | 2017              |
| 0,976065359             | 162       | Huang, K; Peng, HL  | Solubilities of Carbon Dioxide in 1-Ethyl-3-methylimidazolium Thiocyanate, 1-Ethyl-3-methylimidazolium Dicyanamide, and 1-Ethyl-3-methylimidazolium Tricyanomethanide at (298.2 to 373.2) K and (0 to 300.0) kPa | AMER CHEMICAL SOC             | 0021-9568 | J CHEM ENG DATA       | DEC                | 2017              |
| 0,976041809             | 163       | Arenillas, A;<br>Smith, KM;<br>Drage, TC;<br>Snape, CE  | CO <sub>2</sub> capture using some fly ash-derived carbon materials  | ELSEVIER SCI LTD              | 0016-2361 | FUEL                  | DEC                | 2005              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                                | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|---|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,975942556             | 164       | Bellas, JM;<br>Finney, KN;<br>Diego, ME;<br>Ingham, D;<br>Pourkashanian,<br>M   | Experimental investigation of the impacts of selective exhaust gas recirculation on a micro gas turbine                          | ELSEVIER SCI LTD                          | 1750-5836 | INT J GREENH GAS CON  | NOV                | 2019              |
| 0,975902116             | 165       | Akter, T; Abdur, R;<br>Shahinuzzaman, M; Jamal, MS;<br>Gafur, MA; Roy, SK; Aziz, S;<br>Shaikh, MAA;<br>Hossain, M   | Effect of Reaction Parameters on CO <sub>2</sub> Absorption from Biogas Using CaO Sorbent Prepared from Waste Chicken Eggshell   | AMER CHEMICAL SOC                         | 2470-1343 | ACS OMEGA             | NOV 3              | 2023              |
| 0,97565812              | 166       | Aquatar, MO;<br>Bhatia, U;<br>Rayalu, SS;<br>Krupadam, RJ   | Reduced graphene oxide - MnO <sub>2</sub> nanocomposite for CO <sub>2</sub> capture from flue gases at elevated temperatures     | ELSEVIER                                  | 0048-9697 | SCI TOTAL ENVIRON     | APR 10             | 2022              |
| 0,975414167             | 167       | Tontiwachwuthikul, P; Chan, CW;<br>Kritpiphat, W;<br>Demontigny, D;<br>Skoropad, D;<br>Gelowitz, D;<br>Aroonwilas, A;<br>Mourits, F;<br>Wilson, M;<br>Ward, L | Large scale carbon dioxide production from coal-fired power stations for enhanced oil recovery: A new economic feasibility study | CANADIAN INST MINING METALLURGY PETROLEUM | 0021-9487 | J CAN PETROL TECHNOL  | NOV                | 1998              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|-------------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,975084078                    | 168              | Jung, Y; Ko, YG;<br>Nah, IW; Choi,<br>US  | Designing large-sized and spherical CO <sub>2</sub> adsorbents for highly reversible CO <sub>2</sub> capture and low pressure drop              | ELSEVIER<br>SCIENCE SA        | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J                   | JAN 1                     | 2022                     |
| 0,97503242                     | 169              | Jin, B; Yao, WX;<br>Liu, KL; Lu, SJ;<br>Luo, X; Liang,<br>ZW                                    | Self-optimizing control and safety assessment to achieve economic and safe operation for oxy-fuel combustion boiler island systems              | ELSEVIER SCI<br>LTD           | 0306-<br>2619 | APPL ENERG                   | OCT 1                     | 2022                     |
| 0,974698705                    | 170              | Chen, L; Wang,<br>ZR; Wang, CB;<br>Wang, HJ;<br>Anthony, EJ                                     | Sulfation of limestone under O <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O combustion conditions in circulating fluidized bed                               | ELSEVIER SCI<br>LTD           | 1750-<br>5836 | INT J GREENH<br>GAS CON      | APR                       | 2020                     |
| 0,974682575                    | 171              | Xu, YQ; Ding,<br>HR; Luo, C;<br>Zheng, Y; Xu, Y;<br>Li, XS; Zhang,<br>ZW; Shen, C;<br>Zhang, LQ | Effect of lignin, cellulose and hemicellulose on calcium looping behavior of CaO-based sorbents derived from extrusion-spherization method      | ELSEVIER<br>SCIENCE SA        | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J                   | FEB 15                    | 2018                     |
| 0,974494981                    | 172              | Kim, SH; Kim,<br>JK; Yeo, JG;<br>Yeo, YK  | Comparative feasibility study of CO <sub>2</sub> capture in, hollowfiber membrane processes based on process models and heat exchanger analysis | INST<br>CHEMICAL<br>ENGINEERS | 0263-<br>8762 | CHEM ENG RES<br>DES          | JAN                       | 2017                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>            | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,974426838                    | 173              | Kothandaraman, J; Goepfert, A; Czaun, M; Olah, GA; Prakash, GKS  | CO <sub>2</sub> capture by amines in aqueous media and its subsequent conversion to formate with reusable ruthenium and iron catalysts | ROYAL SOC CHEMISTRY          | 1463-9262   | GREEN CHEM                   |                           | 2016                     |
| 0,974214293                    | 174              | Ahmadalinezhad, A; Taylor, R; Sayari, A                          | Molecular-Level Insights into the Oxidative Degradation of Grafted Amines  | WILEY-VCH VERLAG GMBH        | 0947-6539   | CHEM-EUR J                   | AUG 5                     | 2013                     |
| 0,974172963                    | 175              | Jiang, B; Chen, Y; Zhang, LH; Tantai, XW; Dou, HZ; Sun, Y        | Design of multiple-site imidazole derivative aqueous solution for SO <sub>2</sub> capture in low concentration                         | ELSEVIER SCIENCE BV          | 1876-1070   | J TAIWAN INST CHEM E         | OCT                       | 2018                     |
| 0,974151202                    | 176              | Zhao, T; Wei, YJ; Wang, JW; Wang, Q; Chen, YL; Liu, XZ; Zhao, YF | Microporous carbon coated zeolite particles for efficient carbon capture from wet flue gas   | ELSEVIER                     | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | JUL 15                    | 2023                     |
| 0,97364413                     | 177              | Janusz-Cygan, A; Jaschik, M; Warmuzinski, K; Tanczyk, M          | Costs of carbon dioxide removal from flue gases by adsorptive-membrane separation technique  | WYDAWNICTWO SIGMA-NOT SP ZOO | 0033-2496   | PRZEM CHEM                   | FEB                       | 2015                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,973464698                    | 178              | Kim, S; Kim, KS;<br>Seo, Y   | CH <sub>4</sub> enclathration in tetra-iso-amyl ammonium bromide (TiAAB) semiclathrate and its significance for natural gas storage   | ELSEVIER SCIENCE SA | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | DEC 15                    | 2017                     |
| 0,973384094                    | 179              | Alvarez-Gutiérrez, N; Gil, MV; Rubiera, F; Pevida, C                                 | Simplistic approach for preliminary screening of potential carbon adsorbents for CO <sub>2</sub> separation from biogas               | ELSEVIER SCI LTD    | 2212-9820   | J CO <sub>2</sub> UTIL       | DEC                       | 2018                     |
| 0,973360921                    | 180              | Lopez-Anton, MA; Gil, RR; Fuente, E; Díaz-Somoano, M; Martínez-Tarazona, MR; Ruiz, B | Activated carbons from biocollagenic wastes of the leather industry for mercury capture in oxy-combustion                             | ELSEVIER SCI LTD    | 0016-2361   | FUEL                         | FEB 15                    | 2015                     |
| 0,973172684                    | 181              | Zarabadi-Poor, P; Rocha-Rinza, T   | A detailed atomistic molecular simulation study on adsorption-based separation of CO <sub>2</sub> using a porous coordination polymer | ROYAL SOC CHEMISTRY | 2046-2069   | RSC ADV                      |                           | 2018                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                           | ISSN      | Abreviação da revista      | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|--------------------------------------|-----------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,973128199             | 182       | Snider, MT;<br>Verweij, H   | Gas sorption studies on Zeolite Y membrane materials for post-combustion CO <sub>2</sub> capture in coal-fired plants  | ELSEVIER                             | 1387-1811 | MICROPOR<br>MESOPOR MAT    | JUL 1              | 2014              |
| 0,972949961             | 183       | Freund, P;<br>Ormerod, WG   | Progress toward storage of carbon dioxide  | PERGAMON-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD | 0196-8904 | ENERG<br>CONVERS<br>MANAGE |                    | 1997              |
| 0,972919658             | 184       | Wang, RJ; Qi,<br>CR; Jian, Z;<br>Zhao, HJ; Zhang,<br>P; An, SL; Li,<br>QW; Wang, LD | Development of dual-functionalized ionic liquids for biphasic solvents: Enhancing the CO <sub>2</sub> absorption through two-stage reaction and promoting the energy-saving regeneration | ELSEVIER SCI<br>LTD                  | 0016-2361 | FUEL                       | MAR 1              | 2024              |
| 0,972779679             | 185       | Sun, Z; Wang, J;<br>Du, W; Lu, GM;<br>Li, P; Song, XF;<br>Yu, JG                    | Density functional theory study on the thermodynamics and mechanism of carbon dioxide capture by CaO and CaO regeneration  | ROYAL SOC<br>CHEMISTRY               |           | RSC ADV                    |                    | 2016              |
| 0,972592334             | 186       | Zeng, SP; Liu,<br>ZL; Zhao, HL;<br>Yang, TR; Dong,<br>X; Du, ZH                     | A chemically stable La <sub>0.2</sub> Sr <sub>0.8</sub> Fe <sub>0.9</sub> Mo <sub>0.1</sub> O <sub>3-δ</sub> -molten carbonate dual-phase membrane for CO <sub>2</sub> separation        | ELSEVIER                             | 1383-5866 | SEP PURIF<br>TECHNOL       | JAN 1              | 2022              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador                 | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|----------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,972289908             | 187       | Aromada, SA;<br>Eldrup, NH; Oi,<br>LE                            | Cost and Emissions Reduction in CO <sub>2</sub> Capture Plant Dependent on Heat Exchanger Type and Different Process Configurations: Optimum Temperature Approach Analysis | MDPI                       |           | ENERGIES              | JAN                | 2022              |
| 0,971919284             | 188       | Schöny, G;<br>Dietrich, F;<br>Fuchs, J; Pröll, T;<br>Hofbauer, H | A multi-stage fluidized bed system for continuous CO <sub>2</sub> capture by means of temperature swing adsorption - First results from bench scale experiments            | ELSEVIER                   | 0032-5910 | POWDER TECHNOLOGY     | JUL 1              | 2017              |
| 0,971881721             | 189       | Yang, P; Duan, LB; Tang, HJ; Cai, TY; Sun, Z                     | Explaining steam-enhanced carbonation of CaO based on first principles   | WILEY PERIODICALS, INC     | 2152-3878 | GREENHOUSE GASES      | DEC                | 2018              |
| 0,971828089             | 190       | Qin, CL; Yin, JJ; An, H; Liu, WQ; Feng, B                        | Performance of Extruded Particles from Calcium Hydroxide and Cement for CO <sub>2</sub> Capture  | AMERICAN CHEMICAL SOCIETY  | 0887-0624 | ENERGY FUEL           | JAN                | 2012              |
| 0,971575327             | 191       | García, G;<br>Aparicio, S;<br>Atilhan, M                         | Density Functional Theory Study on the Cholinium Dihydrogenphosphate Ionic Liquid for Acid Gas Removal   | SPRINGER/PLENUM PUBLISHERS | 0095-9782 | J SOLUTION CHEM       | APR                | 2015              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo  | Publicador                           | ISSN      | Abreviação da revista      | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|---|--------------------------------------|-----------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,971472882             | 192       | Miles, A;<br>Wilfong, WC;<br>Hopkinson, D;<br>Sekizkardes, AK   | Alkylamine Incorporation in Amidoxime Functionalized Polymers of Intrinsic Microporosity for Gas Capture and Separation   | WILEY-VCH<br>VERLAG GMBH             | 2194-4288 | ENERGY<br>TECHNOL-GER      | OCT                | 2020              |
| 0,971284173             | 193       | Legkov, SA;<br>Bondarenko, GN;<br>Kostina, JV;<br>Novitsky, EG;<br>Bazhenov, SD;<br>Volkov, AV;<br>Volkov, VV | Structural Features of Monoethanolamine Aqueous Solutions with Various Compositions: A Combined Experimental and Theoretical Study Using Vibrational Spectroscopy | MDPI                                 |           | MOLECULES                  | JAN                | 2023              |
| 0,971264183             | 194       | Chae, HJ; Lee, SC; Lee, SJ; Cho, MS; Jung, SY; Ryu, CY; Kwon, YM; Hwang, BW; Lee, JB; Kim, JC                 | Potassium-based dry sorbents for removal of sulfur dioxide at low temperatures  | ELSEVIER<br>SCIENCE INC              | 1226-086X | J IND ENG<br>CHEM          | APR 25             | 2016              |
| 0,971150784             | 195       | Mehrjerdi, H  | Optimal correlation of non-renewable and renewable generating systems for producing hydrogen and methane by power to gas process                                  | PERGAMON-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD | 0360-3199 | INT J<br>HYDROGEN<br>ENERG | APR 5              | 2019              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>          | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|----------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,971104323                    | 196              | Janjhi, FA;<br>Castro-Muñoz, R;<br>Boczkaj, G   | Deep eutectic solvents-Ideal solution for clean air or hidden danger?  | ELSEVIER                   | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | JUN 1                     | 2023                     |
| 0,970958267                    | 197              | Li, CF; Tang, HJ;<br>Duan, YF; Zhu, C;<br>Zheng, YW;<br>Huang, TF                     | Synthetic calcium-based adsorbents for gaseous mercury(II) adsorption from flue gas and study on their mercury adsorption mechanism              | ELSEVIER SCI LTD           | 0016-2361   | FUEL                         | DEC 15                    | 2018                     |
| 0,970709366                    | 198              | Widmer, NC;<br>Cole, JA; Seeker, WR;<br>Gaspar, JA                                    | Practical limitation of mercury speciation in simulated municipal waste incinerator flue gas   | GORDON BREACH SCI PUBL LTD | 0010-2202   | COMBUST SCI TECHNOL          |                           | 1998                     |
| 0,970645844                    | 199              | Zhang, L; Xiao, LR;<br>Zhang, YK; France, LJ;<br>Yu, YH; Long, JX;<br>Guo, DW; Li, XH | Synthesis of Ionic Liquid-SBA-15 Composite Materials and Their Application for SO <sub>2</sub> Capture from Flue Gas                             | AMER CHEMICAL SOC          | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | JAN                       | 2018                     |
| 0,970590947                    | 200              | Shin, S; Yoo, DK;<br>Bae, YS;<br>Jhung, SH  | Polyvinylamine-loaded metal-organic framework MIL-101 for effective and selective CO <sub>2</sub> adsorption under atmospheric or lower pressure | ELSEVIER SCIENCE SA        | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | JUN 1                     | 2020                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>                   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,970410163                    | 201              | Rojo, EM; Rossi, S; Bolado, S; Stampino, PG; Ficara, E; Dotelli, G | Life cycle assessment of biostimulant production from algal biomass grown on piggery wastewater                                    | ELSEVIER                            | 0048-9697   | SCI TOTAL ENVIRON            | JAN 10                    | 2024                     |
| 0,970102776                    | 202              | Karjunen, H; Tynjälä, T; Kuparinen, K; Vakkilainen, E; Joronen, T  | Value creation by converting pulp mill flue gas streams to green fuels   | TECH ASSOC PULP PAPER IND INC       | 0734-1415   | TAPPI J                      | MAR                       | 2023                     |
| 0,970023964                    | 203              | Qian, JF; Song, EY; Lian, HQ; Jiang, JL; Wang, CQ; Pan, YC         | High-performance ZIF-302 mixed-matrix membranes for efficient CO <sub>2</sub> capture  | KOREAN INSTITUTE CHEMICAL ENGINEERS | 0256-1115   | KOREAN J CHEM ENG            | APR                       | 2022                     |
| 0,9700143                      | 204              | Zelenák, V; Skrínska, M; Zukal, A; Cejka, J                        | Carbon dioxide adsorption over amine modified silica: Effect of amine basicity and entropy factor on isosteric heats of adsorption | ELSEVIER SCIENCE SA                 | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | SEP 15                    | 2018                     |
| 0,969823131                    | 205              | He, FJ; Wang, T; Fang, MX; Wang, Z; Yu, H; Ma, QH                  | Screening Test of Amino Acid Salts for CO <sub>2</sub> Absorption at Flue Gas Temperature in a Membrane Contactor                  | AMER CHEMICAL SOC                   | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | JAN                       | 2017                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>                            | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|--|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,96978716                     | 206              | Qi, H; Wu, XW;<br>Huan, HH                              | Simulation and comprehensive technical, economic, and environmental assessments of carbon dioxide capture for methanol production through flue gas of a combined cycle power plant | SPRINGER<br>HEIDELBERG                       | 2008-<br>9163 | INT J ENERGY<br>ENVIR E      | SEP                       | 2023                     |
| 0,969688988                    | 207              | Lou, WL; Yang,<br>JF; Li, LB; Li, JP                    | Adsorption and separation of CO <sub>2</sub> on Fe(II)-MOF-74: Effect of the open metal coordination site  | ACADEMIC<br>PRESS INC<br>ELSEVIER<br>SCIENCE | 0022-<br>4596 | J SOLID STATE<br>CHEM        | MAY                       | 2014                     |
| 0,969453498                    | 208              | Alahmed, AH;<br>Briggs, ME;<br>Cooper, AI;<br>Adams, DJ | Covalent and electrostatic incorporation of amines into hypercrosslinked polymers for increased CO <sub>2</sub> selectivity  | WILEY  | 0887-<br>624X | J POLYM SCI<br>POL CHEM      | NOV 15                    | 2018                     |
| 0,969387191                    | 209              | Ahn, J; Kim, HJ   | Combustion Characteristics of 0.5 MW Class Oxy-Fuel FGR (Flue Gas Recirculation) Boiler for CO <sub>2</sub> Capture  | MDPI   |               | ENERGIES                     | JUL                       | 2021                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo  | Publicador   | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|---|--|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,969297318             | 210       | Loughran, RP;<br>Hurley, T;<br>Gladysiak, A;<br>Chidambaram, A;<br>Khivantsev, K;<br>Walter, ED;<br>Graham, TR;<br>Reardon, P;<br>Szanyi, J; Fast,<br>DB; Miller, QRS;<br>Park, AHA;<br>Stylianou, KC | CO <sub>2</sub> capture from wet flue gas using a water-stable and cost-effective metal-organic framework | CELL PRESS   |           | CELL REP PHYS SCI     | JUL 19             | 2023              |
| 0,96910378              | 211       | Pearson, RJ;<br>Eisaman, MD;<br>Turner, JWG;<br>Edwards, PP;<br>Jiang, Z;<br>Kuznetsov, VL;<br>Littau, KA; Di<br>Marco, L; Taylor,<br>SRG   | Energy Storage via Carbon-Neutral Fuels Made From CO <sub>2</sub> , Water, and Renewable Energy           | IEEE-INST<br>ELECTRICAL<br>ELECTRONICS<br>ENGINEERS<br>INC | 0018-9219 | P IEEE                | FEB                | 2012              |
| 0,968707014             | 212       | Chui, EH;<br>Majeski, AJ;<br>Douglas, MA;<br>Tan, Y;<br>Thambimuthu,<br>KV  | Numerical investigation of oxy-coal combustion to evaluate burner and combustor design concepts           | PERGAMON-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD                       | 0360-5442 | ENERGY                | JUL-AUG            | 2004              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                          | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,968565664             | 213       | Purdue, MJ  | Explicit Flue Gas Adsorption Isotherm Model for Zeolite 13X Incorporating Enhancement of Nitrogen Loading by Adsorbed Carbon Dioxide and Multi-Site Affinity Shielding of Coadsorbate Dependent upon Water Vapor Content | AMER CHEMICAL SOC                   | 1932-7447 | J PHYS CHEM C         | JUN 7              | 2018              |
| 0,967939703             | 214       | Salkuyeh, YK;<br>Adams, TA  | A new power, methanol, and DME polygeneration process using integrated chemical looping systems  | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD       | 0196-8904 | ENERG CONVERS MANAGE  | DEC                | 2014              |
| 0,967584002             | 215       | Bower, JK;<br>Barpaga, D;<br>Prodinger, S;<br>Krishna, R;<br>Schaeff, HT;<br>McGrail, BP;<br>Derewinski, MA;<br>Motkuri, RK | Dynamic Adsorption of CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> on Cation-Exchanged Chabazite SSZ-13: A Breakthrough Analysis   | AMER CHEMICAL SOC                   | 1944-8244 | ACS APPL MATER INTER  | MAY 2              | 2018              |
| 0,967537079             | 216       | Kaveh, NS;<br>Rudolph, ESJ;<br>Wolf, KHAA;<br>Ashrafizadeh, SN  | Wettability determination by contact angle measurements: hvbB coal-water system with injection of synthetic flue gas and CO <sub>2</sub>   | ACADEMIC PRESS INC ELSEVIER SCIENCE | 0021-9797 | J COLLOID INTERF SCI  | DEC 1              | 2011              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>      | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,9672732                      | 217              | Sharma, A;<br>Sarkar, P;<br>Chhabra, M;<br>Kumar, A;<br>Kumar, A;<br>Kothadia, H;<br>Mallick, A                                  | Carbon capture from petrol-engine flue gas: Reviving algae-based sequestration with integrated microbial fuel cells         | ELSEVIER<br>SCIENCE SA | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J                   | NOV 15                    | 2023                     |
| 0,966807998                    | 218              | Widger, LR;<br>Sarma, M;<br>Bryant, JJ;<br>Mannel, DS;<br>Thompson, JG;<br>Lippert, CA; Liu,<br>KL                               | Enhancements in mass transfer for carbon capture solvents part I: Homogeneous catalyst                                      | ELSEVIER SCI<br>LTD    | 1750-<br>5836 | INT J GREENH<br>GAS CON      | AUG                       | 2017                     |
| 0,966508706                    | 219              | Cerón, MR; Lai,<br>LS; Amiri, A;<br>Monte, M; Katta,<br>S; Kelly, JC;<br>Worsley, MA;<br>Merrill, MD;<br>Kim, S;<br>Campbell, PG | Surpassing the conventional limitations of CO <sub>2</sub> separation membranes with hydroxide/ceramic dual-phase membranes | ELSEVIER               | 0376-<br>7388 | J MEMBRANE<br>SCI            | DEC 1                     | 2018                     |
| 0,966185364                    | 220              | Procopio, MN;<br>Urquiza, G;<br>Castro, L  | Analysis of Absorber Packed Height for Power Plants with Post-Combustion CO <sub>2</sub> Capture                            | MDPI                   |               | SUSTAINABI<br>TY-BASEL       | JUN                       | 2023                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>     | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-----------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,966089763                    | 221              | Keller, M; Leion, H; Mattisson, T; Lyngfelt, A  | Gasification inhibition in chemical-looping combustion with solid fuels  | ELSEVIER SCIENCE INC  | 0010-2180   | COMBUST FLAME                | MAR                       | 2011                     |
| 0,965978742                    | 222              | Zhu, DC; Fang, MX; Lv, Z; Wang, Z; Luo, ZY  | Selection of Blended Solvents for CO <sub>2</sub> Absorption from Coal-Fired Flue Gas. Part 1: Monoethanolamine (MEA)-Based Solvents | AMER CHEMICAL SOC     | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | JAN                       | 2012                     |
| 0,96544016                     | 223              | Xu, L; Okrut, A; Tate, GL; Ohnishi, R; Wu, KL; Xie, D; Kulkarni, A; Takewaki, T; Monnier, JR; Katz, A | Cs-RHO Goes from Worst to Best as Water Enhances Equilibrium CO <sub>2</sub> Adsorption via Phase Change                             | AMER CHEMICAL SOC     | 0743-7463   | LANGMUIR                     | NOV 30                    | 2021                     |
| 0,965270215                    | 224              | Shi, C; Li, L; Li, Y  | High-throughput screening of hypothetical aluminosilicate zeolites for CO <sub>2</sub> capture from flue gas                         | ELSEVIER SCI LTD      | 2212-9820   | J CO <sub>2</sub> UTIL       | DEC                       | 2020                     |
| 0,965131641                    | 225              | Ewert, G; Kemper, J; Algayer, Y; Meshkova, A  | Degradation and Energy Characteristics of Reactive Amine Solvents during CO <sub>2</sub> Absorption/Desorption                       | WILEY-VCH VERLAG GMBH | 0009-286X   | CHEM-ING-TECH                | DEC                       | 2011                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador          | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|---------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,965026865             | 226       | Jiang, LL; Xiao, QX; Tao, H; Wang, SY; Lin, WJ; Wang, XM; Li, HR; Shi, GL; Wang, CM                | Highly Selective Absorption of Low-Concentration SO <sub>2</sub> over CO <sub>2</sub> in Flue Gas through Cation-Tunable Protic Ionic Liquids | AMER CHEMICAL SOC   | 0887-0624 | ENERG FUEL            | JAN 19             | 2023              |
| 0,964874843             | 227       | Scholes, CA; Kentish, SE; Qader, A   | Membrane gas-solvent contactor pilot plant trials for post-combustion CO <sub>2</sub> capture   | ELSEVIER            | 1383-5866 | SEP PURIF TECHNOL     | APR 15             | 2020              |
| 0,964814472             | 228       | Gómez-Giménez, C; Izquierdo, MT; Obras-Loscertales, MD; de Diego, LF; García-Labiano, F; Adánez, J | Mercury capture by a structured Au/C regenerable sorbent under oxycoal combustion representative and real conditions                          | ELSEVIER SCI LTD    | 0016-2361 | FUEL                  | NOV 1              | 2017              |
| 0,964774399             | 229       | Wang, Z; Goyal, N; Liu, LY; Tsang, DCW; Shang, J; Liu, WJ; Li, G                                   | N-doped porous carbon derived from polypyrrole for CO <sub>2</sub> capture from humid flue gases  | ELSEVIER SCIENCE SA | 1385-8947 | CHEM ENG J            | SEP 15             | 2020              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador            | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|-----------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,964673563             | 230       | Li, HH; Wang, F;<br>Li, SG; Yu, M  | Two-stage membrane-based process utilizing highly CO <sub>2</sub> -selective membranes for cost and energy efficient carbon capture from coal flue gas: A process simulation study | ELSEVIER              | 0376-7388 | J MEMBRANE SCI        | MAR 5              | 2023              |
| 0,964667421             | 231       | Oldenburg, CM;<br>Pruess, K;<br>Benson, SM                                 | Process modeling of CO <sub>2</sub> injection into natural gas reservoirs for carbon sequestration and enhanced gas recovery   | AMER CHEMICAL SOC     | 0887-0624 | ENERG FUEL            | MAR-APR            | 2001              |
| 0,964391922             | 232       | Zhang, XM;<br>Xiong, WJ; Tu, ZH; Peng, LL;<br>Wu, YT; Hu, XB               | Supported Ionic Liquid Membranes with Dual-Site Interaction Mechanism for Efficient Separation of CO <sub>2</sub>  | AMER CHEMICAL SOC     | 2168-0485 | ACS SUSTAIN CHEM ENG  | JUN 17             | 2019              |
| 0,964180892             | 233       | He, H; Zhuang, LZ; Chen, SX;<br>Liu, HC                                    | Solid Amine Adsorbent Prepared by Molecular Imprinting and Its Carbon Dioxide Adsorption Properties  | WILEY-VCH VERLAG GMBH | 1861-4728 | CHEM-ASIAN J          | NOV                | 2016              |
| 0,963994471             | 234       | An, HF; Tian, WJ; Lu, X; Yuan, HM; Yang, LY;<br>Zhang, H; Shen, HM; Bai, H | Boosting the CO <sub>2</sub> adsorption performance by defect-rich hierarchical porous Mg-MOF-74   | ELSEVIER SCIENCE SA   | 1385-8947 | CHEM ENG J            | AUG 1              | 2023              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador  | ISSN          | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|---|---------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,963975389             | 235       | Gilassi, S;<br>Taghavi, SM;<br>Rodrigue, D;<br>Kaliaguine, S   | Techno-Economic Analysis of a Hybrid System for Flue-Gas Separation: Combining Membrane and Enzymatic-Absorption Processes                                       | ELSEVIER<br>SCIENCE SA                            | 0255-<br>2701 | CHEM ENG<br>PROCESS   | FEB                | 2021              |
| 0,963740867             | 236       | Wang, LM; Tian, XF; Fu, D; Du, XQ; Ye, JH  | Experimental investigation on CO <sub>2</sub> absorption capacity and viscosity for high concentrated 1-dimethylamino-2-propanol-monoethanolamine aqueous blends | ACADEMIC<br>PRESS LTD-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD | 0021-<br>9614 | J CHEM<br>THERMODYN   | DEC                | 2019              |
| 0,963725997             | 237       | Arnesen, K;<br>Vachaparambil, KJ; Andersen, V;<br>Panjwani, B;<br>Jakovljevic, K;<br>Enge, EK;<br>Gaertner, H;<br>Aarhaug, TA;<br>Einarsrud, KE;<br>Tranell, G | Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions from a Pilot Scale Silicon Process with Flue Gas Recirculation   | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC                           | 0888-<br>5885 | IND ENG CHEM<br>RES   | MAY 4              | 2023              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador                                   | ISSN      | Abreviação da revista   | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|--|-----------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,963699331             | 238       | Lim, M;<br>Nimelnair, S;<br>Lea-Langton, AR   | Reforming of Fluctuating Biogas Compositions with Non-thermal Plasma for Enhancement of Spark Ignition Engine Performance                        | SPRINGER                                     | 0272-4324 | PLASMA CHEM<br>PLASMA P | MAR                | 2022              |
| 0,963493178             | 239       | Liu, Z; Yang, Y;<br>Du, ZY; Xing, W;<br>Komarneni, S;<br>Zhang, ZD;<br>Gao, XH; Yan, ZF | Furfuralcohol Co-Polymerized Urea Formaldehyde Resin-derived N-Doped Microporous Carbon for CO <sub>2</sub> Capture                              | SPRINGER                                     | 1556-276X | NANOSCALE<br>RES LETT   | AUG 21             | 2015              |
| 0,963455759             | 240       | Pugh, SM; Forse, AC   | Nuclear magnetic resonance studies of carbon dioxide capture   | ACADEMIC<br>PRESS INC<br>ELSEVIER<br>SCIENCE | 1090-7807 | J MAGN RESON            | JAN                | 2023              |
| 0,963240555             | 241       | Manrique, R;<br>Wu, W; Chang, JS  | A molecular dynamics study on the CO <sub>2</sub> permeability of microalgae lipid membrane  | SPRINGER                                     | 0921-8971 | J APPL PHYCOL           | FEB                | 2020              |
| 0,962398715             | 242       | Dhiman, I;<br>Vellamarthodika, S;<br>Gautam, S  | Influence of orientational disorder in the adsorbent on the structure and dynamics of the adsorbate: MD simulations of SO <sub>2</sub> in ZSM-22 | PERGAMON-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD         | 0009-2509 | CHEM ENG SCI            | JAN 5              | 2024              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b> | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,962397391                    | 243              | Kim, K; Sa, JH  | Advanced pre-combustion CO <sub>2</sub> capture by clathrate hydrate formation with water-to-gas molar ratio optimization                                | ELSEVIER          | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | APR 1                     | 2023                     |
| 0,962395959                    | 244              | Shang, SS; Yang, C; Sun, MZ; Tao, ZY; Hanif, A; Gu, QF; Shang, J                | CO <sub>2</sub> capture from wet flue gas using transition metal inserted porphyrin-based metal-organic frameworks as efficient adsorbents               | ELSEVIER          | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | NOV 15                    | 2022                     |
| 0,962384198                    | 245              | Xue, CF; Feng, L; Zhang, Q; Huang, RC; Hao, YA; Ma, XL; Liu, G; Li, KX; Hao, XG | High and fast carbon dioxide capture of hydroxypyridine-based ionogel depending on pore structure of mesoporous silica vesicle in the simulated flue gas | ELSEVIER SCI LTD  | 1750-5836   | INT J GREENH GAS CON         | MAY                       | 2019                     |
| 0,961915931                    | 246              | Dutcher, B; Adidharma, H; Radosz, M   | Carbon Filter Process for Flue-Gas Carbon Capture on Carbonaceous Sorbents: Steam-Aided Vacuum Swing Adsorption Option                                   | AMER CHEMICAL SOC | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | AUG 17                    | 2011                     |
| 0,961913226                    | 247              | Yu, J; Zhai, YX; Chuang, SSC  | Water Enhancement in CO <sub>2</sub> Capture by Amines: An Insight into CO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O Interactions on Amine Films and Sorbents      | AMER CHEMICAL SOC | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | MAR 21                    | 2018                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>            | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,961792616                    | 248              | Ye, B; Jiang, JJ;<br>Zhou, Y; Liu, JG;<br>Wang, K        | Technical and economic analysis of amine-based carbon capture and sequestration at coal-fired power plants      | ELSEVIER SCI LTD             | 0959-6526   | J CLEAN PROD                 | JUN 10                    | 2019                     |
| 0,961502204                    | 249              | Shi, YS; Xie, Y;<br>Alshahrani, T;<br>Chen, BL           | A zirconium-based microporous metal-organic framework for molecular sieving CO <sub>2</sub> separation          | ROYAL SOC CHEMISTRY          |             | CRYSTENGCO MM                | MAR 13                    | 2023                     |
| 0,961284817                    | 250              | Odejobi, OJ;<br>Jisieike, CF;<br>Anozie, AN              | Simulation and exergy analysis of processes for CO <sub>2</sub> capture and utilisation for methanol production | INDERSCIENCE ENTERPRISES LTD | 1742-8297   | INT J EXERGY                 |                           | 2015                     |
| 0,961004992                    | 251              | Ziobrowski, Z;<br>Rotkegel, A                            | The influence of water content in imidazolium based ILs on carbon dioxide removal efficiency                    | ELSEVIER SCIENCE BV          | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | MAY 31                    | 2017                     |
| 0,960997613                    | 252              | Deng, DS; Jiang, YT; Liu, XB                             | Investigation of furoate-based ionic liquid as efficient SO <sub>2</sub> absorbent                              | ROYAL SOC CHEMISTRY          | 1144-0546   | NEW J CHEM                   | MAR 7                     | 2017                     |
| 0,960887123                    | 253              | Leonzio, G;<br>Bogle, D;<br>Foscolo, PU;<br>Zondervan, E | Optimization of CCUS supply chains in the UK: A strategic role for emissions reduction                          | ELSEVIER                     | 0263-8762   | CHEM ENG RES DES             | MAR                       | 2020                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|--|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,960670206                    | 254              | Jung, H; Heo, S;<br>Lee, JH                                | Model predictive control for amine-based CO <sub>2</sub> capture process with advanced flash stripper                              | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0967-0661   | CONTROL ENG PRACT            | SEP                       | 2021                     |
| 0,960611283                    | 255              | Liu, ZM; Karimi, IA  | New operating strategy for a combined cycle gas turbine power plant  | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0196-8904   | ENERG CONVERS MANAGE         | SEP 1                     | 2018                     |
| 0,960464554                    | 256              | Donskoy, I   | Techno-Economic Efficiency Estimation of Promising Integrated Oxyfuel Gasification Combined-Cycle Power Plants with Carbon Capture | MDPI                          |             | CLEAN TECHNOL-BASEL          | MAR                       | 2023                     |
| 0,960422748                    | 257              | Venturi, D;<br>Grupkovic, D;<br>Sisti, L;<br>Baschetti, MG | Effect of humidity and nanocellulose content on Polyvinylamine-nanocellulose hybrid membranes for CO <sub>2</sub> capture          | ELSEVIER                      | 0376-7388   | J MEMBRANE SCI               | FEB 15                    | 2018                     |
| 0,960303503                    | 258              | Dong, FH; Kirk, DW; Tran, H                                | Biomass ash alkalinity reduction for land application via CO <sub>2</sub> from treated boiler flue gas                             | ELSEVIER SCI LTD              | 0016-2361   | FUEL                         | NOV 15                    | 2014                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador          | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|---------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,960238461             | 259       | Yang, HJ; Luo, M; Chen, XT; Zhao, X; Lin, J; Hu, DD; Li, DS; Bu, XH; Feng, PY; Wu, T   | Cation-Exchanged Zeolitic Chalcogenides for CO <sub>2</sub> Adsorption  | AMER CHEMICAL SOC   | 0020-1669 | INORG CHEM            | DEC 18             | 2017              |
| 0,960089631             | 260       | Thirion, D; Rozyyev, V; Park, J; Byun, J; Jung, Y; Atilhan, M; Yavuz, CT   | Observation of the wrapping mechanism in amine carbon dioxide molecular interactions on heterogeneous sorbents  | ROYAL SOC CHEMISTRY | 1463-9076 | PHYS CHEM CHEM PHYS   | JUN 7              | 2016              |
| 0,960027011             | 261       | Awoyomi, A; Patchigolla, K; Anthony, EJ  | CO <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> emission reduction in CO <sub>2</sub> shipping infrastructure  | ELSEVIER SCI LTD    | 1750-5836 | INT J GREENH GAS CON  | SEP                | 2019              |
| 0,959795228             | 262       | Muldoon, PF; Venna, SR; Gidley, DW; Baker, JS; Zhu, LX; Tong, Z; Xiang, FM; Hopkinson, DP; Yi, SL; Sekizkardes, AK; Rosi, NL | Mixed Matrix Membranes from a Microporous Polymer Blend and Nanosized Metal-Organic Frameworks with Exceptional CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> Separation Performance | AMER CHEMICAL SOC   |           | ACS MATER LETT        | JUL 6              | 2020              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador        | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,959557512             | 263       | Qiu, YJ; Lu, HF;<br>Zhu, YM; Liu, YY;<br>Wu, KJ;<br>Liang, B                              | Phase-Change CO <sub>2</sub> Absorption Using Novel 3-Dimethylaminopropylamine with Primary and Tertiary Amino Groups  | AMER CHEMICAL SOC | 0888-5885 | IND ENG CHEM RES      | MAY 13             | 2020              |
| 0,959512235             | 264       | Grant, T;<br>Anderson, C;<br>Hooper, B  | Comparative life cycle assessment of potassium carbonate and monoethanolamine solvents for CO <sub>2</sub> capture from post combustion flue gases                       | ELSEVIER SCI LTD  | 1750-5836 | INT J GREENH GAS CON  | SEP                | 2014              |
| 0,959432681             | 265       | Pennline, HW;<br>Granite, EJ;<br>Luebke, DR;<br>Kitchin, JR;<br>Landon, J;<br>Weiland, LM | Separation of CO <sub>2</sub> from flue gas using electrochemical cells  | ELSEVIER SCI LTD  | 0016-2361 | FUEL                  | JUN                | 2010              |
| 0,959355712             | 266       | Li, KK; Yu, H;<br>Qi, GJ; Feron, P;<br>Tade, M; Yu, JW;<br>Wang, SJ                       | Rate-based modelling of combined SO <sub>2</sub> removal and NH <sub>3</sub> recycling integrated with an aqueous NH <sub>3</sub> -based CO <sub>2</sub> capture process | ELSEVIER SCI LTD  | 0306-2619 | APPL ENERG            | JUN 15             | 2015              |
| 0,959315537             | 267       | Wang, WL; Li, J;<br>Wei, XL; Ding, J;<br>Feng, HJ; Yan, JY;<br>Yang, JP                   | Carbon dioxide adsorption thermodynamics and mechanisms on MCM-41 supported polyethylenimine prepared by wet impregnation method   | ELSEVIER SCI LTD  | 0306-2619 | APPL ENERG            | MAR 15             | 2015              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>                                  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,959205509                    | 268              | Decardi-Nelson, B; Liu, S; Liu, JF              | Improving Flexibility and Energy Efficiency of Post-Combustion CO <sub>2</sub> Capture Plants Using Economic Model Predictive Control               | MDPI                          |             | PROCESSES                    | SEP                       | 2018                     |
| 0,959170846                    | 269              | Ribeiro, RPPL; Grande, CA; Rodrigues, AE        | Activated carbon honeycomb monolith - Zeolite 13X hybrid system to capture CO <sub>2</sub> from flue gases employing Electric Swing Adsorption      | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0009-2509   | CHEM ENG SCI                 | DEC 18                    | 2013                     |
| 0,959132438                    | 270              | Dickey, AN; Yazaydin, AÖ; Willis, RR; Snurr, RQ | Screening CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> selectivity in metal-organic frameworks using Monte Carlo simulations and ideal adsorbed solution theory | WILEY                         | 0008-4034   | CAN J CHEM ENG               | AUG                       | 2012                     |
| 0,958718734                    | 271              | Belo, LP; Elliott, LK; Stanger, RJ; Wall, TF    | Impacts of Sulfur Oxides on Mercury Speciation and Capture by Fly Ash during Oxy-fuel Pulverized Coal Combustion                                    | AMER CHEMICAL SOC             | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | OCT                       | 2016                     |
| 0,95871493                     | 272              | Bollini, P; Choi, S; Drese, JH; Jones, CW       | Oxidative Degradation of Aminosilica Adsorbents Relevant to Postcombustion CO <sub>2</sub> Capture  | AMER CHEMICAL SOC             | 0887-0624   | ENERG FUEL                   | MAY                       | 2011                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|---------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,95869162                     | 273              | Li, FF; Yang, ZH; Zeng, R; Yang, G; Chang, X; Yan, JB; Hou, YL | Microalgae Capture of CO <sub>2</sub> from Actual Flue Gas Discharged from a Combustion Chamber                                   | AMER CHEMICAL SOC   | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | MAY 18                    | 2011                     |
| 0,95829312                     | 274              | Hoffman, JS; Hammache, S; Gray, ML; Fauth, DJ; Pennline, HW    | Parametric study for an immobilized amine sorbent in a regenerative carbon dioxide capture process                                | ELSEVIER SCIENCE BV | 0378-3820   | FUEL PROCESS TECHNOL         | OCT                       | 2014                     |
| 0,957919718                    | 275              | Liang, YF; Yang, LL; Liu, SY; Xu, RJ; Jiang, W; Wu, P          | Study on the process intensification of superaerophobic materials to improve CO <sub>2</sub> mass transfer efficiency             | ELSEVIER SCIENCE SA | 0255-2701   | CHEM ENG PROCESS             | JAN                       | 2023                     |
| 0,957841194                    | 276              | Sandhu, NK; Pudasainee, D; Sarkar, P; Gupta, R                 | Steam Regeneration of Polyethylenimine-Impregnated Silica Sorbent for Postcombustion CO <sub>2</sub> Capture: A Multicyclic Study | AMER CHEMICAL SOC   | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | FEB 24                    | 2016                     |
| 0,957777152                    | 277              | Wang, JT; Wang, M; Zhao, BB; Qiao, WM; Long, DH; Ling, LC      | Mesoporous Carbon-Supported Solid Amine Sorbents for Low-Temperature Carbon Dioxide Capture                                       | AMER CHEMICAL SOC   | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | APR 17                    | 2013                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>       | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|-------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,957721023                    | 278              | Querejeta, N;<br>Rubiera, F;<br>Pevida, C  | Enhanced capacity to CO <sub>2</sub> sorption in humid conditions with a K-doped biocarbon  | ELSEVIER<br>SCIENCE BV  | 2095-<br>4956 | J ENERGY<br>CHEM             | JUL                       | 2019                     |
| 0,957448242                    | 279              | Palakkal, AS;<br>Pillai, RS  | Discovering the impact of targeted defects in SP-MOF for CO <sub>2</sub> capture from flue gas in presence of humidity through computational modelling              | ELSEVIER SCI<br>LTD     | 2212-<br>9820 | J CO <sub>2</sub> UTIL       | DEC                       | 2022                     |
| 0,95722733                     | 280              | Aschenbrenner,<br>O; Styring, P  | Comparative study of solvent properties for carbon dioxide absorption   | ROYAL SOC<br>CHEMISTRY  | 1754-<br>5692 | ENERG<br>ENVIRON SCI         |                           | 2010                     |
| 0,956857126                    | 281              | Choe, JH; Park,<br>JR; Chae, YS;<br>Kim, DW; Choi,<br>DS; Kim, H;<br>Kang, M; Seo, H;<br>Park, YK; Hong,<br>CS | Shaping and silane coating of a diamine-grafted metal-organic framework for improved CO <sub>2</sub> capture  | SPRINGERNAT<br>URE      |               | COMMUN<br>MATER              | JAN 4                     | 2021                     |
| 0,956691317                    | 282              | Alonso, G;<br>Bahamon, D;<br>Keshavarz, F;<br>Giménez, X;<br>Gamallo, P;<br>Sayós, R                           | Density Functional Theory-Based Adsorption Isotherms for Pure and Flue Gas Mixtures on Mg-MOF-74. Application in CO <sub>2</sub> Capture Swing Adsorption Processes | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 1932-<br>7447 | J PHYS CHEM C                | FEB 22                    | 2018                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>   | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|--|---|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,956500887                    | 283              | He, ZR; Li, YJ; Ma, XT; Zhang, W; Chi, CY; Wang, ZY                    | Influence of steam in carbonation stage on CO <sub>2</sub> capture by Ca-based industrial waste during calcium looping cycles | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0360-3199   | INT J HYDROGEN ENERG         | FEB 23                    | 2016                     |
| 0,956423487                    | 284              | Galanova, EG; Magomedova, MV; Chistyakov, KA; Afokin, MI; Bazhenov, SD | Calculation and Simulation of Flowsheets for Processing Flue Gases from Thermal Power Plants to Methanol                      | PLEIADES PUBLISHING INC       | 1070-4272   | RUSS J APPL CHEM+            | FEB                       | 2023                     |
| 0,95628414                     | 285              | Baqain, M; Yörük, CR; Nesumajev, D; Järvik, O; Konist, A               | Ash characterisation formed under different oxy-fuel circulating fluidized bed conditions                                     | ELSEVIER SCI LTD              | 0016-2361   | FUEL                         | APR 15                    | 2023                     |
| 0,955930525                    | 286              | Wijesiri, RP; Knowles, GP; Yeasmin, H; Hoadley, AFA; Chaffee, AL       | CO <sub>2</sub> Capture from Air Using Pelletized Polyethylenimine Impregnated MCF Silica                                     | AMER CHEMICAL SOC             | 0888-5885   | IND ENG CHEM RES             | FEB 27                    | 2019                     |
| 0,955865716                    | 287              | Wu, H; Zhang, B; Qiu, Y; Luo, GQ; Yao, H                               | Experiment study on mercury migration across wet flue gas desulfurization slurry under oxy-coal combustion atmosphere         | ELSEVIER SCI LTD              | 0016-2361   | FUEL                         | OCT 1                     | 2016                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador          | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|---------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,955849853             | 288       | Gomez-Rueda, Y; Verougstraete, B; Ranga, C; Perez-Botella, E; Reniers, F; Denayer, JFM               | Rapid temperature swing adsorption using microwave regeneration for carbon capture   | ELSEVIER SCIENCE SA | 1385-8947 | CHEM ENG J            | OCT 15             | 2022              |
| 0,955736748             | 289       | Lim, JW; Dong, WJ; Cho, WS; Yoo, CJ; Lee, JL   | Cu <sub>x</sub> S Catalysts by Ag-Mediated Corrosion of Cu for Electrochemical Reduction of Sulfur-Containing CO <sub>2</sub> Gas to HCOOH   | AMER CHEMICAL SOC   | 2155-5435 | ACS CATAL             | NOV 4              | 2022              |
| 0,955608874             | 290       | Nwaoha, C; Saiwan, C; Supap, T; Idem, R; Tontiwachwuthikul, P; Rongwong, W; Al-Marri, MJ; Benamor, A | Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) capture performance of aqueous tri-solvent blends containing 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) and methyldiethanolamine (MDEA) promoted by diethylenetriamine (DETA) | ELSEVIER SCI LTD    | 1750-5836 | INT J GREENH GAS CON  | OCT                | 2016              |
| 0,955508449             | 291       | Liu, F; Rochelle, GT; Wang, T; Chen, E; Fang, MX   | CO <sub>2</sub> absorption rate in biphasic solvent of aminoethylethanolamine and diethylethanolamine  | ELSEVIER SCIENCE SA | 1385-8947 | CHEM ENG J            | JAN 15             | 2021              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador                           | ISSN          | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|--------------------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,955502417             | 292       | Soundararajan, R;<br>Gundersen, T  | Coal based power plants using oxy-combustion for CO <sub>2</sub> capture: Pressurized coal combustion to reduce capture penalty   | PERGAMON-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD | 1359-<br>4311 | APPL THERM<br>ENG     | OCT 15             | 2013              |
| 0,955463385             | 293       | Wienchol, P;<br>Korus, A; Szlek,<br>A; Ditaranto, M                        | Thermogravimetric and kinetic study of thermal degradation of various types of municipal solid waste (MSW) under N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> and oxy-fuel conditions | PERGAMON-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD | 0360-<br>5442 | ENERGY                | JUN 1              | 2022              |
| 0,955315188             | 294       | Geng, XM; Mao,<br>YF; Li, S; Yang,<br>XE; Zhou, B;<br>Liu, ST; Yang,<br>ZX | Water Unexpectedly Impacts Both Thermodynamics and Kinetics of Rn Removal in HKUST-1  | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC              | 1932-<br>7447 | J PHYS CHEM C         | AUG 31             | 2023              |
| 0,955293096             | 295       | Amiri, M;<br>Shahhosseini, S;<br>Ghaemi, A                                 | Optimization of CO <sub>2</sub> Capture Process from Simulated Flue Gas by Dry Regenerable Alkali Metal Carbonate Based Adsorbent Using Response Surface Methodology      | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC              | 0887-<br>0624 | ENERG FUEL            | MAY                | 2017              |
| 0,9550025               | 296       | Cerrillo-Briones,<br>IM; Ricardez-<br>Sandoval, LA                         | Robust optimization of a post-combustion CO <sub>2</sub> capture absorber column under process uncertainty  | ELSEVIER                             | 0263-<br>8762 | CHEM ENG RES<br>DES   | APR                | 2019              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,954571269                    | 297              | Mansir, IB; Ben-Mansour, R; Habib, MA   | Oxy-fuel combustion in a two-pass oxygen transport reactor for fire tube boiler application  | ELSEVIER SCI LTD              | 0306-2619   | APPL ENERG                   | NOV 1                     | 2018                     |
| 0,954514555                    | 298              | Li, C; Xiang, Y; Wang, RT; Yuan, J; Xu, YH; Li, WG; Zheng, ZG                               | Exploring the influence of flue gas impurities on the electrochemical corrosion mechanism of X80 steel in a supercritical CO <sub>2</sub> -saturated aqueous environment               | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0010-938X   | CORROS SCI                   | FEB                       | 2023                     |
| 0,95448077                     | 299              | Tang, YN; Chong, CT; Ng, JH; Herraiz, L; Li, J; Ong, HC; Lam, SS; Tabatabaei, M; Chong, WWF | Thermoexergetic analysis and response optimisation of selective exhaust gas recirculation with solvent-based CO <sub>2</sub> capture in a natural gas-fired combined cycle power plant | SPRINGER                      | 1618-954X   | CLEAN TECHNOL ENVIR          | MAY                       | 2024                     |
| 0,95439052                     | 300              | Nad, M; Brummer, V; Losák, P; Mása, V; Sukacová, K; Tatarová, D; Pernica, M; Procházková, M | Waste-to-energy plants flue gas CO <sub>2</sub> mitigation using a novel tubular photobioreactor while producing Chlorella algae   | ELSEVIER SCI LTD              | 0959-6526   | J CLEAN PROD                 | JAN 20                    | 2023                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>     | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|-----------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,954321356                    | 301              | Yang, LX; Shi, C; Li, L; Li, Y  | High-throughput model-building and screening of zeolitic imidazolate frameworks for CO <sub>2</sub> capture from flue gas | ELSEVIER SCIENCE INC  | 1001-8417   | CHINESE CHEM LETT            | JAN                       | 2020                     |
| 0,954155913                    | 302              | Wu, JY; Zhu, XC; Yang, F; Ge, TS; Wang, RZ                            | Easily-synthesized and low-cost amine-functionalized silica sol-coated structured adsorbents for CO <sub>2</sub> capture  | ELSEVIER SCIENCE SA   | 1385-8947   | CHEM ENG J                   | DEC 1                     | 2021                     |
| 0,953975497                    | 303              | Chen, J; Yang, J; Hu, GS; Hu, X; Li, ZM; Shen, SW; Radosz, M; Fan, MH | Enhanced CO <sub>2</sub> Capture Capacity of Nitrogen-Doped Biomass-Derived Porous Carbons                                | AMER CHEMICAL SOC     | 2168-0485   | ACS SUSTAIN CHEM ENG         | MAR                       | 2016                     |
| 0,953799731                    | 304              | Zhai, YX; Chuang, SSC   | The Nature of Adsorbed Carbon Dioxide on Immobilized Amines during Carbon Dioxide Capture from Air and Simulated Flue Gas | WILEY-VCH VERLAG GMBH | 2194-4288   | ENERGY TECHNOL-GER           | MAR                       | 2017                     |
| 0,953607538                    | 305              | Riboldi, L; Bolland, O  | Comprehensive analysis on the performance of an IGCC plant with a PSA process integrated for CO <sub>2</sub> capture      | ELSEVIER SCI LTD      | 1750-5836   | INT J GREENH GAS CON         | DEC                       | 2015                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>                        | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|--|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,953517898                    | 306              | Choma, J;<br>Stachurska, K;<br>Jaroniec, M                                  | Adsorption Selectivity of CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> on Nanoporous Active Carbons   | POLISH<br>SANITARY<br>ENGINEERS<br>ASSOC | 1230-<br>6169 | OCHR SR                      |                           | 2016                     |
| 0,953376433                    | 307              | Zhao, L;<br>Riensch, E;<br>Blum, L; Stolten,<br>D                           | Multi-stage gas separation membrane processes used in post-combustion capture: Energetic and economic analyses                            | ELSEVIER                                 | 0376-<br>7388 | J MEMBRANE<br>SCI            | SEP 1                     | 2010                     |
| 0,95312716                     | 308              | Sun, WQ; Shao,<br>YX; Zhao, L;<br>Wang, Q                                   | Co-removal of CO <sub>2</sub> and particulate matter from industrial flue gas by connecting an ammonia scrubber and a granular bed filter | ELSEVIER SCI<br>LTD                      | 0959-<br>6526 | J CLEAN PROD                 | JUN 1                     | 2020                     |
| 0,952816704                    | 309              | Jiang, CX;<br>Zhang, YL; Feng,<br>HY; Wang, QY;<br>Wang, YM; Xu,<br>TW      | Simultaneous CO <sub>2</sub> capture and amino acid production using bipolar membrane electro dialysis (BMED)                             | ELSEVIER<br>SCIENCE BV                   | 0376-<br>7388 | J MEMBRANE<br>SCI            | NOV 15                    | 2017                     |
| 0,95272547                     | 310              | Li, XS; Huang,<br>Q; Luo, C; Zhou,<br>D; Xu, YQ;<br>Zhang, LQ;<br>Zheng, CG | Effect of Acid Gases on Elemental Mercury Removal in an Oxy-fuel CO <sub>2</sub> Compression Process                                      | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC                  | 0887-<br>0624 | ENERG FUEL                   | APR                       | 2018                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,952557061                    | 311              | Rastegar, Z;<br>Ghaemi, A   | CO <sub>2</sub> absorption into potassium hydroxide aqueous solution: experimental and modeling   | SPRINGER                      | 0947-7411   | HEAT MASS TRANSFER           | MAR                       | 2022                     |
| 0,952504077                    | 312              | Liang, YZ; Chen, W; Luo, XL; Chen, JY; Yang, Z; Chen, Y                 | Multi-objective optimization of supercritical CO <sub>2</sub> Brayton cycles for coal-fired power generation with two waste heat recovery schemes       | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0196-8904   | ENERG CONVERS MANAGE         | JAN 15                    | 2024                     |
| 0,952498649                    | 313              | Bai, YG; Wang, KX; Wang, LL; Zeng, SJ; Bai, L; Zhang, XP                | Experimental investigation on post-combustion CO <sub>2</sub> capture for [Bpy][NO <sub>3</sub> ] and MEA aqueous blends with lower regeneration energy | ELSEVIER                      | 1383-5866   | SEP PURIF TECHNOL            | DEC 15                    | 2023                     |
| 0,952483173                    | 314              | Belaissaoui, B; Favre, E  | Membrane Separation Processes for Post-Combustion Carbon Dioxide Capture: State of the Art and Critical Overview  | EDP SCIENCES S A              | 1294-4475   | OIL GAS SCI TECHNOL          | NOV-DEC                   | 2014                     |
| 0,952355392                    | 315              | Zhao, ZN; Ma, CD; Chen, FY; Xu, GZ; Pang, RX; Qian, XY; Shao, JW; Hu, X | Water caltrop shell-derived nitrogen-doped porous carbons with high CO <sub>2</sub> adsorption capacity   | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0961-9534   | BIOMASS BIOENERG             | FEB                       | 2021                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador            | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-----------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,952109201             | 316       | Lee, MG; Kang, D; Jo, H; Park, J  | Carbon dioxide utilization with carbonation using industrial waste-desulfurization gypsum and waste concrete   | SPRINGER              | 1438-4957 | J MATER CYCLES WASTE  | JUL                | 2016              |
| 0,951938323             | 317       | Duan, YH; Luebke, DR; Pennline, HW; Li, BY; Janik, MJ; Halley, JW                 | Ab Initio Thermodynamic Study of the CO <sub>2</sub> Capture Properties of Potassium Carbonate Sesquihydrate, K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> •1.5 H <sub>2</sub> O   | AMER CHEMICAL SOC     | 1932-7447 | J PHYS CHEM C         | JUL 12             | 2012              |
| 0,951556791             | 318       | Meng, W; Zeng, YF; Liang, ZB; Guo, WH; Zhi, CX; Wu, YX; Zhong, RQ; Qu, C; Zou, RQ | Tuning Expanded Pores in Metal-Organic Frameworks for Selective Capture and Catalytic Conversion of Carbon Dioxide   | WILEY-VCH VERLAG GMBH | 1864-5631 | CHEMSUSCHEM           | NOV 9              | 2018              |
| 0,951435281             | 319       | Gao, JB; Hoshino, Y; Inoue, G   | Honeycomb-carbon-fiber-supported amine-containing nanogel particles for CO <sub>2</sub> capture using a rotating column TVSA   | ELSEVIER SCIENCE SA   | 1385-8947 | CHEM ENG J            | MAR 1              | 2020              |
| 0,951291288             | 320       | Das, A; Southon, PD; Zhao, M; Kepert, CJ; Harris, AT; D'Alessandro, DM            | Carbon dioxide adsorption by physisorption and chemisorption interactions in piperazine-grafted Ni <sub>2</sub> (dobdc) (dobdc=1,4-dioxido-2,5-benzenedicarboxylate) | ROYAL SOC CHEMISTRY   | 1477-9226 | DALTON T              |                    | 2012              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores   | Título do artigo   | Publicador        | ISSN      | Abreviação da revista | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|---|--|-------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| 0,950945715             | 321       | Tao, ZY; Tian, YM; Hanif, A; Chan, VN; Gu, QF; Shang, J                                     | Metal cation-exchanged LTA zeolites for CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> separation: The roles of gas-framework and gas-cation interactions | ELSEVIER          | 2772-6568 | CARBON CAPTURE SCI T  | SEP                | 2023              |
| 0,950826852             | 322       | García, EJ; Pérez-Pellitero, J; Pirngruber, GD; Jallut, C; Palomino, M; Rey, F; Valencia, S | Tuning the Adsorption Properties of Zeolites as Adsorbents for CO <sub>2</sub> Separation: Best Compromise between the Working Capacity and Selectivity                          | AMER CHEMICAL SOC | 0888-5885 | IND ENG CHEM RES      | JUN 11             | 2014              |
| 0,950721108             | 323       | Sarfraz, M; Ba-Shammakh, M  | Pursuit of efficient CO <sub>2</sub> -capture membranes: graphene oxide- and MOF-integrated Ultrason® membranes  | SPRINGER          | 0170-0839 | POLYM BULL            | NOV                | 2018              |
| 0,950655961             | 324       | AlQahtani, MS; Wang, XX; Song, CS   | Regenerable solid molecular basket sorbents for selective SO <sub>2</sub> capture from CO <sub>2</sub> -rich gas streams   | ELSEVIER          | 0920-5861 | CATAL TODAY           | JUL 1              | 2021              |
| 0,950535536             | 325       | Shi, S; Liu, YX   | Nitrogen-doped activated carbons derived from microalgae pyrolysis by-products by microwave/KOH activation for CO <sub>2</sub> adsorption  | ELSEVIER SCI LTD  | 0016-2361 | FUEL                  | DEC 15             | 2021              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador              | ISSN          | Abreviação da revista   | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|-------------------------|---------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,950508809             | 326       | Greer, AJ;<br>Taylor, SFR;<br>Daly, H; Quesne,<br>M; Catlow, CRA;<br>Jacquemin, J;<br>Hardacre, C                | Investigating the Effect of<br>NO on the Capture of CO <sub>2</sub><br>Using Superbase Ionic<br>Liquids for Flue Gas<br>Applications | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC | 2168-<br>0485 | ACS SUSTAIN<br>CHEM ENG | FEB 4              | 2019              |
| 0,95035691              | 327       | Jo, S; Lee, JH;<br>Woo, JH; Kim,<br>TY; Ryu, HJ;<br>Hwang, B; Kim,<br>JC; Lee, SC;<br>Gilliard-<br>AbdulAziz, KL | Coke-promoted Ni/CaO<br>catal-sorbents in the<br>production of cyclic CO<br>and syngas   | ROYAL SOC<br>CHEMISTRY  | 2398-<br>4902 | SUSTAIN<br>ENERG FUELS  | DEC 21             | 2021              |
| 0,950202611             | 328       | Anastasiou, S;<br>Bhoria, N;<br>Pokhrel, J;<br>Reddy, KSK;<br>Srinivasakannan,<br>C; Wang, K;<br>Karanikolos, GN | Metal-organic<br>framework/graphene oxide<br>composite fillers in mixed-<br>matrix membranes for CO <sub>2</sub><br>separation       | ELSEVIER<br>SCIENCE SA  | 0254-<br>0584 | MATER CHEM<br>PHYS      | JUN 15             | 2018              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador                | ISSN          | Abreviação da revista   | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|---------------------------|---------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,950202325             | 329       | Jovanovic, RD;<br>Strug, K;<br>Swiatkowski, B;<br>Kakietek, S;<br>Jagiello, K;<br>Cvetinovic, DB               | EXPERIMENTAL AND<br>NUMERICAL<br>INVESTIGATION OF<br>FLAME<br>CHARACTERISTICS<br>DURING SWIRL<br>BURNER OPERATION<br>UNDER<br>CONVENTIONAL AND<br>OXY-FUEL CONDITIONS                                  | VINCA INST<br>NUCLEAR SCI | 0354-<br>9836 | THERM SCI               |                    | 2017              |
| 0,95012795              | 330       | Kong, Y; Shen,<br>XD; Cui, S; Fan,<br>MH   | Facile synthesis of an amine<br>hybrid aerogel with high<br>adsorption efficiency and<br>regenerability for air<br>capture via a solvothermal-<br>assisted sol-gel process and<br>supercritical drying | ROYAL SOC<br>CHEMISTRY    | 1463-<br>9262 | GREEN CHEM              |                    | 2015              |
| 0,949995017             | 331       | Shen, Y; Liu, F;<br>Wang, XY; Shao,<br>PJ; He, Z; Zhang,<br>SH; Chen, L; Li,<br>SJ; Li, W; Wang,<br>LD; Hou, Y | A pore matching amine-<br>functionalized strategy for<br>efficient CO <sub>2</sub> physisorption<br>with low energy penalty  | ELSEVIER<br>SCIENCE SA    | 1385-<br>8947 | CHEM ENG J              | MAR 15             | 2022              |
| 0,949611724             | 332       | Gao, P; Zheng,<br>M; Li, K; Wang,<br>H; Wang, JQ;<br>Bao, GR; Wang,<br>LL                                      | Characteristics of nitrogen<br>oxide emissions from<br>combustion synthesis of a<br>CuO oxygen carrier   | ELSEVIER                  | 0378-<br>3820 | FUEL PROCESS<br>TECHNOL | AUG                | 2022              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>             | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,949448071                    | 333              | Lee, SC; Kwon, YM; Jung, SY; Lee, JB; Ryu, CK; Kim, JC  | Excellent thermal stability of potassium-based sorbent using ZrO <sub>2</sub> for post combustion CO <sub>2</sub> capture  | ELSEVIER SCI LTD              | 0016-2361   | FUEL                         | JAN                       | 2014                     |
| 0,949439982                    | 334              | Wang, CR; Li, X; Liu, SY; Wang, TT; Liu, PX; Song, XW; Liang, ZQ  | Ultrafast synthesis of SAPO-17 zeolites with excellent CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> separation performance               | ROYAL SOC CHEMISTRY           | 2052-1553   | INORG CHEM FRONT             | JUL 25                    | 2023                     |
| 0,949429382                    | 335              | Feng, LJ; Zhai, RR; Zhao, YX; Qian, ZH; Wei, Q  | Integrated optimization of coal-fired power plant and CO <sub>2</sub> capture system coupled with membrane condenser for recovering flue gas hydrothermal energy | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD | 0196-8904   | ENERG CONVERS MANAGE         | FEB 15                    | 2023                     |
| 0,949240002                    | 336              | Limb, BJ; Markey, E; Vercellino, R; Garland, S; Pisciotta, M; Psarras, P; Herber, DR; Bandhauer, T; Quinn, JC | Economic viability of using thermal energy storage for flexible carbon capture on natural gas power plants   | ELSEVIER                      | 2352-152X   | J ENERGY STORAGE             | NOV 30                    | 2022                     |
| 0,94870969                     | 337              | Bai, J; Zhen, X; Yan, KL; Li, P; Fang, SQ; Chang, C   | The effect of additive molecular diameters on the hydrate-based CO <sub>2</sub> capture from simulated biogas  | ELSEVIER SCI LTD              | 0016-2361   | FUEL                         | OCT 15                    | 2020                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>                    | <b>ISSN</b>   | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|--------------------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,948403165                    | 338              | Wollschläger, N;<br>Nofz, M; Dörfel,<br>I; Schulz, W;<br>Sojref, R;<br>Kranzmann, A | Exposition of sol-gel alumina-coated P92 steel to flue gas: Time-resolved microstructure evolution, defect tolerance, and repairing of the coating | WILEY-VCH<br>VERLAG GMBH             | 0947-<br>5117 | MATER<br>CORROS              | APR                       | 2018                     |
| 0,947992956                    | 339              | Ren, SH; Hou,<br>YC; Tian, SD;<br>Chen, XM; Wu,<br>WZ                               | What Are Functional Ionic Liquids for the Absorption of Acidic Gases?  | AMER<br>CHEMICAL<br>SOC              | 1520-<br>6106 | J PHYS CHEM B                | FEB 28                    | 2013                     |
| 0,947628278                    | 340              | Herslund, PJ;<br>Thomsen, K;<br>Abildskov, J; von<br>Solms, N                       | Modelling of tetrahydrofuran promoted gas hydrate systems for carbon dioxide capture processes   | ELSEVIER<br>SCIENCE BV               | 0378-<br>3812 | FLUID PHASE<br>EQUILIBR      | AUG 15                    | 2014                     |
| 0,947166724                    | 341              | Tageldin, A;<br>Ismail, R; Sardar,<br>A; Saad, MAH;<br>Benamor, A                   | Synthesis and evaluation of novel and efficient Ni-based dual functional materials (DFMs) for integrated CO <sub>2</sub> capture and hydrogenation | ELSEVIER                             | 0263-<br>8762 | CHEM ENG RES<br>DES          | SEP                       | 2023                     |
| 0,947098532                    | 342              | Lee, S; Yun, S;<br>Kim, JK  | Development of novel sub-ambient membrane systems for energy-efficient post-combustion CO <sub>2</sub> capture                                     | ELSEVIER SCI<br>LTD                  | 0306-<br>2619 | APPL ENERG                   | MAR 15                    | 2019                     |
| 0,947048245                    | 343              | Rexed, I;<br>Lagergren, C;<br>Lindbergh, G  | Effect of sulfur contaminants on MCFC performance  | PERGAMON-<br>ELSEVIER<br>SCIENCE LTD | 0360-<br>3199 | INT J<br>HYDROGEN<br>ENERG   | AUG 4                     | 2014                     |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo  | Publicador          | ISSN      | Abreviação da revista  | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|---|---------------------|-----------|------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,946752232             | 344       | Wang, S; Long, QH; Shen, SF  | Regulating phase change behaviors of water-lean absorbents containing potassium proline and 2-butoxyethanol for CO <sub>2</sub> capture: Effect of water content    | ELSEVIER            | 1383-5866 | SEP PURIF TECHNOL      | NOV 15             | 2022              |
| 0,946721451             | 345       | Meng, Y; Yan, YX; Wu, XY; Sharmin, N; Zhao, HT; Lester, E; Wu, T; Pang, CH | Synthesis and functionalization of cauliflower-like mesoporous siliceous foam materials from oil shale waste for post-combustion carbon capture                     | ELSEVIER SCI LTD    | 2212-9820 | J CO <sub>2</sub> UTIL | SEP                | 2020              |
| 0,946463218             | 346       | Liu, XM; Liao, CZ; Lin, L; Gao, HQ; Zhou, J; Feng, Z; Lin, Z               | Research progress in the environmental application of magnesium hydroxide nanomaterials   | ELSEVIER            | 2468-0230 | SURF INTERFACES        | DEC                | 2020              |
| 0,946411528             | 347       | Wang, ZR; Liu, WH; Tang, ZF; Xu, Q   | In situ Raman and XRD study of CO <sub>2</sub> sorption and desorption in air by a Na <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> hybrid sorbent | ROYAL SOC CHEMISTRY | 1463-9076 | PHYS CHEM CHEM PHYS    | DEC 14             | 2020              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador       | ISSN      | Abreviação da revista  | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|------------------|-----------|------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,946364579             | 348       | Batuecas, E;<br>Liendo, F;<br>Tommasi, T;<br>Bensaid, S;<br>Deorsola, FA;<br>Fino, D | Recycling CO <sub>2</sub> from flue gas for CaCO <sub>3</sub> nanoparticles production as cement filler: A Life Cycle Assessment                                     | ELSEVIER SCI LTD | 2212-9820 | J CO <sub>2</sub> UTIL | MAR                | 2021              |
| 0,946353196             | 349       | Wu, X; Shen, J;<br>Li, YG; Wang, MH; Lawal, A  | Flexible operation of post-combustion solvent-based carbon capture for coalfired power plants using multi-model predictive control: A simulation study               | ELSEVIER SCI LTD | 0016-2361 | FUEL                   | MAY 15             | 2018              |
| 0,946292565             | 350       | Yin, CG;<br>Rosendahl, LA;<br>Kær, SK  | Chemistry and radiation in oxy-fuel combustion: A computational fluid dynamics modeling study  | ELSEVIER SCI LTD | 0016-2361 | FUEL                   | JUL                | 2011              |
| 0,946217703             | 351       | Yassin, MM;<br>Anderson, JA;<br>Dimitrakis, GA;<br>Martín, CF                        | Effects of the heating source on the regeneration performance of different adsorbents under post-combustion carbon capture cyclic operations. A comparative analysis | ELSEVIER         | 1383-5866 | SEP PURIF TECHNOL      | DEC 1              | 2021              |
| 0,946171269             | 352       | Lee, SC; Kwon, YM; Chae, HJ;<br>Jung, SY; Lee, JB; Ryu, CK; Yi, CK; Kim, JC          | Improving regeneration properties of potassium-based alumina sorbents for carbon dioxide capture from flue gas   | ELSEVIER SCI LTD | 0016-2361 | FUEL                   | FEB                | 2013              |

| Classificação Aleatória | Ordenação | Autores  | Título do artigo   | Publicador          | ISSN      | Abreviação da revista  | Data da publicação | Ano da publicação |
|-------------------------|-----------|--|--|---------------------|-----------|------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,946077652             | 353       | Shao, LY; Liu, C; Wang, YF; Yang, ZD; Wu, ZC; Xu, F; Zhang, Y; Ni, Y; Zheng, CH; Gao, X                                | Preventing Aerosol Emissions in a CO <sub>2</sub> Capture System: Combining Aerosol Formation Inhibition and Wet Electrostatic Precipitation                                       | AMER CHEMICAL SOC   | 0013-936X | ENVIRON SCI TECHNOL    | NOV 22             | 2022              |
| 0,945856627             | 354       | Du, Y; Fu, CQ; Gong, BG; Miao, ED; Zheng, XF; Xiong, Z; Zhao, YC; Zhang, JY  | Real-time investigation of the CO <sub>2</sub> mineral carbonation reaction rate through direct aqueous route using semi-dry desulfurization slag                                  | ELSEVIER SCI LTD    | 2212-9820 | J CO <sub>2</sub> UTIL | SEP                | 2021              |
| 0,945517215             | 355       | Izquierdo, MT; de las Obras-Loscertales, M; de Diego, LF; Garcia-Labiano, F; Mendiara, T; Abad, A; Gayán, P; Adánez, J | Mercury emissions from coal combustion in fluidized beds under oxy-fuel and air conditions: Influence of coal characteristics and O <sub>2</sub> concentration                     | ELSEVIER SCIENCE BV | 0378-3820 | FUEL PROCESS TECHNOL   | DEC 1              | 2017              |
| 0,945397371             | 356       | Bao, SJ; Krishna, R; He, YB; Qin, JS; Su, ZM; Li, SL; Xie, W; Du, DY; He, WW; Zhang, SR; Lan, YQ                       | A stable metal-organic framework with suitable pore sizes and rich uncoordinated nitrogen atoms on the internal surface of micropores for highly efficient CO <sub>2</sub> capture | ROYAL SOC CHEMISTRY | 2050-7488 | J MATER CHEM A         |                    | 2015              |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>  | <b>Publicador</b>                   | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|--|-------------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,945341908                    | 357              | Yan, YA; Gao, YJ; Tang, WJ; Li, Q; Zhang, JB                              | Characterization of high-alumina coal fly ash based silicate material and its adsorption performance to CO <sub>2</sub>          | KOREAN INSTITUTE CHEMICAL ENGINEERS | 0256-1115   | KOREAN J CHEM ENG            | APR                       | 2016                     |
| 0,945220557                    | 358              | Zhang, WH; Jia, WS; Qin, J; Chen, L; Ran, YY; Krishna, R; Wang, L; Luo, F | Efficient Separation of Trace SO <sub>2</sub> from SO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> Mixtures in a Th-Based MOF | AMER CHEMICAL SOC                   | 0020-1669   | INORG CHEM                   | AUG 1                     | 2022                     |
| 0,945037999                    | 359              | Manyà, JJ; García-Morcate, D; González, B                                 | Adsorption Performance of Physically Activated Biochars for Postcombustion CO <sub>2</sub> Capture from Dry and Humid Flue Gas   | MDPI                                |             | APPL SCI-BASEL               | JAN                       | 2020                     |
| 0,944963051                    | 360              | Walters, MS; Edgar, TF; Rochelle, GT                                      | Dynamic modeling and control of an intercooled absorber for post-combustion CO <sub>2</sub> capture                              | ELSEVIER SCIENCE SA                 | 0255-2701   | CHEM ENG PROCESS             | SEP                       | 2016                     |
| 0,944850386                    | 361              | Zhang, QY; Liu, YX; Cao, YH; Li, ZY; Hou, JC; Gou, X                      | Parametric study and optimization of MEA-based carbon capture for a coal and biomass co-firing power plant                       | PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD       | 0960-1481   | RENEW ENERG                  | MAR                       | 2023                     |

| <b>Classificação Aleatória</b> | <b>Ordenação</b> | <b>Autores</b>  | <b>Título do artigo</b>   | <b>Publicador</b> | <b>ISSN</b> | <b>Abreviação da revista</b> | <b>Data da publicação</b> | <b>Ano da publicação</b> |
|--------------------------------|------------------|---|---|-------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0,944747325                    | 362              | Wang, HC; Lu, CS; Bai, HL; Hwang, JF; Lee, HH; Chen, W; Kang, YH; Chen, ST; Su, FS; Kuo, SC; Hu, FC | Pilot-scale production of mesoporous silica-based adsorbent for CO <sub>2</sub> capture | ELSEVIER          | 0169-4332   | APPL SURF SCI                | JUL 1                     | 2012                     |

