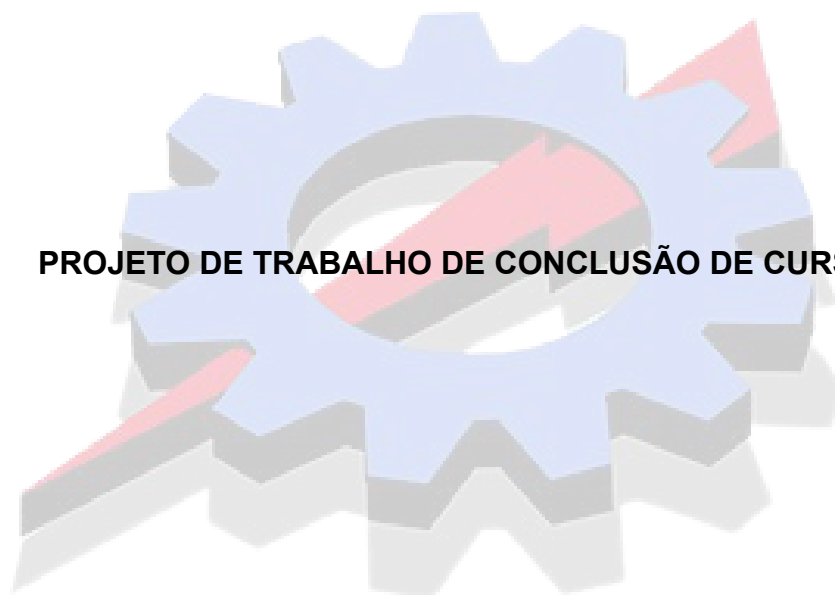


ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL FREDERICO GUILHERME SCHMIDT

TÉCNICO EM ELETROTÉCNICA



PROJETO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO TÉCNICO

**ECOCAPTURE - COLETOR COMPACTO AUTOSSUFICIENTE DE GÁS
CARBÔNICO EM CONDIÇÕES AMBIENTES**

**GABRIEL DA SILVA
JÚLIA DE OLIVEIRA
MARIA LUISA MACEDO**

**SÃO LEOPOLDO
2025**

GABRIEL DA SILVA
JÚLIA DE OLIVEIRA
MARIA LUISA MACEDO

**ECOCAPTURE - COLETOR COMPACTO AUTOSSUFICIENTE DE GÁS
CARBÔNICO EM CONDIÇÕES AMBIENTES**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso Técnico apresentado ao Curso de Eletrotécnica da Escola Técnica Estadual Frederico Guilherme Schmidt como requisito para aprovação nas disciplinas do curso sob orientação do professor Marcos Rogério dos Santos Barbosa e coorientação da professora Paula Madeira.

SÃO LEOPOLDO
2025

RESUMO

As crescentes emissões diárias de dióxido de carbono na atmosfera, ou emissão de gases de efeito-estufa, têm sido uma das principais responsáveis pelas catástrofes climáticas. Com a progressiva preocupação em relação ao efeito estufa e mudanças climáticas, o desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de carbono economicamente viáveis se mostra importante. Ademais, métodos atuais de captura de CO₂ podem ser caros e poluentes, como ocorre em processos químicos. Nesse contexto, se vê útil a utilização de zeólitas, combinada à energia solar, uma fonte limpa e renovável, de modo a oferecer um dispositivo de captura de CO₂ que não dependa de fontes de energia não renováveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental. Dessa forma, o presente estudo visa projetar um dispositivo capaz de capturar CO₂ a partir de um fluxo de ar gerado por um microventilador, além de ser alimentado por um módulo fotovoltaico, sendo assim, autossuficiente. Para alcançar esses objetivos, foi escolhida a forma de pesquisa quali-quantitativa explicativa, com a análise de artigos relacionados às emissões de gases de efeito estufa, assim como a pesquisa do tipo de filtro mais adequado ao projeto, considerando fatores como capacidade de adsorção, regeneração e condições requisitadas para a ocorrência da coleta. Além disso, foram efetuados experimentos e recolhimento de dados acerca das capacidades adsorventes das zeólitas 13X, material escolhido para filtrar e coletar CO₂, apresentando um aumento de 3,3g na massa da amostra, que possuía um valor inicial de 102,4g após um intervalo de 260 minutos de exposição a um fluxo de ar. Com base nisso, foi desenvolvido um protótipo do dispositivo, que integra o filtro poroso com a alimentação por energia solar de forma promissora, compacta e em condições ambientes. Em resumo, o desenvolvimento de um filtro autossustentável para a captura de CO₂, utilizando desses minerais como elemento filtrante, mostrou-se uma abordagem promissora para a redução das emissões de CO₂, combinando eficiência, sustentabilidade e viabilidade econômica.

Palavras-chave: zeólitas; carbono; adsorção; filtro; autossuficiente.

ABSTRACT

The increasing daily emissions of carbon dioxide into the atmosphere, or greenhouse gas emissions, have been one of the main factors responsible for climate catastrophes. With the growing concern regarding the greenhouse effect and climate change, the development of economically viable carbon capture and storage technologies becomes important. Moreover, current CO₂ capture methods can be expensive and polluting, as occurs in chemical processes. In this context, the use of zeolites combined with solar energy, a clean and renewable source, is seen as useful in offering a CO₂ capture device that does not depend on non-renewable energy sources, contributing to the reduction of environmental impact. Thus, the present study aims to design a device capable of capturing CO₂ from an air flow generated by a micro fan, in addition to being powered by a photovoltaic module, thus being self-sufficient. To achieve these objectives, a qualitative-quantitative explanatory research approach was chosen, with the analysis of articles related to greenhouse gas emissions, as well as research on the most suitable filter type for the project, considering factors such as adsorption capacity, regeneration, and required conditions for collection to occur. In addition, experiments and data collection were carried out regarding the adsorptive capacities of zeolite 13X, the material chosen to filter and collect CO₂, showing an increase of 3.3g in the sample mass, which had an initial value of 102.4g after an exposure interval of 260 minutes to an airflow. Based on this, a prototype of the device was developed, which integrates the porous filter with solar energy supply in a promising, compact way and under ambient conditions. In summary, the development of a self-sustaining filter for CO₂ capture, using these minerals as the filtering element, proved to be a promising approach for reducing CO₂ emissions, combining efficiency, sustainability, and economic feasibility.

Keywords: zeolites; carbon; adsorption; filter; self-sufficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento do Efeito Estufa	19
Figura 2 – Estrutura molecular do óxido nitroso (N ₂ O)	20
Figura 3 – Estrutura molecular do metano (CH ₄)	21
Figura 4 – Estrutura molecular do dióxido de carbono (CO ₂)	22
Figura 5 – Tabela de potencial de aquecimento global	23
Figura 6 – Distribuição das emissões mundiais por setor (%)	25
Figura 7 – Emissões de CO ₂ no transporte em 40 países	26
Figura 8 – Emissões do setor de energia em 2019 com destaque para a atividade de transportes	26
Figura 9 – Emissões globais de CO ₂ na indústria	27
Figura 10 – Emissões de CO ₂ pelo desmatamento para produção de alimentos em alguns países	28
Figura 11 – Emissões anuais pelo desmatamento por produto agrícola no Brasil	29
Figura 12 – Ilustração do funcionamento de um NDIR	30
Figura 13 – Diferença entre o efeito estufa e sua intensificação	33
Figura 14 – Gráfico da evolução da temperatura da superfície terrestre ao longo dos anos	34
Figura 15 – Extensão mínima do gelo marinho no ártico durante o verão e em comparação com épocas anteriores	35
Figura 16 – Comparação entre alguns fatores e a quantidade de mortes que ocasionam	36
Figura 17 – Temperatura média global por ano, comparada com a média pré-industrial	37
Figura 18 – Emissões, em toneladas, de gases de efeito estufa por ano no mundo	38
Figura 19 – Emissões, em toneladas, de gases de efeito estufa por ano no Brasil	38
Figura 20 – Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento	39
Figura 21 – Conferência das Nações Unidas sobre mudanças climáticas de 2015 em Paris, convenção onde o acordo de Paris foi criado	41
Figura 22 – Mercado de carbono	42

Figura 23 – Catalisador usado em automóveis	43
Figura 24 – Filtro de mangas	44
Figura 25 – Adsorção em minerais porosos	45
Figura 26 – Estrutura molecular de uma zeólita	46
Figura 27 – Estrutura cristalina de uma zeólita	47
Figura 28 – Adsorção por variação de pressão	49
Figura 29 – Adsorção por variação elétrica	50
Figura 30 – Zeólita natural (chabazita)	51
Figura 31 – Zeólita sintética (5A)	52
Figura 32 - Bateria Selada 6VCC 12Ah UNIPOWER UP6120	52
Figura 33 - Botão de pulso Modelo 36.127	53
Figura 34 - Conector de Bateria Faston	53
Figura 35 - Controlador de carga solar PWM 10A	54
Figura 36 - Microventilador 120mm x 120mm	54
Figura 37 - Painel Fotovoltaico 18VCC 10W	55
Figura 38 - Módulo Temporizador Digital Programável	55
Figura 39 – Peneira Molecular 13X	56
Figura 40 – Estrutura do experimento	57
Figura 41 – Funcionamento do experimento	58
Figura 42 - Amostra de zeólita 13X com fenolftaleína	59
Figura 43 – Estrutura montada para a realização do experimento	61
Figura 44 – Segunda estrutura utilizada no teste	61
Figura 45 – Zeólitas em uma vasilha posicionada sobre uma balança, demarcando 105,4g	62
Figura 46 – Zeólitas com a mesma cor, mesmo após terem passado por um teste com fenolftaleína	64
Figura 47 – Tabela dos resultados obtidos no experimento de dessorção	65
Figura 48 – Gráfico dos resultados obtidos no experimento de dessorção	65
Figura 49 – Esquema elétrico	68
Figura 50 - Ligação das baterias	69
Figura 51 - Ligação do módulo fotovoltaico	70
Figura 52 - Ligação do módulo temporizador	70

Figura 53 - Ligação do microventilador	71
Figura 54 - Esquema de ligação do módulo temporizador	72
Figura 55 - Primeiro teste de ligação	78
Figura 56 - Teste de ligação com adição do módulo temporizador	79
Figura 57 - Teste de ligação com adição do botão	79
Figura 58 - Teste de adsorção com filtro improvisado	80
Figura 59 - Tabela do teste de adsorção	81
Figura 60 - Modelo 3D sem filtro	81
Figura 61 - Vista frontal do modelo 3D	82
Figura 62 - Vista frontal com visão para o acoplamento do microventilador no modelo	82
Figura 63 - Vista frontal com visão interna do modelo 3D	82
Figura 64 - Vista superior com topo, demonstrando o posicionamento do módulo	83
Figura 65 - Vista superior sem topo do modelo 3D	83
Figura 66 - Vista lateral esquerda do espaço para componentes do modelo 3D	83
Figura 67 - Vista superior com acesso ao compartimento de componentes no modelo 3D	84
Figura 68 - Montagem da estrutura	84
Figura 69 - Protótipo na XIII IFCITEC	85
Figura 70 - Estrutura do processo de adsorção sem o filtro	86
Figura 71 - Processo de dessorção	86
Figura 72 - Vista superior do processo de adsorção	87
Figura 73 - Tabela de resultados do teste de adsorção com o protótipo	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado da Arte	16
Tabela 2 – Quando utilizar cada unidade de quantificação de CO2	30
Tabela 3 – Cronograma de 2024	73
Tabela 4 – Cronograma de 2025	74
Tabela 5 – Recursos	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CaCO ₃	Calcário
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
ESA	Adsorção por Variação Elétrica
GEE	Gases de Efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LED	Diodo Emissor de Luz
MOF	Estrutura Orgânica Metálica
N ₂ O	Óxido Nitroso
NDIR	Espectroscopia Não Dispersiva em Infravermelho
ONU	Organização das Nações Unidas
PPM	Partes Por Milhão
PSA	Adsorção por Variação de Pressão
PWM	Modulação por Largura de Pulso
TSA	Adsorção por Variação de Temperatura
VPSA	Adsorção por Variação de Pressão a Vácuo

LISTA DE SÍMBOLOS

A – ampére

Ah – ampére-hora

V – volt

VCC – tensão de corrente contínua

W – watt

g - gramas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA E SUA DELIMITAÇÃO	14
1.2 PROBLEMA	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 JUSTIFICATIVA	15
2 ESTADO DA ARTE	16
2.1 CO-REMOVAL OF CO ₂ AND PARTICULATE MATTER FROM INDUSTRIAL FLUE GAS BY CONNECTING AN AMMONIA SCRUBBER AND A GRANULAR BED FILTER	17
2.2 UTILIZAÇÃO DE ZEÓLITAS COMO ADSORVENTES PARA A REMOÇÃO DE CO ₂ : UMA REVISÃO DA LITERATURA	17
2.3 SOIL AND WATER CONSERVATION IN KENYA; PRACTICES, CHALLENGES AND PROSPECTS	17
2.4 PARTICIPAÇÃO DE BRIÓFITAS NA REDUÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA	18
2.5 ECOCAPTURE - COLETOR COMPACTO AUTOSSUFICIENTE DE GÁS CARBÔNICO EM CONDIÇÕES AMBIENTES	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 EFEITO ESTUFA	19
3.2 GASES DE EFEITO ESTUFA	20
3.2.1 Óxido Nitroso	20
3.2.2 Metano	21
3.2.3 Dióxido de Carbono	22
3.2.4 Quantificação	23
3.3 DIÓXIDO DE CARBONO COMO O PRINCIPAL GÁS DE EFEITO ESTUFA	24
3.3.1 Emissões	25
3.3.1.1 Geração de energia e transporte	26
3.3.1.2 Indústria	27
3.3.1.3 Uso e ocupação do solo	28
3.3.1.4 Agropecuária	29
3.3.2 Formas de medição e quantificação	29
3.3.3 Uso na indústria	31
3.3.3.1 O Processo de Purga	32
3.4 PROBLEMAS DA INTENSIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO	32
3.4.1 Problemas ambientais	33
3.4.2 Problemas de saúde pública	36
3.4.3 Aquecimento global	37
3.5 AÇÕES GOVERNAMENTAIS A FIM DE REDUZIR O PROBLEMA	39
3.5.1 Conferência Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento	39
3.5.2 Protocolo de Kyoto	40
3.5.3 Acordo de Paris	40
3.5.4 Outras medidas tomadas para corte de emissões de dióxido de carbono	42

3.6 FILTROS DE AR INDUSTRIAIS	43
3.7 MINERAIS ADSORVENTES	44
3.7.1 Zeólitas	46
3.7.1.1 Adsorção do CO ₂ nas Zeólitas	47
3.7.1.2 Dessorção do CO ₂ nas Zeólitas	48
3.7.1.2.1 Adsorção Por Variação de Temperatura	48
3.7.1.2.2 Adsorção Por Variação de Pressão	48
3.7.1.2.3 Adsorção Por Variação Elétrica	49
3.7.1.2.4 Armazenamento do CO ₂ após dessorção/Como coletar CO ₂	50
3.7.1.3 Zeólitas Naturais	50
3.7.1.4 Zeólitas Sintéticas	51
3.8 COMPONENTES	52
3.8.1 Bateria	52
3.8.2 Botão de Pulso	53
3.8.3 Conector de Bateria Faston	53
3.8.4 Controlador de Carga	54
3.8.5 Microventilador	54
3.8.6 Módulo fotovoltaico	55
3.8.7 Módulo Temporizador	55
3.8.8 Zeólita 13X	56
4 EXPERIMENTOS ENVOLVENDO O FILTRO	57
4.1 TESTE DE ADSORÇÃO DA ZEÓLITA 13X EM CONDIÇÕES NORMAIS DE CONCENTRAÇÃO DE GÁS CARBÔNICO	57
4.1.1 Materiais	57
4.1.2 Montagem	57
4.1.3 Funcionamento	58
4.1.4 Resultados obtidos	59
4.2 TESTE DE ADSORÇÃO DA ZEÓLITA 13X EM ALTA CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	60
4.2.1 Materiais	60
4.2.2 Montagem	60
4.2.3 Funcionamento	62
4.2.4 Resultados obtidos	63
4.3 TESTE DE DESSORÇÃO DA ZEÓLITA 13X UTILIZANDO AR QUENTE	64
4.3.1 Materiais	64
4.3.2 Montagem	64
4.3.3 Funcionamento	64
4.3.4 Resultados obtidos	64
5 METODOLOGIA	66
5.1 TIPO DE PESQUISA	66
5.2 FUNÇÃO DOS COMPONENTES	66
5.2.1 Bateria	66
5.2.2 Botão de Pulso	67
5.2.3 Conector de Bateria Terminal Faston	67
5.2.4 Controlador de carga	67

5.2.5 Microventilador	67
5.2.6 Módulo Fotovoltaico	67
5.2.7 Módulo Temporizador	68
5.2.8 Zeólitas	68
5.3 ESQUEMA ELÉTRICO	68
5.3.1 Diagrama do circuito	68
5.3.2 Funcionamento	69
5.3.2.1 Ação do controlador de carga solar	69
5.3.2.2 Montagem do controlador de carga solar	69
5.3.2.3 Ação do módulo temporizador	71
5.3.2.4 Montagem do módulo temporizador	71
6 CRONOGRAMA	73
7 RECURSOS	76
8 RESULTADOS	77
8.1 PESQUISA	77
8.2 PROTÓTIPO	77
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas estão se tornando mais comuns, assim como os problemas de saúde respiratórios, a diminuição de biodiversidade, etc. Um exemplo disso são os tornados, que estão mais frequentes em regiões que não os apresentavam, e tudo devido ao fenômeno do efeito estufa e sua intensificação com o passar dos anos, sendo um grande problema que afeta o planeta Terra como um todo, desde sua estrutura até os seres vivos.

Por mais que, à primeira vista, pareça um problema distante e desconexo com a realidade, quando pesquisado é possível descobrir que as mudanças climáticas vêm afetando diretamente as pessoas, como, por exemplo, aumentando a quantidade de esporos de mofo e substâncias químicas no ar, de forma a danificar as vias aéreas e pulmões, e aumentar os indícios de doenças como a asma. Exemplificando, há dias em que, no Japão, pela alta poluição no ar, a população é instruída a fazer a utilização de máscaras pelo bem de sua própria saúde e, com a ampliação da produção de CO₂, essa situação tende a se tornar cada vez mais frequente. Dessa maneira, com o enorme número de alertas vindos de cientistas em suas matérias, algumas pessoas e empresas acabam implementando novos hábitos e, conjuntamente, mudando maus costumes em prol do meio ambiente, prática que deveria ser comum entre todos.

Já em níveis preocupantes, como pode-se ver analisando o alto nível de degelo na antártica, bem como uma pesquisa da Harvard de Pan e Powell (2021), o dano que nós estamos causando na costa continuará por séculos, e assim os problemas ambientais se encaminham para uma fase irreversível. Vale ainda lembrar que a capacidade de existência de vida no planeta é diminuída. Baseando-se nisso, o projeto visa compor um dos ativos na redução do excesso do efeito estufa, causado pelos altos índices de dióxido de carbono na atmosfera, purificando-a e armazenando o gás, para que ele possa ser coletado diretamente do ar, sem a necessidade de um novo processo de produção, e utilizado de forma adequada em diversos meios industriais, com o objetivo de otimização de produção, como em indústrias que trabalham constantemente com gases. Além disso, a construção do dispositivo será de forma sustentável, isto é, feita levando em consideração a conservação do meio ambiente, de acordo com os ideais do projeto.

1.1 TEMA E SUA DELIMITAÇÃO

Filtro coletor de gás carbônico, alimentado por placa fotovoltaica, capaz de coletá-lo e armazená-lo, tornando possível sua reutilização, diminuindo custos e otimizando processos, de modo a possibilitar o uso do gás em diversas indústrias com o intermédio de empresas e processos ideais para tratamento de gases.

1.2 PROBLEMA

Como desenvolver um dispositivo que filtre o ar com o uso de um microventilador, alimentado por uma placa fotovoltaica, de modo que separe e armazene o gás carbônico por meio de reações físicas para sua reutilização em diversas áreas industriais por empresas que já lidam com gases?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo capaz de filtrar o gás carbônico na atmosfera, separá-lo e armazená-lo com o objetivo de possibilitar sua reutilização para empresas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Encontrar um filtro que se adapte com a finalidade do dispositivo;
- Utilizar uma placa fotovoltaica para a alimentação de um microventilador que direcione o ar atmosférico para o filtro;
- Alimentar uma bateria, que permita o funcionamento quando não houver luz solar;
- Armazenar o gás carbônico da atmosfera utilizando o filtro adequado.

1.4 JUSTIFICATIVA

A hipótese do aquecimento global vem se intensificando nas últimas décadas e tem como um dos pilares básicos, além da temperatura média do planeta nos últimos 150 anos e oscilações de clima, o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera terrestre. Em relação aos gases, o possível aumento na temperatura se dá pelo efeito estufa.

O efeito estufa, apesar de ser benéfico para o planeta até certo ponto, apresenta riscos ao equilíbrio da temperatura do planeta quando as concentrações de gases de efeito estufa excedem seus limites. Molion (1995, p. 01), acrescenta:

As previsões de mudanças climáticas em função do aumento de CO₂, feitas através de modelos matemáticos de simulação do clima global (MCG), são catastróficas! Elas sugerem que, dobrando a concentração do CO₂, a temperatura média do Globo aumentaria entre 1,5 e 4,5°C.

Para que o planeta siga saudável, é importante que haja produtores de gás carbônico em equilíbrio com seus filtradores, porém as indústrias têm produzido muito mais gás, aos que as árvores conseguem filtrar. Em meio a um cenário, no qual as fábricas lançam cada vez mais poluentes e a região da Floresta Amazônica, considerada o “pulmão do mundo”, está sendo desmatada dia após dia, as árvores nunca foram tão vitais. De acordo com Fearnside (2002): “As quantidades de gases de efeito estufa liberadas pelo desmatamento são significantes tanto em termos do impacto presente quanto do potencial para contribuição a longo prazo [...]”. Contudo, com o espaço urbano se expandindo e a região rural se tornando cada vez menor, árvores são arrancadas das cidades, por terem raízes grandes demais ou para dar lugar para a construção de prédios e vias.

Em vista disso, o projeto visa auxiliar na captação do gás carbônico de uma forma semelhante à feita pelas árvores, entretanto, é capaz de armazenar e redirecionar o gás através de processos físicos, o tornando útil. Assim, empresas que usam CO₂ em seus processos não precisam fabricá-lo em sua totalidade, basta coletá-lo do ar.

2 ESTADO DA ARTE

De acordo com o projeto, há trabalhos semelhantes como:

Tabela 1 - Estado da Arte

Pesquisa	Autoria	Ano de publicação
CO-REMOVAL OF CO2 AND PARTICULATE MATTER FROM INDUSTRIAL FLUE GAS BY CONNECTING AN AMMONIA SCRUBBER AND A GRANULAR BED FILTER	Wenqiang Sun; Yixin Shao; Liang Zhao; Qiang Wang	2020
UTILIZAÇÃO DE ZEÓLITAS COMO ADSORVENTES PARA A REMOÇÃO DE CO2: UMA REVISÃO DA LITERATURA	Iago Mozer Ferreira	2021
SOIL AND WATER CONSERVATION IN KENYA; PRACTICES, CHALLENGES AND PROSPECTS	Ádám Csorba; Brian Rotich; Erika Micheli	2022
PARTICIPAÇÃO DE BRIÓFITAS NA REDUÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA	Letícia Maria D. Maia; Marcela de A. Lucas; Janara de C. Matos	2024

Fonte: os autores (2025)

2.1 CO-REMOVAL OF CO₂ AND PARTICULATE MATTER FROM INDUSTRIAL FLUE GAS BY CONNECTING AN AMMONIA SCRUBBER AND A GRANULAR BED FILTER

O projeto desenvolve um sistema de remoção conjunta de CO₂ e material particulado, encontrados nos gases diretamente expelidos pelas indústrias, relacionando a absorção química à base de amônia com a adsorção por um filtro de leito poroso, projetando um aparato experimental para testes e avaliação da eficiência geral de cada etapa e, por fim, do sistema inteiro.

2.2 UTILIZAÇÃO DE ZEÓLITAS COMO ADSORVENTES PARA A REMOÇÃO DE CO₂: UMA REVISÃO DA LITERATURA

O artigo de Iago Mozer Ferreira, promove a redução da concentração de dióxido de carbono na atmosfera e estuda sua captura por adsorção utilizando zeólitas como material poroso adsorvente. Além disso, analisa o comportamento dos diferentes tipos de zeólitas no processo de coleta do gás, definindo o de melhor uso. Ele também apresenta as equações para a capacidade de armazenamento de CO₂ em amostras do material.

2.3 SOIL AND WATER CONSERVATION IN KENYA; PRACTICES, CHALLENGES AND PROSPECTS

Tratando-se do excesso de carbono, constata-se que solos hidrofóbicos também são um problema. Isso porque, quando o solo está degradado e incapaz de absorver água, ele conjuntamente perde a maioria de seus organismos, ou seja, o solo se torna infértil e não absorve mais dióxido de carbono. Um solo erodido, conseqüentemente leva a períodos de seca e calor, funcionando como um ciclo: o calor leva a mais problemas ao solo e assim por diante.

Dessa forma, a pesquisa aborda práticas indígenas, utilizadas por comunidades no Quênia, para evitar a erosão do solo, além de como tratá-lo e torná-lo fértil novamente, demonstrando que os problemas ambientais atingem civilizações a ponto de que elas já tenham se mobilizado.

Portanto, o presente TCCT, por igualmente ter o objetivo de contribuir com a saúde do planeta, se faz relevante, principalmente, para pequenas civilizações como as citadas e, diferentemente da pesquisa, o projeto visa realizar a contribuição por meio de um dispositivo.

2.4 PARTICIPAÇÃO DE BRIÓFITAS NA REDUÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA

Sabe-se, desde sempre, que plantas auxiliam nesse processo, visto que praticam a fotossíntese, ou seja, absorvem gás carbônico e liberam o gás oxigênio. Isso é refletido socialmente, por exemplo ao chamarmos a floresta Amazônica de pulmão do mundo. Assim, o artigo demonstra e evidencia o potencial da participação de Briófitas, como musgos para uma exemplificação, na minimização do efeito estufa, visto que além de puxar o CO₂, está presente em grande quantidade, sendo a mais abundante do mundo e representando cerca de 1% da superfície do planeta.

2.5 ECOCAPTURE - COLETOR COMPACTO AUTOSSUFICIENTE DE GÁS CARBÔNICO EM CONDIÇÕES AMBIENTES

O atual projeto difere-se dos demais na construção prática de um dispositivo que utilize, além de autossuficiência em quesito elétrico, das propriedades de adsorção dos materiais porosos, não somente para a filtragem, mas também para a coleta e o armazenamento do gás carbônico, de forma a ser possível direcioná-lo ao meio industrial, principalmente para empresas que o utilizam ou distribuem para outras. Também se diferencia na amplitude de seu uso, já que não se prende às massas de gases emitidos de forma direta pelas fábricas, sendo capaz de filtrar o ar atmosférico de qualquer lugar em que esteja posicionado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 EFEITO ESTUFA

O nome Efeito Estufa foi dado por se assimilar com uma estufa para cultivo de plantas, justamente por se tratar de um teto de vidro que permite com que a luz solar entre e aprisiona o calor, entretanto, neste caso, a camada que prende o calor, ou radiação vermelha, é formada por gases. Apesar disso, essa nomenclatura provoca confusões, visto que eles se diferem.

Portanto, enquanto em uma estufa o ar é aquecido pela falta de contato entre o ar interior e o exterior, no caso do Efeito Estufa, o ar é aquecido por meio da transferência de calor da radiação. De modo geral, a Terra absorve parte da radiação solar e emite radiação infravermelha, sendo que uma parte escapa para o espaço e parte dela é presa à Terra pela atmosfera. E assim, consequentemente, a Terra é aquecida.

Em suma, como diz Junges (2023), o Efeito Estufa é o fenômeno que permite a existência da vida, por manter o planeta em temperaturas adequadas, de tal forma que é natural e benéfico. Ademais, complementa ele, porque sem atmosfera, a Terra poderia atingir cerca de -20°C .

Figura 1 - Funcionamento do Efeito Estufa



Fonte: ClimaScience (2021)

3.2 GASES DE EFEITO ESTUFA

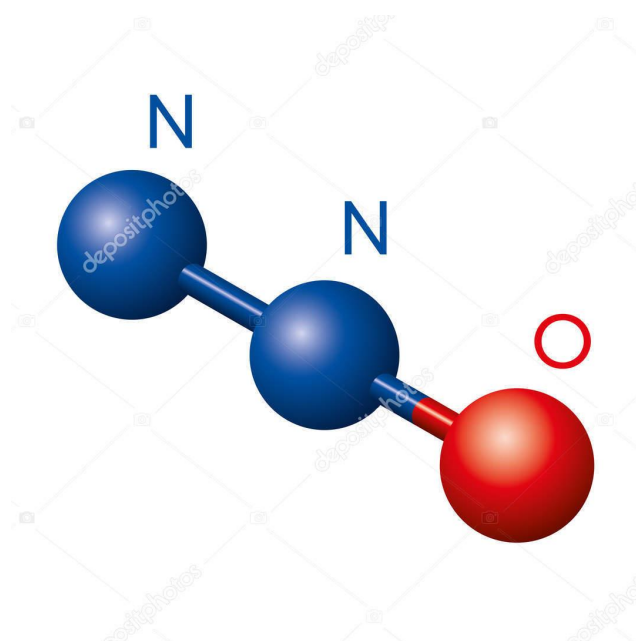
São os gases encontrados na atmosfera terrestre que contribuem diretamente para a ocorrência do efeito estufa, sendo os principais o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) (Neto et al., 2011). Em conjunto, esses gases são responsáveis por manter, no planeta, o calor emitido pelos raios solares.

3.2.1 Óxido Nitroso

Também chamado de protóxido de azoto, é o terceiro gás em maior abundância na atmosfera do planeta e cada molécula é composta por dois átomos de nitrogênio e um átomo de oxigênio (Scabin, 2024). No corpo humano, o gás apresenta efeitos anestésicos e analgésicos em decorrência da inalação.

Assim como o metano, o óxido nitroso é fortemente emitido pela agricultura, principalmente com o uso de fertilizantes nitrogenados nos solos das produções agrícolas em larga escala, já que, apesar de micróbios produzirem N_2O naturalmente na maioria dos solos, a aplicação desses fertilizantes torna o solo muito mais rico em nitrogênio, tornando-o, assim, uma fonte maior de matéria-prima para que microorganismos emitam óxido nitroso. Além disso, na indústria, o N_2O é altamente emitido com a queima de combustíveis fósseis no processo de combustão e no tratamento de efluentes.

Figura 2 - Estrutura molecular do óxido nitroso (N_2O)



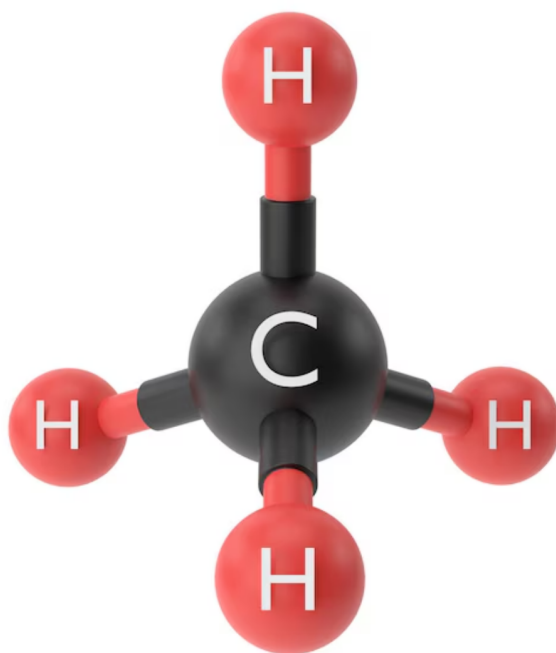
Fonte: Depositphotos (s.d.)

3.2.2 Metano

É o segundo gás mais abundante na atmosfera e ocupa o segundo lugar no aumento da temperatura do planeta. Sua estrutura química compreende a ligação de um átomo de carbono e quatro átomos de hidrogênio por molécula. É um gás incolor, inodoro e inflamável.

No que diz respeito às emissões, o metano é, essencialmente, emitido na agricultura e na pecuária, com o cultivo de arroz sendo responsável por boa parte das emissões, já que os arrozais alagados proporcionam um ambiente ideal para que micróbios produzam CH_4 por meio da metanogênese. Além disso, por intermédio de um processo denominado "fermentação entérica", animais ruminantes como ovelhas, vacas e cabras produzem grandes quantidades do gás durante seu processo digestivo. Junto a isso, também como estratégia para a liberação de terras para a agricultura, a queima de biomassa tem grande influência nas emissões de CH_4 , uma vez que a combustão incompleta em larga escala de florestas, savanas e resíduos agrícolas libera altas quantidades desse gás na atmosfera. Por fim, com menores emissões, mas ainda importantes para tal, a decomposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários também é visível como emissora de metano.

Figura 3 - Estrutura molecular do metano (CH_4)

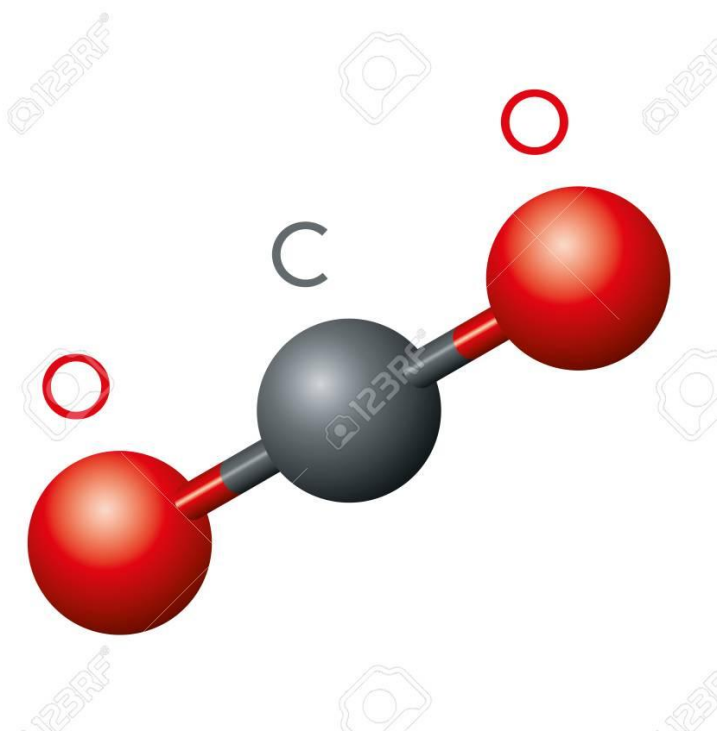


Fonte: Freepik (s.d.)

3.2.3 Dióxido de Carbono

É o gás mais abundante na atmosfera terrestre e, conseqüentemente, o de maior ação no efeito estufa. Suas moléculas são formadas por um átomo de carbono e dois átomos de oxigênio.

Figura 4 - Estrutura molecular do dióxido de carbono (CO₂)



Fonte: 123RF (s.d.)

3.2.4 Quantificação

A quantificação das emissões de gases de efeito estufa se dá com a ajuda do equivalente de dióxido de carbono, uma medida padronizada pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança no Clima, e que visa somar o impacto de todos os gases de efeito estufa juntos. Essa medida é encontrada multiplicando a massa de gases diferentes do CO₂ pelo seu potencial de aquecimento global, uma constante que cada gás possui em relação ao CO₂ na sua capacidade de reter o calor no planeta, adotada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Ritchie et al., 2020).

Figura 5 - Tabela de potencial de aquecimento global

Greenhouse gas ↓	↑↓ 2021
Carbon dioxide (CO ₂)	1.0
HFC-152a (CH ₃ CHF ₂)	164.0
Methane (CH ₄)	27.9
Nitrous oxide (N ₂ O)	273.0
PFC-14 (CF ₄)	7,380.0
Sulphur hexafluoride (SF ₆)	24,300.0

Fonte: IPCC (2021)

3.3 DIÓXIDO DE CARBONO COMO O PRINCIPAL GÁS DE EFEITO ESTUFA

Embora o gás carbônico seja associado ao seu impacto negativo no aquecimento global, ele é fundamental para a vida e para o funcionamento dos sistemas naturais e das indústrias.

Na natureza, o CO₂ é essencial para a fotossíntese, o processo pelo qual plantas, algas e algumas bactérias utilizam a energia solar para criar energia química, gerando oxigênio e substâncias orgânicas. Sem o gás carbônico, este ciclo vital não existiria, o que prejudicaria a base da cadeia alimentar e a fonte de oxigênio para os seres vivos. Nos sistemas naturais, o dióxido de carbono também desempenha um papel importante nos oceanos. Ele é dissolvido na água e utilizado por organismos marinhos, como o fitoplâncton, que também realizam fotossíntese. Além disso, parte do gás se transforma em carbonatos, que são usados por corais e moluscos na formação de conchas e esqueletos calcários.

Além de que, o gás carbônico é um dos principais reguladores de temperatura do planeta, por intervenção do efeito estufa, que mantém a Terra aquecida o suficiente para a existência da água em estado líquido e, conseqüentemente, da vida. Esse efeito ocorre quando parte da radiação solar refletida pela superfície terrestre é absorvida e reemitida por gases como o dióxido de carbono, metano e vapor d'água, evitando que todo o calor escape para o espaço. Em equilíbrio, este fenômeno é fundamental: sem o efeito estufa, a temperatura média da Terra seria de aproximadamente -18 °C, ao invés dos atuais 15 °C, tornando o planeta inóspito para maioria da vida.

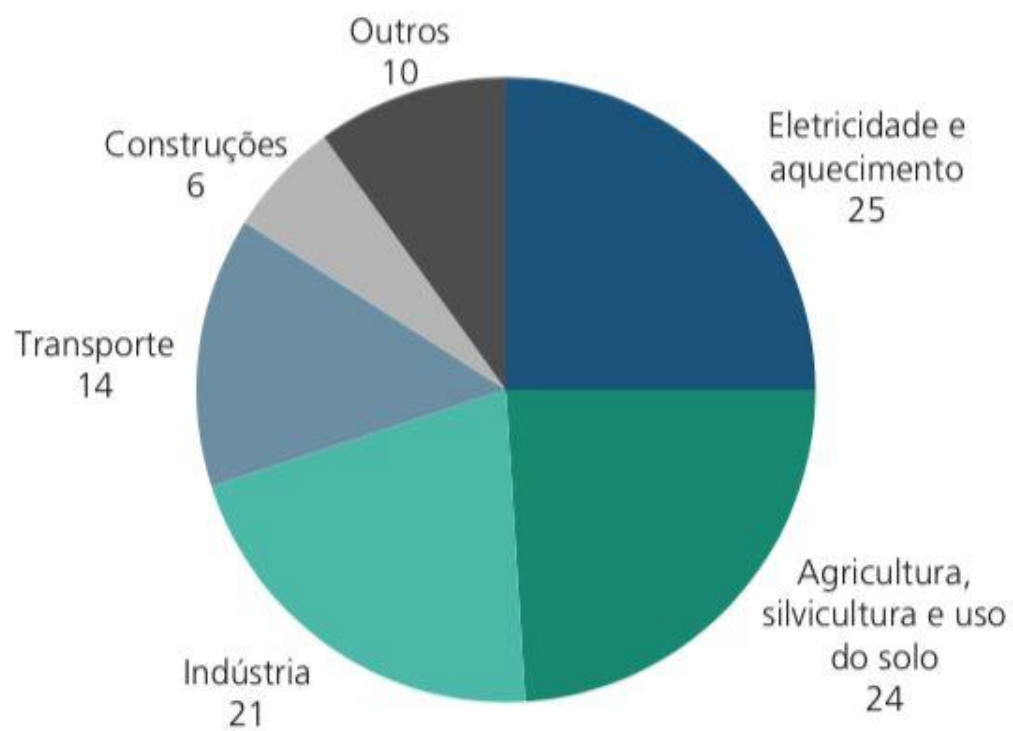
Mais recentemente, o CO₂ tem sido explorado como insumo em tecnologias sustentáveis, como a produção de combustíveis sintéticos e o uso em processos de captura e armazenamento de carbono (CCS), com o objetivo de mitigar os impactos ambientais causados pelas emissões excessivas.

Dessa forma, o dióxido de carbono, embora problemático em excesso, é uma substância natural com papel vital na manutenção da vida, no funcionamento dos ecossistemas e no desenvolvimento de diversas tecnologias industriais.

3.3.1 Emissões

O dióxido de carbono é um dos principais gases de efeito estufa, cujo excesso influencia nas alterações climáticas. Além de já ser o GEE com maior concentração na atmosfera, o CO₂ teve sua quantidade aumentada, após a Revolução Industrial. Suas emissões decorrem, principalmente, de cinco setores econômicos: geração de energia, transportes, processos industriais, uso e ocupação do solo e agropecuária.

Figura 6 - Distribuição das emissões mundiais por setor (%)



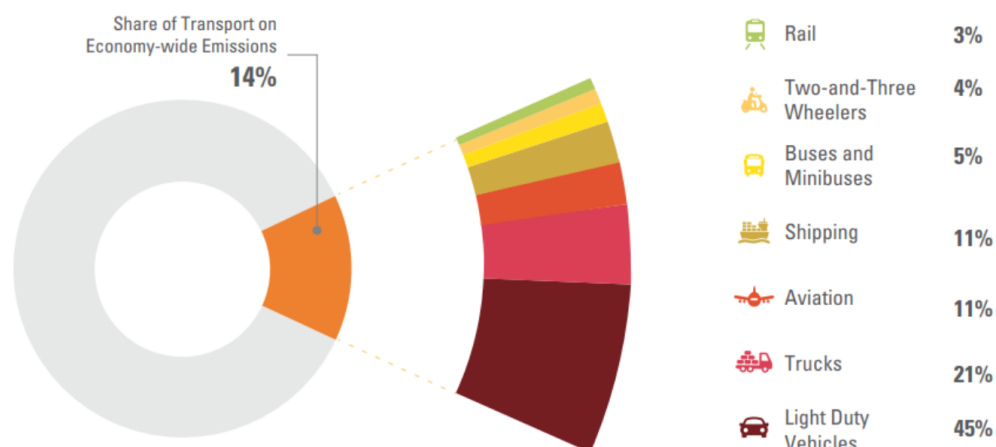
Fonte: IPCC (2014)

3.3.1.1 Geração de energia e transporte

A queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) para a produção de energia elétrica e para locomoção é a principal fonte global de emissão de Co2, com usinas termelétricas representando uma fração significativa dessas emissões. Segundo Oliveira e Silva (2020), a queima de combustíveis fósseis é a maior fonte de emissões de CO2, sendo responsável por cerca de 75% das emissões globais.

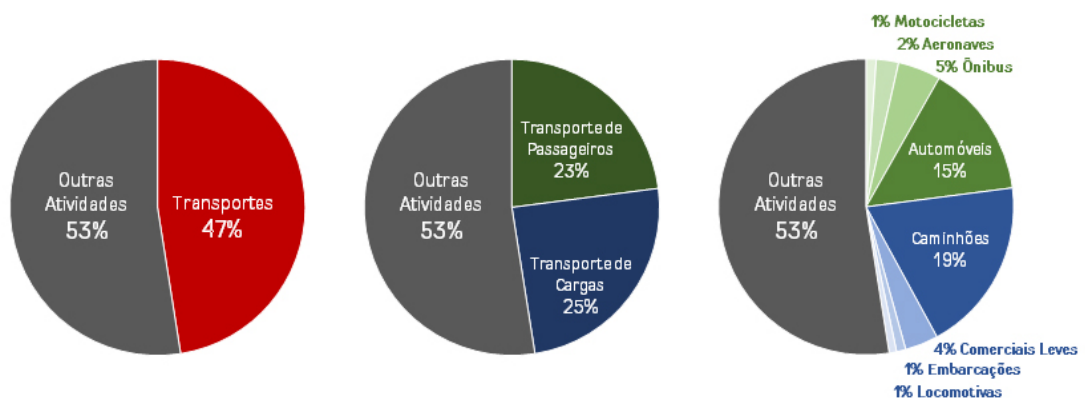
Já no setor de transporte, motores de combustão interna, utilizados em veículos leves, pesados, aeronaves e embarcações, também correspondem a uma parcela das emissões de gás carbônico, devido à queima de gasolina, diesel e querosene.

Figura 7 - Emissões de CO2 no transporte em 40 países



Fonte: Diário do Transporte (2018)

Figura 8 - Emissões do setor de Energia em 2019 com destaque para a atividade de transportes

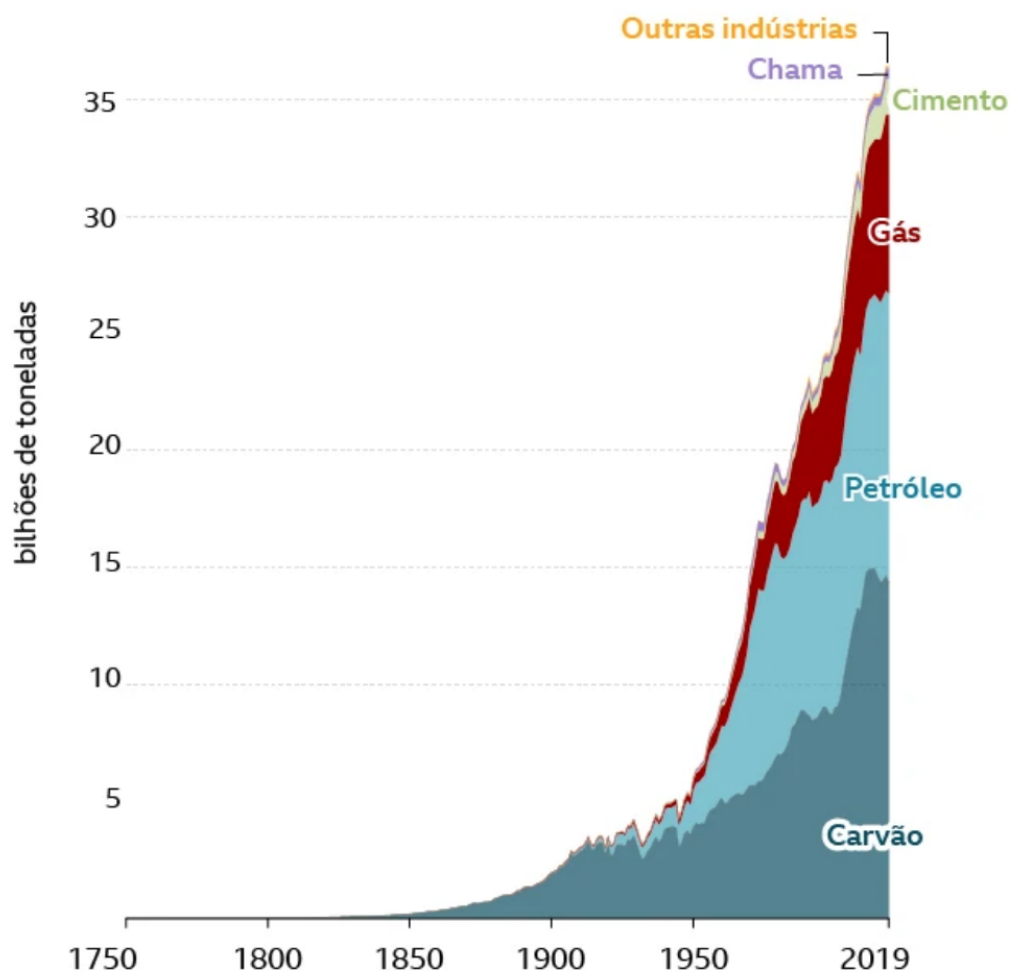


Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2020)

3.3.1.2 Indústria

No setor industrial, há diversos processos que liberam dióxido de carbono, seja pela queima de combustíveis fósseis, para a geração de calor, ou seja por reações químicas intrínsecas aos processos produtivos. A produção de cimento, por exemplo, libera CO₂ durante a calcinação do calcário (CaCO₃). Outro exemplo a ser citado é a fabricação de aço e alumínio, que utiliza calor gerado pela queima de combustível nos processos de redução e refino.

Figura 9 - Emissões globais de CO₂ na indústria

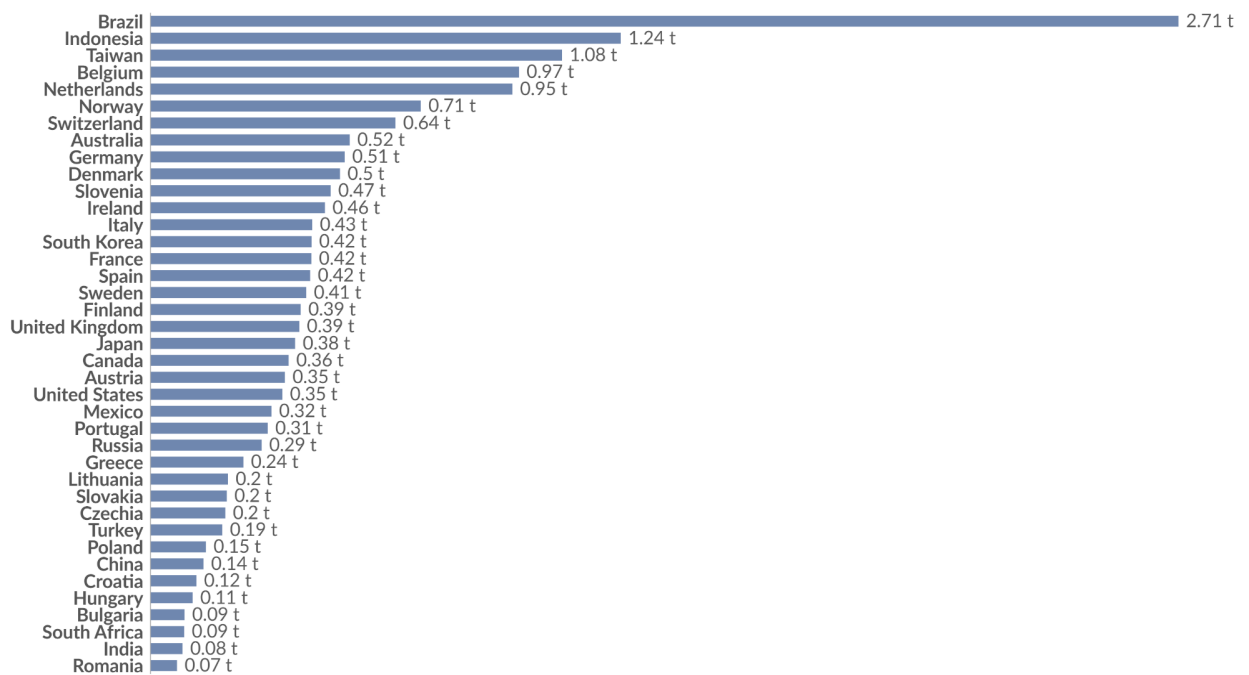


Fonte: BBC (2021)

3.3.1.3 Uso e ocupação do solo

Desde o início do ciclo do carbono, as florestas funcionam como importantes armazenadores desse elemento, uma vez que o carbono da atmosfera é coletado pela fotossíntese. No entanto, o desmatamento, especialmente em regiões tropicais como a Amazônia, resulta na liberação do gás carbônico estocado na biomassa vegetal e do produzido durante a combustão, caso ocorra uma queimada. Com isso, a substituição de áreas florestais por pastagens, áreas agrícolas ou áreas urbanas, contribui para o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera do planeta.

Figura 10 - Emissões de CO₂ pelo desmatamento para produção de alimentos em alguns países



Fonte: Pendrill et al. (2019)

3.3.1.4 Agropecuária

Apesar de o setor agropecuário ser majoritariamente associado às emissões de metano e óxido nitroso, também contribui para o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Essa contribuição decorre, principalmente, da queima de resíduos agrícolas, uso de maquinário movido a combustíveis fósseis e mudanças no uso do solo. Além disso, a degradação do solo e seu manejo inadequado também podem provocar maiores emissões de gás carbônico.

Figura 11 - Emissões anuais pelo desmatamento por produto agrícola no Brasil



Fonte: Pendrill et al. (2019)

3.3.2 Formas de medição e quantificação

A medição do dióxido de carbono atmosférico é fundamental para monitorar mudanças climáticas, qualidade do ar e impactos ambientais.

Nas emissões podem ser abordadas duas unidades de medida, sendo elas: em toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e), uma unidade que permite comparar diferentes gases com base em seu potencial de aquecimento global; E a unidade de medida mais utilizada que é a parte por milhão em volume (ppm), usada para representar a quantidade de moléculas de CO₂ por milhão de moléculas de ar seco. Em estudos ambientais, níveis acima de 400 ppm já são considerados preocupantes em relação ao aquecimento global.

Tabela 2 - Quando utilizar cada unidade de quantificação de CO₂

Unidade	Quando utilizar
Parte por milhão em volume (ppm)	Quantificar a quantidade de CO ₂ no ar.
toneladas de CO ₂ equivalente (tCO ₂ e)	Quantificar quanto de CO ₂ foi emitido por algo.

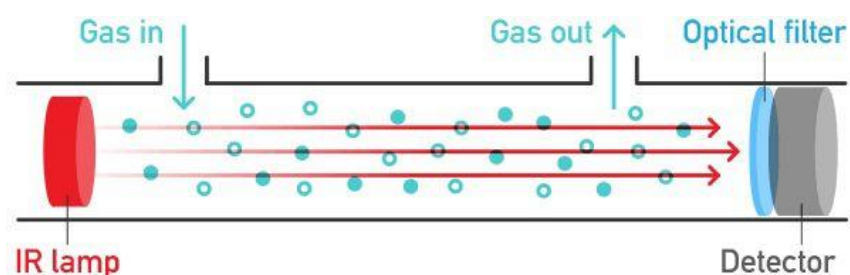
Fonte: Os autores (2025)

Um dos equipamentos mais comuns utilizados para mensurar o CO₂ é o analisador de gases por espectroscopia de absorção no infravermelho não dispersivo (NDIR, do inglês Non-Dispersive Infrared). Esse tipo de sensor detecta a concentração de CO₂ com base na absorção da radiação infravermelha por moléculas de gás. Além do NDIR, também são utilizados espectrômetros de massa e analisadores por espectroscopia a laser, como os que utilizam a técnica de espectroscopia de cavidade ressonante (Cavity Ring-Down Spectroscopy - CRDS), que oferecem alta sensibilidade e precisão.

Há também os sensores eletroquímicos, mais comuns em dispositivos portáteis, que utilizam reações químicas para gerar sinais elétricos proporcionais à concentração do gás. Equipamentos mais sofisticados, como os TDLAS, permitem medições com altíssima precisão, sendo usados em pesquisas atmosféricas e monitoramentos em tempo real.

As medições podem ser feitas de forma pontual, utilizando estações de monitoramento fixas instaladas em locais estratégicos, ou por meio de sensores embarcados em satélites e aeronaves, o que permite um mapeamento mais amplo da distribuição de CO₂ em diferentes regiões do planeta.

Figura 12 - Ilustração do funcionamento de um NDIR



Fonte: Aranet Forum (s.d.)

3.3.3 Uso na indústria

O dióxido de carbono tem sido bastante usado na área de refrigeração, já que, a respeito do seu potencial de aquecimento global, é uma excelente alternativa a gases sintéticos mais poluentes, além de ser não inflamável, não tóxico e oferecer boa eficiência energética, especialmente em dias mais frios.

Já na indústria alimentícia, o gás carbônico é amplamente utilizado por suas propriedades inertes e conservantes, sendo comum em embalagens com atmosfera modificada, onde ajuda a prolongar a validade de alimentos ao inibir o crescimento de microorganismos. Ademais, é utilizado na carbonatação de bebidas, como refrigerantes e cervejas, onde ele é dissolvido na água sob pressão, adicionando o efeito borbulhante em águas, cervejas e refrigerantes. Em forma de gelo seco (pressurizado), o gás carbônico é eficiente no resfriamento e transporte de produtos perecíveis, pois mantém baixas temperaturas sem deixar resíduos. Junto a isso, é aplicado em processos como a extração de cafeína e aromas, por meio do CO₂ supercrítico, estado onde o dióxido de carbono possui propriedades tanto gasosas quanto líquidas, garantindo segurança e eficiência no processamento dos alimentos.

Na agricultura, o CO₂ participa da produção de ureia, reagindo com amônia em altas pressões e temperaturas para formar carbamato de amônio, que depois se transforma em uréia e água. Esse processo é amplamente usado na fabricação de fertilizantes, já que a ureia é uma das principais fontes de nitrogênio para as plantas.

Logo, considerando o alto uso do dióxido de carbono industrialmente, a indústria de fornecimento, armazenamento e tratamento que faz o seu uso é impulsionada por diversos setores. Nesse meio, há diversos processos importantes para que o sistema seja harmônico, tal qual a purga, a captura e armazenamento de carbono (CAC), fornecimento por gasodutos, dentre outros.

No geral, para o uso industrial, o gás carbônico é mais comumente obtido a partir da captura e purificação de gases de pós-combustão, com o aproveitamento do gás resultante de processos de queima, na fabricação de diversos produtos. Para isso, são utilizados filtros industriais, como o filtro de mangas, muito utilizado nas indústrias metalúrgicas, químicas e têxteis.

3.3.3.1 O Processo de Purga

Quando se trata de gases em meio industrial, um adequado tratamento deles se torna relevante. Uma das formas de tratamento é a purga de gases, que consiste na introdução de um gás inerte (como o dióxido de carbono ou o nitrogênio) em tubulações, tanques ou equipamentos, com o objetivo de expulsar oxigênio, umidade ou gases residuais indesejados.

Esse procedimento é fundamental, pois previne riscos de explosão ou combustão decorrentes da presença de oxigênio, que pode gerar atmosferas inflamáveis. Além disso, garante a proteção dos equipamentos, evitando corrosão e danos causados por contaminantes, e assegura a pureza do processo, impedindo que resíduos interfiram na qualidade do produto final.

No caso de purga com dióxido de carbono, a técnica é comumente aplicada no meio alimentício para prevenir a oxidação da cerveja, retirando seu oxigênio e mantendo seu frescor. Na indústria farmacêutica, ela impede a contaminação de fluídos em seu transporte, como tanques de produção e tubulações, novamente evitando gases indesejados.

Assim, a combinação entre filtragem do ar, tratamento químico e purga de gases constitui um sistema completo de controle de emissões, indispensável para que as indústrias reduzam impactos ambientais e mantenham processos seguros e eficientes.

3.4 PROBLEMAS DA INTENSIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Popularmente, o Efeito Estufa é tido como um fenômeno negativo, embora seja importantemente benéfico e natural. Essa confusão ocorre por não se discernir amplamente o fenômeno em si e sua intensificação ao longo dos anos.

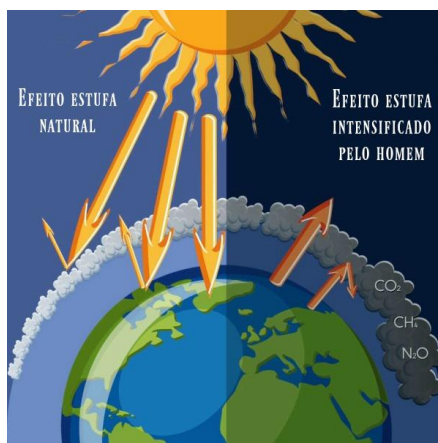
A intensificação é, portanto, resultado do desbalanceamento nas trocas de Gases de Efeito Estufa. Como no caso do principal deles, o dióxido de carbono (cuja fotossíntese é a responsável pelo consumo), em que as plantas já não vêm mais dando conta de manter seu equilíbrio, devido ao excesso de sua produção. Como foi citado por Kobiyama (2022, p. 18)

De acordo com o último relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), os aumentos observados nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE), desde aproximadamente o ano 1750 são inequivocamente causados pelas atividades humanas. Segundo o relatório,

as concentrações desde 2011 continuaram a aumentar na atmosfera, atingindo médias anuais de 410 partes por milhão (ppm) de dióxido de carbono (CO₂).

É possível concluir, então, que a produção de CO₂ por conta de atividades humanas, tal qual a respiração, é normal. Entretanto, a sua emissão desenfreada tem sido um alerta a toda população, sobretudo se levarmos em conta que cada vez mais plantas são substituídas por usinas poluentes. De acordo com Debone, Leite e Miraglia (2020), todo ano são emitidas toneladas de Gases de Efeito Estufa, sendo que as principais atividades responsáveis pelo aumento desse índice são desmatamentos, queimadas, queima de combustíveis para geração de energias e até a prática da agropecuária.

Figura 13 - Diferença entre o efeito estufa e sua intensificação



Fonte: Mundo Educação (s.d.)

3.4.1 Problemas ambientais

É clara a diferença na temperatura terrestre antes e após a Primeira Revolução Industrial. Esse contraste é, portanto, uma das principais consequências da industrialização, bem como das ações humanas realizadas, em prol do capitalismo, o que acaba por provocar o aumento na emissão de Gases de Efeito Estufa. De acordo com Andrade et al. (2024, p. 14):

A análise dos dados encontrados, especialmente por meio de técnicas geoespaciais, permitiu uma compreensão mais detalhada das áreas afetadas por queimadas, das variações de temperatura da superfície e das concentrações de CO₂ e CH₄ na região. Esses resultados destacam a relação direta entre as atividades de queimadas e as concentrações desses gases na atmosfera, assim como, sobre a intrínseca relação entre as dimensões territoriais econômicas, geográficas e ambientais que são balizadoras para o planejamento regional.

Além do aquecimento, o aumento na concentração desses gases na atmosfera também provocam outros problemas, sobretudo alterações climáticas. Como afirmam os dados do IPCC (2022, apud Andrade et al., 2024, p. 3):

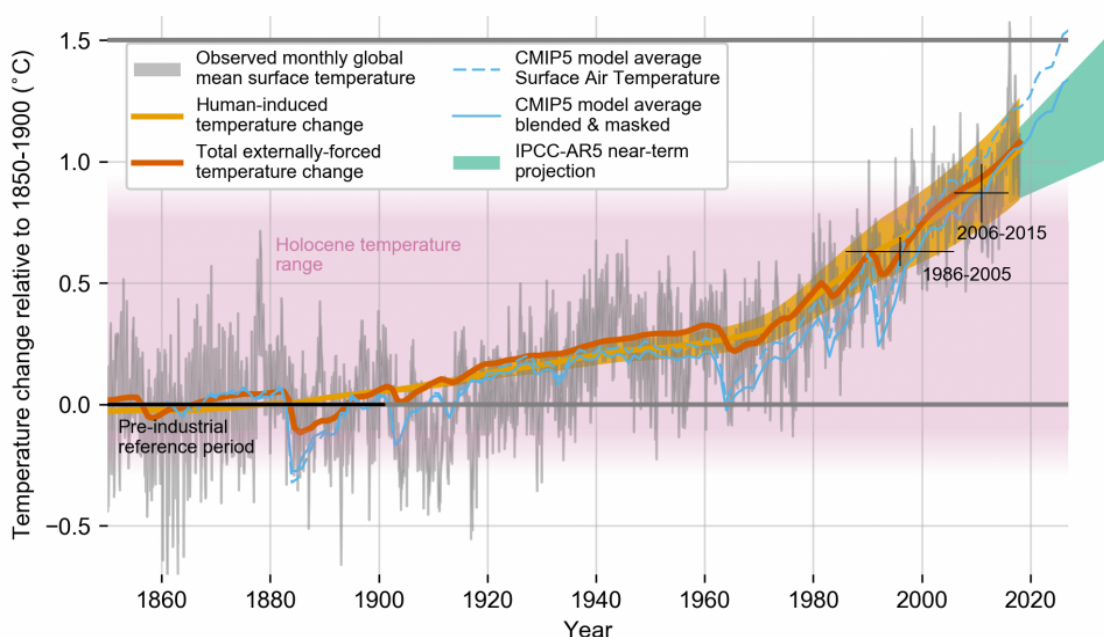
As emissões e concentração de gases vêm influenciando diretamente o aumento de desastres climáticos como chuvas torrenciais, tempestades, ciclones extratropicais e secas extremas, sendo um exemplo desses fenômenos o ocorrido na bacia Amazônica, em 2023.

Assim como confirmou Souza (2014, apud Portal Meio Ambiente, 2009, p. 18):

Também, ocorrem eventos extremos como furacões, enchentes e secas mais frequentemente. As geleiras derretem, aumentando o nível dos mares e a temperatura da água, levando a inundações, erosões, agravando a aridez das regiões já castigadas, falta de água potável, alterações agrícolas e de pesca agravando-se consideravelmente.

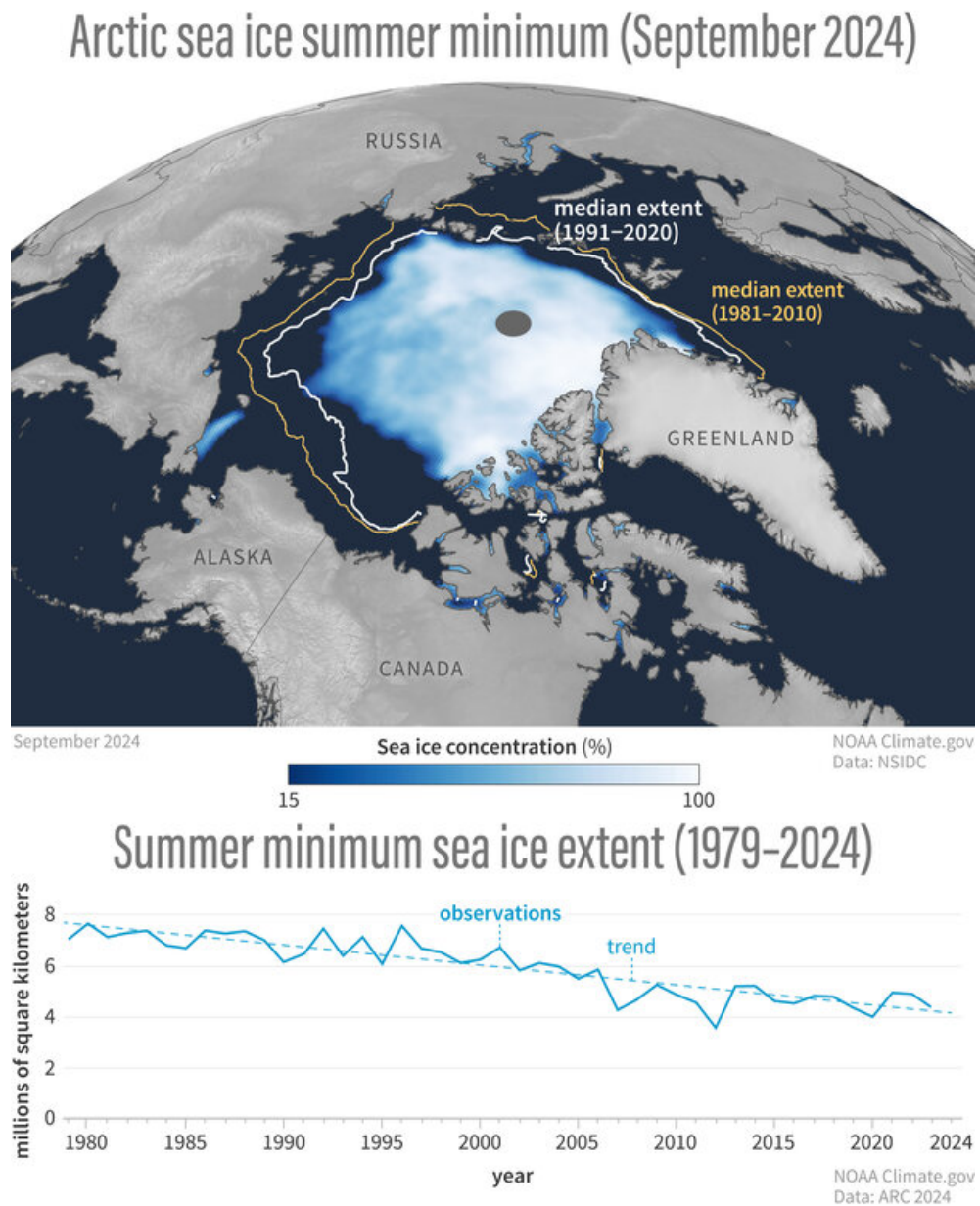
Em síntese, o nível que as mudanças climáticas vêm atingindo não tem nada de natural. Não deveriam ocorrer, subitamente, enchentes, secas, furacões e tremores de terra em locais que, por histórico, não continham sua incidência. Por isso, notícias atuais que abordam tais acontecimentos só evidenciam o estado fragilizado da vida na Terra, que é resultado da ação do homem, além dos tantos alertas publicados, cada vez mais frequentemente por cientistas acerca da urgência de uma reação imediata para evitar maiores catástrofes.

Figura 14 - Gráfico da evolução da temperatura da superfície terrestre ao longo dos anos



Fonte: IPCC (2018)

Figura 15 - Extensão mínima do gelo marinho no ártico durante o verão e em comparação com épocas anteriores



Fonte: NOAA (2024)

3.4.2 Problemas de saúde pública

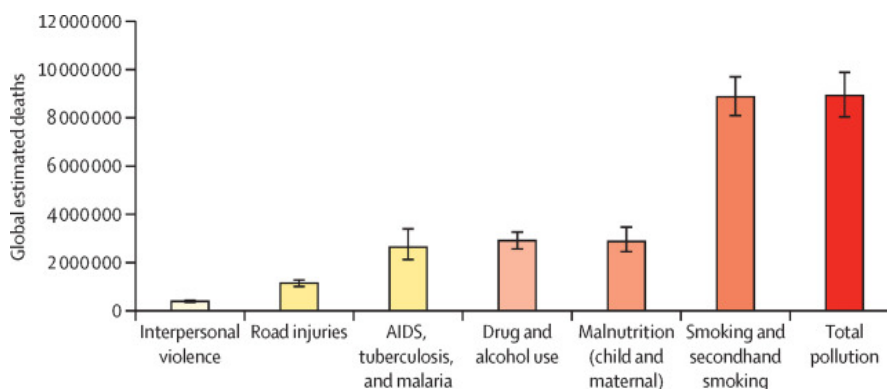
É fato que a poluição atmosférica afeta a saúde pública, mas é importante afirmar que não é a causa primária de doenças. De acordo com Mendonça (2004), a poluição atmosférica, apesar de não causar doenças diretamente, as propaga mais e mais, como ocorre, por exemplo, no caso da Dengue. Dessa forma, Mesquita (2004) expõe que, a baixa umidade provoca a dissipação de poluentes e, consequentemente das bactérias, o oposto do que ocorre com a temperatura que, por sua vez, quando está alta influi na sobrevivência de diversos vírus.

Ademais, os poluentes em massa interferem, sobretudo, em distúrbios respiratórios. Em especial com o solstício de inverno, momento no qual forma-se uma camada de ar frio que dificulta a saída dos poluentes da atmosfera de cidades com alto índice de poluição, segundo diz Mesquita (2004). Ou seja, pode-se entender que o ar atmosférico poluído afeta indiretamente a saúde da população. O calor extremo, por consequência, apresenta igualmente riscos. Como dito por Alcoforado (2021, p. 3):

O calor extremo é uma das principais causas de morte relacionadas ao clima. A combinação de mudanças climáticas com urbanização continua a intensificar os extremos de calor em todo o mundo. O estresse térmico afeta a produtividade e pode aumentar o risco de doenças cardiovasculares, respiratórias e renais.

Em suma, é relevante tratar de como os problemas das ações climáticas recaem desproporcionalmente sobre populações vulneráveis economicamente que, muitas vezes, não possuem condições adequadas de trabalho, acesso à instituições de saúde, ou sequer saneamento básico em suas casas para lidar com esses problemas.

Figura 16 - Comparação entre alguns fatores e a quantidade de mortes que ocasionam

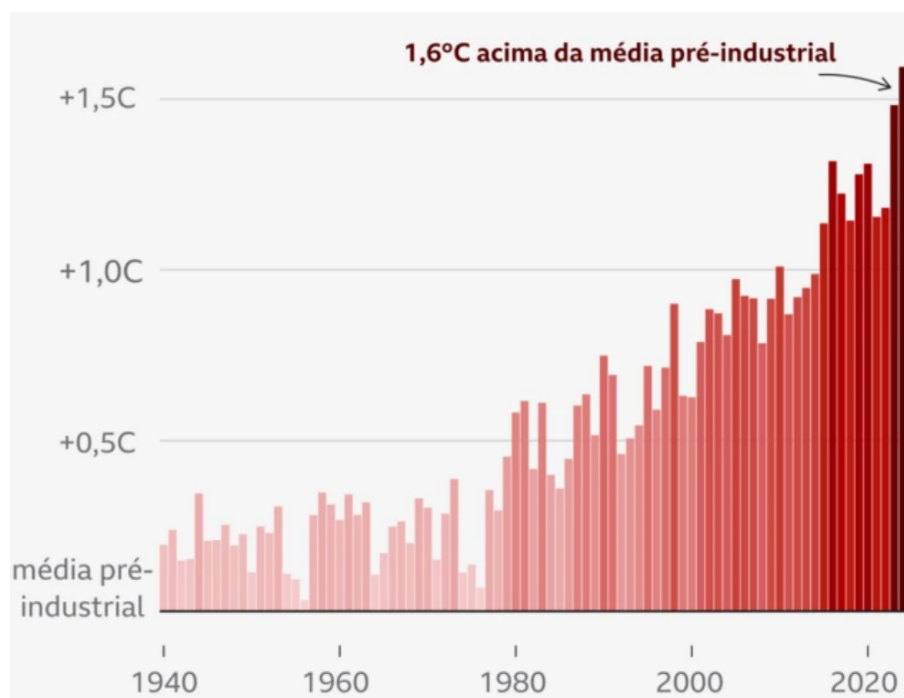


Fonte: The Lancet Planetary Health (2019)

3.4.3 Aquecimento global

Devido aos crescentes aumentos na temperatura média do planeta e em diversas de suas regiões, muito tem se discutido a respeito do fenômeno chamado de aquecimento global. Segundo o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), esse fenômeno é causado, principalmente, pelo agravamento do efeito estufa, com fortes evidências de influência de ações humanas (Alcoforado, 2021). Vale ressaltar que o aquecimento global se difere das mudanças climáticas, sendo o primeiro uma das causas do segundo.

Figura 17 - Temperatura média global por ano, comparada com a média pré-industrial



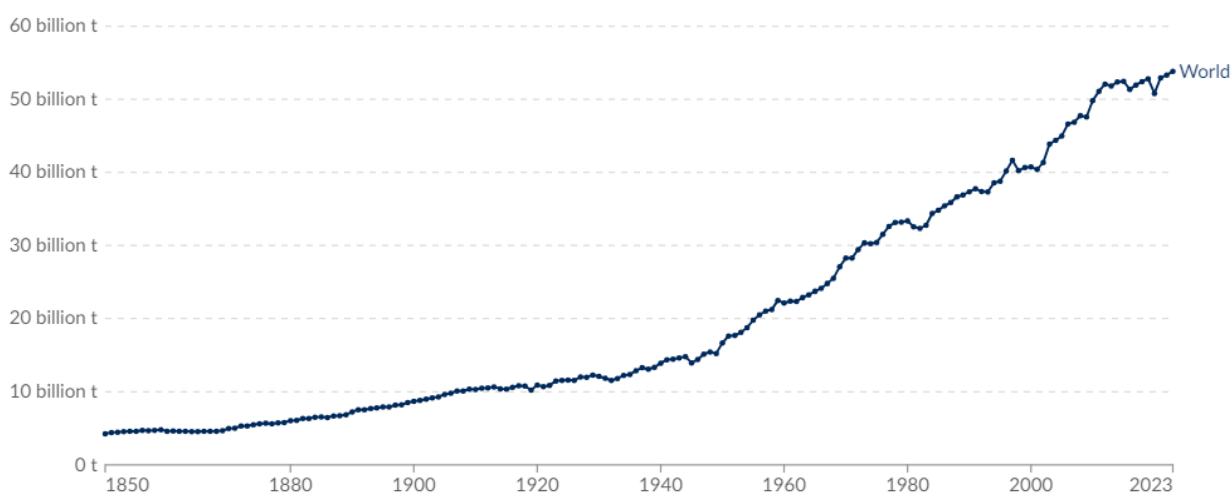
Fonte: ERA5, C3S/ECMWF (2024)

Com o aumento das discussões sobre as mudanças climáticas e o aquecimento global, surgem estudos que visam contrariar a ideia da influência humana como causa de tais fenômenos. Segundo Casagrande et al. (2010 apud Weart, 2010, p. 33):

[...] os climas da Terra são controlados por variações previsíveis na órbita da Terra em volta do Sol; essas variações são conhecidas como Ciclos de Milankovitch e operam a cada 100 mil, 41 mil e 22 mil anos, controlando a quantidade de radiação solar que chega a diferentes partes do globo numa dada estação do ano, que pode diferir em mais de 10% uma da outra.

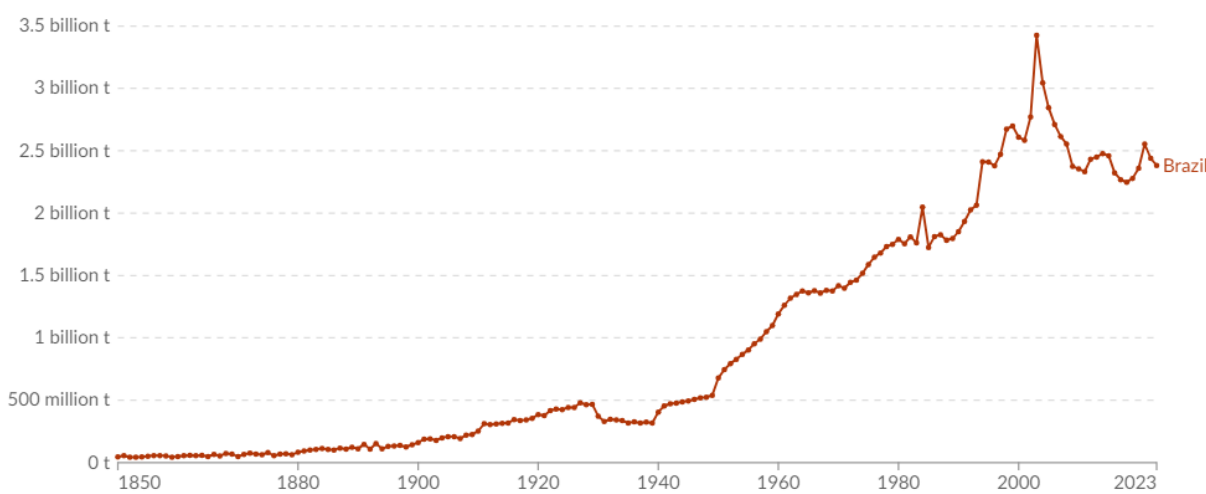
Além do apontado, diferentes outros estudos negam a parcial ou total influência dos seres humanos na temperatura terrestre. Porém, em virtude de todas as evidências a favor da existência dessa influência, inclusive as citadas anteriormente, é importante ter em vista que, apesar de mudanças climáticas ocorrerem naturalmente na história do planeta, não se pode desconsiderar as ações humanas e o aumento do efeito estufa devido às fortes emissões de gases como CO₂ e CH₄ como alguns dos diversos fatores infelizmente favoráveis para essas mudanças, interferindo na intensidade e velocidade com que ocorrem.

Figura 18 - Emissões, em toneladas, de gases de efeito estufa por ano no mundo



Fonte: Our World In Data (2024)

Figura 19 - Emissões, em toneladas, de gases de efeito estufa por ano no Brasil



Fonte: Our World In Data (2024)

3.5 AÇÕES GOVERNAMENTAIS A FIM DE REDUZIR O PROBLEMA

Com o aumento das temperaturas e o crescente alcance das discussões acerca do aquecimento global e as mudanças climáticas, diversas instituições governamentais instituíram medidas, planos e metas, com o intuito de prevenir o aumento desses fenômenos, focando, especialmente, em controlar as emissões de gases de efeito estufa, assim como mitigar os danos já causados no clima do planeta.

3.5.1 Conferência Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

Em 1992, no Rio de Janeiro, consagrou-se a Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, uma conferência internacional realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) que reuniu diversos países com o objetivo de debater sobre as emissões de gases e buscar medidas para os riscos ambientais enfrentados. Na conferência, foi criada a Declaração do Rio, um documento com princípios para o desenvolvimento sustentável. Também foi adotado o tratado chamado de Convenção-Quadro das Nações Unidas, com o objetivo de estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa a níveis não prejudiciais ao clima. O tratado obriga todas as 197 partes a proteger o clima terrestre para o benefício de gerações presentes e futuras, com a inclusão de países em desenvolvimento. Atualmente, a Convenção realiza conferências periódicas em função da análise do progresso das medidas adotadas e criação de novos tratados (Scovazzi, 2021).

Figura 20 - Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento



Fonte: G1 (2012)

3.5.2 Protocolo de Kyoto

Adotado em 1997, o Protocolo de Kyoto é um anexo da Convenção-Quadro e impõe obrigações específicas a países desenvolvidos, incluindo a previsão da redução de pelo menos 5% de emissões de gases de efeito estufa até o período de 2008 e 2012, em relação às emissões em 1990. Com isso, cada parte recebeu uma porcentagem específica como meta de redução para o protocolo. Segundo Diniz (1998, p. 2):

[...] os Estados Unidos se comprometeram a uma redução de 6%, o Japão a 5%, a Europa a 8%, o Canadá a 6%. Alguns países dependentes de combustíveis fósseis obtiveram permissão para aumentar suas emissões, como, por exemplo, Islândia (10%), Austrália (8%) e Noruega (1%).

Entretanto, em razão da disparidade de obrigações com os países em desenvolvimento, o que inclui países como a China e o Brasil, os Estados Unidos não adotaram o Protocolo de Kyoto, ato considerado como inaceitável pelos membros da União Europeia que, ao contrário dos EUA, aceitaram as metas impostas e se comprometeram a diminuir suas emissões. Porém, com a não inclusão da China e dos Estados Unidos que, juntos, são responsáveis por cerca de 50% das emissões de gases, os demais países se encontraram sobrecarregados com a alta quantidade de metas e obrigações delegadas. Com isso, o Protocolo de Kyoto se mostrou insuficiente para a diminuição das emissões globais de gases de efeito estufa, apesar de se seguirem as discussões sobre alterações e novas metas, após reuniões em Doha, nas quais foram impostas novas obrigações para o período de 2013 a 2020 (Scovazzi, 2021).

3.5.3 Acordo de Paris

Também como uma extensão da Convenção-Quadro das Nações Unidas, o Acordo de Paris foi criado em 2015, alterando significativamente a regulamentação internacional das mudanças climáticas (Scovazzi, 2021). Após diversas tentativas de negociações fracassadas e impasses, a conferência chamada de COP 21, realizada em Paris, no dia 12 de dezembro de 2015, gerou um tratado que integrou o comprometimento de 195 países e a União Europeia com a redução das emissões de gases de efeito estufa, além da união entre nações com os objetivos comuns para com o clima. De acordo com Alcoforado (2021, p. 2):

O objetivo declarado do Acordo de Paris foi o de conter o aumento da temperatura média global que é de 15 °C bem abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais e fazer esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso consistiria

em reduzir significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas. A referência à meta de redução de 1,5 °C surgiu graças à ação conjunta dos países insulares, que serão condenados à extinção a longo prazo pela elevação do nível do mar decorrente de um aquecimento global que elevasse a temperatura em 2 °C.

Como parte dos objetivos, o acordo menciona equidade entre as obrigações de todos os Estados acordantes, derrubando parte dos princípios do acordo anterior, o Protocolo de Kyoto, que determinava metas diferentes para os países, além de não incluir países de determinadas classes econômicas (Scovazzi, 2021). Porém, para Alcoforado (2021, p. 3):

O Acordo de Paris não resolve as questões fundamentais e as metas voluntárias indicadas por cada uma das nações não são suficientes para garantir que o aumento do aquecimento global fique bem abaixo de 2 graus Celsius em direção a 1,5 graus Celsius até o ano 2100. Além disso, o documento não apresenta propostas que contribuam para a construção de um modelo de desenvolvimento sustentável em nosso planeta no lugar do atual modelo insustentável e caótico de desenvolvimento capitalista.

Portanto, mesmo contando com atualizações nas metas e obrigações impostas aos países, pode-se concluir que o Acordo de Paris não se mostra suficientemente eficaz como uma ação contra o aquecimento global, visto que nações responsáveis por grande parte das emissões não se enquadram nessas imposições.

Figura 21 - Conferência das Nações Unidas sobre mudanças climáticas de 2015 em Paris, convenção onde o acordo de Paris foi criado



Fonte: Ecoa (2015)

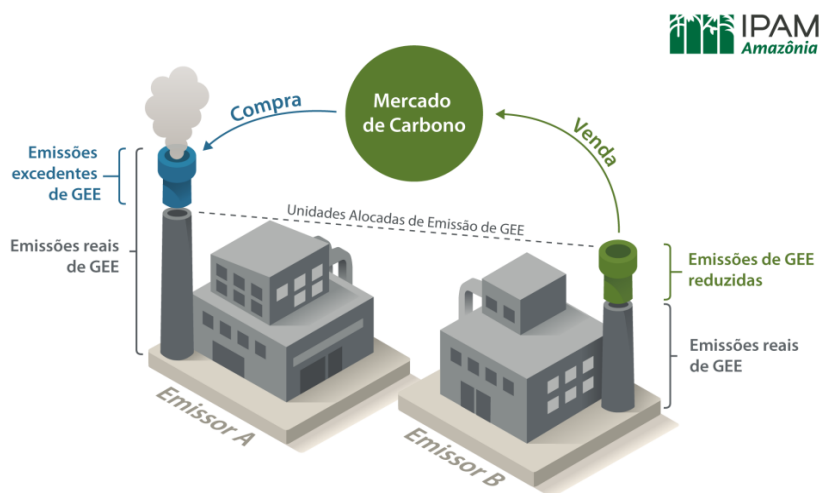
3.5.4 Outras medidas tomadas para corte de emissões de dióxido de carbono

Junto com os diversos acordos e convenções, foram criados programas como o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), com o objetivo de coletar e disponibilizar informações referentes ao aquecimento global e às mudanças climáticas. O painel, criado em 1988, emitiu seis relatórios, acerca desses fenômenos, com pautas a respeito do agravamento, impactos, adaptação e mitigação dos efeitos por eles causados, sendo considerado a maior autoridade científica sobre esses assuntos e servindo de base para decisões políticas no mundo todo (Casagrande, 2010).

Outro exemplo é o Mercado de Créditos de Carbono, um sistema de compra e venda de créditos onde cada crédito representa uma quantidade de carbono a ser emitida. Quando um crédito é comprado, a empresa que o comprou recebe a permissão para gerar uma tonelada de gás carbônico. Ademais, quando uma empresa remove uma tonelada de CO₂ da atmosfera, recebe o chamado de crédito de compensação, que pode ser comercializado para outras instituições.

Dessa forma, indústrias emissoras de gases de efeito estufa são incentivadas a mitigar suas emissões de dióxido de carbono, visando evitar a compra de créditos e, conseqüentemente, reduzir os custos de produção, assim como retirar o gás da atmosfera, gerando créditos de compensação para venda. Essa retirada, por sua vez, pode ocorrer por meio do plantio de árvores, investimentos em energia renovável e captura de CO₂, por exemplo.

Figura 22 - Mercado de Carbono

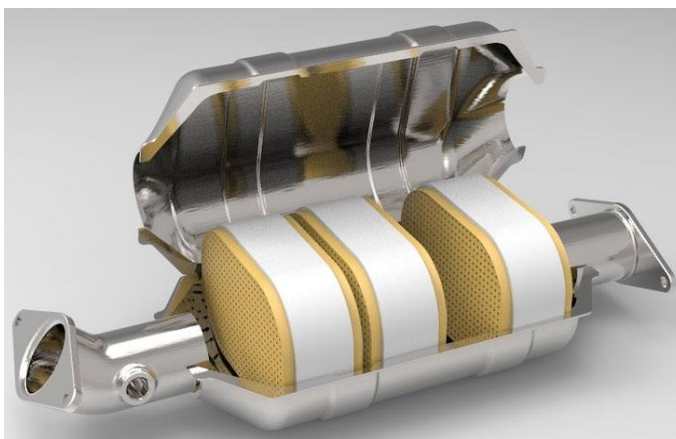


Fonte: IPAM Amazônia (s.d)

3.6 FILTROS DE AR INDUSTRIAIS

De acordo com Filho (1990, p. 42), “os poluentes do ar originam-se principalmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis, para fins de transporte, aquecimento e produção industrial”. No contexto do transporte, os veículos de combustão interna como os automóveis movidos a gasolina e os caminhões a diesel, por exemplo, produzem grandes quantidades de poluentes para a atmosfera, tendo em vista que não realizam a queima completa dos combustíveis. Em reação à liberação desses poluentes, tendo como alvo, nesses casos, gases como monóxido e dióxido de nitrogênio e monóxido de carbono, utiliza-se de dispositivos chamados de catalisadores na fase de exaustão dos motores, que funcionam como filtros que aceleram reações químicas responsáveis por transformar esses gases em substâncias menos ou nada nocivas para o meio ambiente.

Figura 23 - Catalisador usado em automóveis



Fonte: Campeão das Baterias (2022)

Já na indústria, é amplo o uso do chamado filtro de mangas, comumente feito de fibra de vidro. Segundo Aguiar, Silva, Santos e Oliveira (2016), nesse método de filtragem, a massa de gás poluente é introduzida na antecâmara lateral do corpo do filtro, visando precipitar o material particulado com maior granulometria. O ar, que ainda não se encontra devidamente filtrado, é levado ao corpo central do filtro, onde passa pelas mangas de filtragem. Por fim, já sem impurezas, o ar é expelido para a atmosfera.

Figura 24 - Filtro de mangas



Fonte: Bernauer (s.d.)

Além do filtro de mangas, são utilizados filtros de outros materiais para poluentes específicos. Processos de filtragem do ar podem ser executados através do uso de diversos tipos de filtros, podendo ser eles absorventes, adsorventes, membranas, malhas, entre outros.

3.7 MINERAIS ADSORVENTES

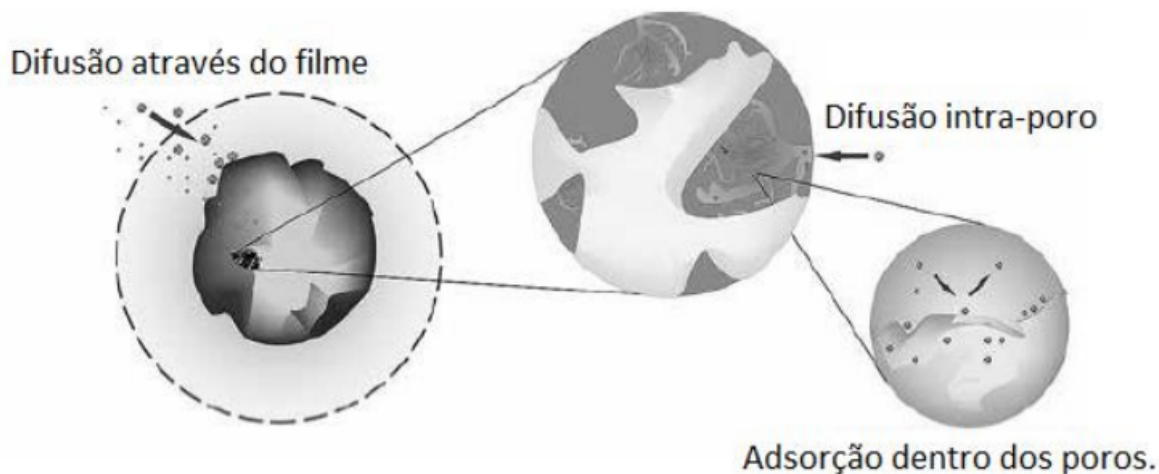
Segundo Gouveia (2010), a adsorção é um fenômeno conhecido há muito tempo e cada vez mais utilizado com o objetivo de separação e purificação. Devido às crescentes discussões sobre o uso desse fenômeno nas indústrias, muito tem se discutido também sobre o uso de minerais adsorventes como elemento filtrante.

Os minerais adsorventes são, em resumo, sólidos que apresentam poros em sua superfície, devido à sua estrutura molecular. Esses sólidos são, por conta dos poros, capazes de realizar o processo de adsorção. Sobre esse fenômeno, Gouveia (2010, p. 23) diz:

[...] trata-se de uma operação unitária de transferência de massa em que se avalia a capacidade de sólidos em remover um componente, ou conjunto deles, de fluidos líquidos ou gasosos e concentrá-los em sua superfície, permitindo a separação. O componente a ser removido é conhecido como adsorvato, enquanto que o sólido e sua superfície é chamada de adsorvente.

Nos sólidos adsorventes, o tamanho dos poros geralmente determina quais adsorbatos podem ser coletados, já que poros menores não são capazes de reter moléculas maiores.

Figura 25 - Adsorção em minerais porosos



Fonte: Gouveia (2010)

A adsorção pode ocorrer por dois meios: o físico (fisissorção) e o químico (quimissorção). De acordo com Gouveia (2010, p. 26):

A adsorção física ou forças de Van der Waals é um fenômeno reversível, resultante da interação de forças intermoleculares entre as moléculas dos sólidos e as substâncias adsorvidas. Quando a força de atração entre o gás e o sólido for maior que a força entre as moléculas do próprio gás ocorrerá a adsorção deste sobre a superfície do adsorvente. Quando a força de atração entre o gás e o sólido for maior que a força entre as moléculas do próprio gás ocorrerá a adsorção deste sobre a superfície do adsorvente, de forma que as moléculas adsorvidas mantenham suas características uma vez que nenhuma ligação foi feita ou quebrada.

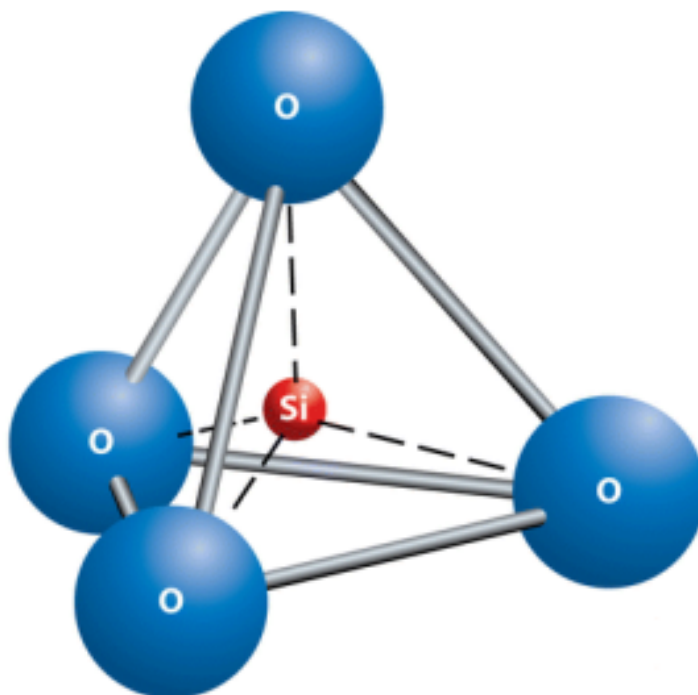
Já na adsorção por meio químico, ocorrem ligações químicas entre a estrutura do adsorvente e o adsorbato, sendo processo de difícil reversão. (Nascimento et al., 2014).

Os adsorventes químicos mais utilizados atualmente são: óxidos metálicos, sais metálicos, hidrotalcitas e materiais à base de cálcio. Já os físicos, se resumem às zeólitas, carvões ativados, sílicas e estruturas orgânicas metálicas (MOFs).

3.7.1 Zeólitas

Zeólitas são aluminossilicatos hidratados altamente cristalinos, com estrutura composta por tetraedros com um átomo do grupo dos metais alcalinos e alcalinos terrosos no centro e quatro átomos de carbono nas extremidades. Essa disposição resulta na formação de cavidades interconectadas que detêm os íons de compensação como, por exemplo: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Sua estrutura cristalina apresenta poros de diâmetro único, ao contrário dos demais adsorventes, que possuem variações no tamanho dos poros (Mozer, 2021). Esse arranjo estrutural permite a transferência de matéria entre os poros, sendo esta limitada pelas suas dimensões. Nas indústrias, as zeólitas são amplamente utilizadas como catalisadores de refino de petróleo, devido à sua capacidade de peneiramento molecular em detrimento de seus poros, que contêm moléculas menores e exclui as maiores. Além disso, têm sido utilizadas como adsorventes na purificação de diversos tipos de gases. (Silvestre et. al., 2012).

Figura 26 - Estrutura molecular de uma zeólita



Fonte: IQ-UFRN (s.d.)

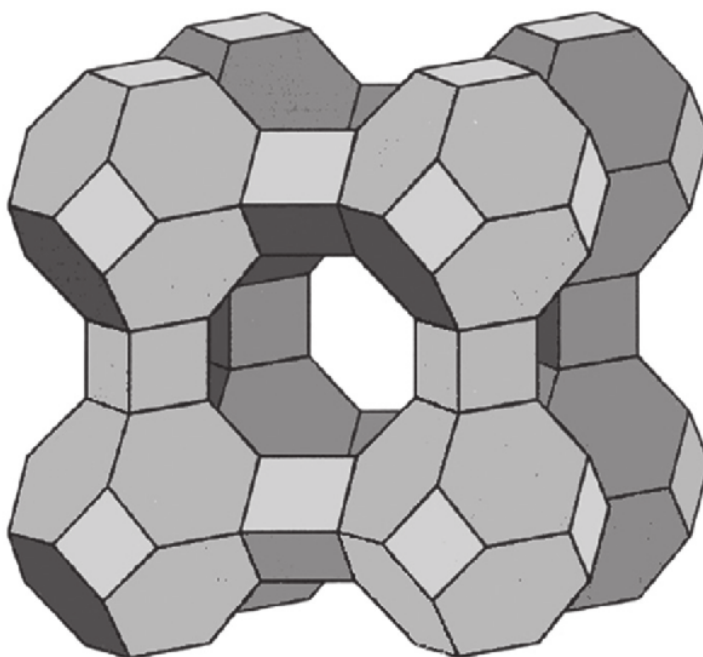
3.7.1.1 Adsorção do CO₂ nas Zeólitas

A adsorção pode ocorrer por meios físicos e químicos.

No caso dos meios físicos, os átomos do adsorbato são atraídos para o interior dos poros da zeólita por meio das Forças de Van de Waals, que são fracas interações geradas por variações na distribuição eletrônica dos átomos e que são intensificadas pelo tamanho das cavidades do adsorvente usado.

Já em uma interação química, as moléculas do adsorbato reagem com a superfície da zeólita e formam uma ligação, facilitando a adsorção. Em relação ao dióxido de carbono, ao entrar em contato com os átomos do grupo de metais alcalinos ou alcalino-terrosos presentes na zeólita, o gás pode realizar um processo reversível conhecido como carbonatação, onde carbonatos são formados nos poros do mineral e suas moléculas são armazenadas.

Figura 27 - Estrutura cristalina de uma zeólita



Fonte: ResearchGate (2015)

3.7.1.2 Dessorção do CO₂ nas Zeólitas

“Dessorção”, assim é chamado o processo de separação de um material absorvido ou adsorvido de seu absorvente ou adsorvente. Atualmente, os principais tipos de dessorção envolvem métodos baseados em variação térmica e variação de pressão. Porém, em alguns casos, há a possibilidade de separar os materiais com o uso de corrente elétrica.

A dessorção nas zeólitas em relação ao dióxido de carbono também pode ser chamada de "regeneração", devido à propriedade de recuperação da capacidade de adsorção do material após a separação do CO₂. Assim como os demais adsorventes, as zeólitas podem ser regeneradas a partir do aumento da temperatura, conhecido como "adsorção por variação de temperatura" (TSA), aumento da pressão, chamado de "adsorção por variação de pressão" (PSA) e, fazendo parte dos materiais que podem sofrer dessorção através da eletricidade, também pode realizá-la pela "adsorção por variação elétrica" (ESA). Esses processos, porém, podem reduzir a capacidade de coleta de gás carbônico, após alguns ciclos, já que são capazes de alterar a estrutura cristalina do mineral. Dentre os processos citados, o que menos reduz essa capacidade é o de adsorção por variação de pressão, já que não necessita de do aquecimento do material para acontecer, tornando a degradação de sua estrutura menos comum. Quanto aos outros métodos, é essencial utilizar a temperatura ou a corrente ideal, visando evitar essa perda.

3.7.1.2.1 Adsorção Por Variação de Temperatura

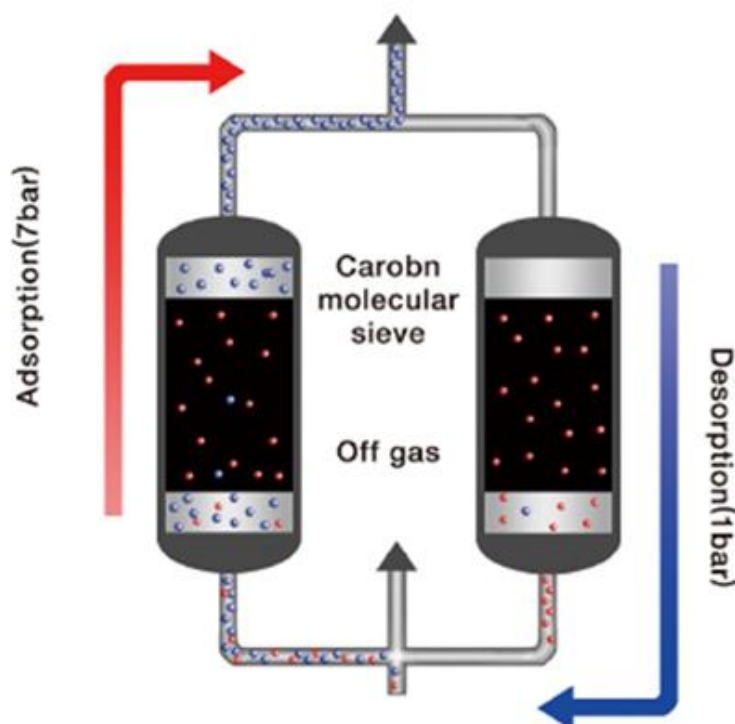
Nesse tipo de adsorção, após a captura do gás, que ocorre geralmente em temperaturas próximas à temperatura ambiente, um fluxo de ar, com temperatura que varia de 150°C a 250°C, é direcionado ao material adsorvente, aquecendo-o e realizando a remoção do gás capturado. Com o resfriamento do sistema, o material é finalmente regenerado e a adsorção pode acontecer novamente (Purcell, s.d).

3.7.1.2.2 Adsorção Por Variação de Pressão

Esse tipo envolve a variação da pressão anterior à adsorção. Com pressão elevada, a capacidade de captura de CO₂ pelas zeólitas é aumentada e, após o preenchimento total dessa capacidade, a pressão no sistema é reduzida, fazendo

com que o material capturado seja dispersado. Porém, essa operação não é altamente eficaz na remoção dos adsorbatos, sendo assim possível a utilização de um vácuo para reduzir a pressão a medidas inferiores às naturais. O processo citado é conhecido como "adsorção por variação de pressão a vácuo" (VPSA) (Purcell, s.d).

Figura 28 - Adsorção Por Variação de Pressão

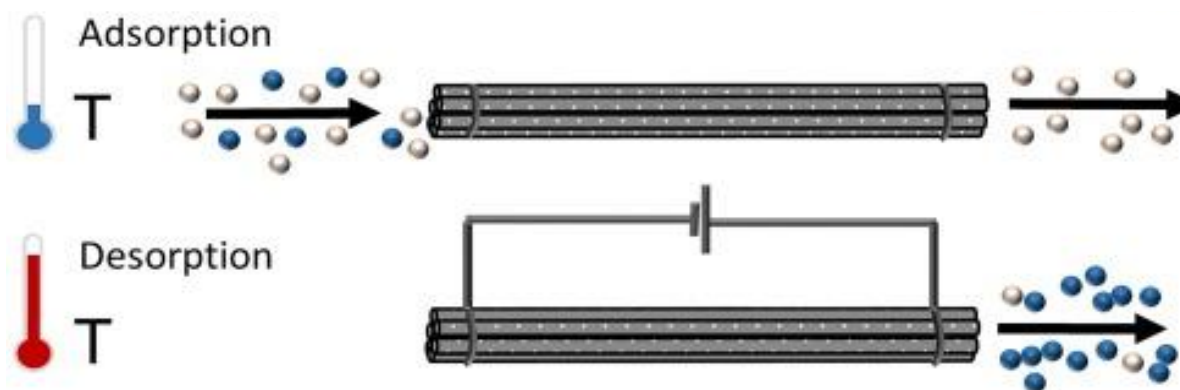


Fonte: Shirasagi (s.d)

3.7.1.2.3 Adsorção Por Variação Elétrica

Nesse processo, a regeneração se dá pelo aumento da temperatura do adsorvente através do efeito Joule, com a passagem de eletricidade, por um condutor, sendo, assim, similar à separação por variação de temperatura. Porém, apesar de ser mais rápido que o processo semelhante, pode reduzir o equilíbrio da capacidade de adsorção do material. Em conjunto com a baixa condutividade das zeólitas e as dificuldades estruturais de envolvê-las com um condutor adequado, essa característica torna a regeneração por variação elétrica menos eficiente que as demais. (Grande et. al., 2009).

Figura 29 - Adsorção Por Variação Elétrica



Fonte: ScienceDirect (2019)

3.7.1.2.4 Armazenamento do CO₂ após dessorção/Como coletar CO₂

Após a dessorção, o CO₂ precisa ser armazenado, já que, no processo, ele volta ao seu estado inicial. Para que isso ocorra, ele pode ser direcionado para um tanque de armazenamento, como um cilindro de gás comum e, para facilitar o transporte, pode-se utilizar uma bomba ou um compressor, para comprimí-lo. Além disso, o gás carbônico pode ser resfriado e comprimido, até que seja liquefeito, com o intuito de reduzir seu volume e armazená-lo em tanques criogênicos.

3.7.1.3 Zeólitas Naturais

As zeólitas naturais utilizadas hoje são, geralmente, de origem vulcânica, pois a maioria pode ser encontrada em rochas ígneas, formadas a partir do contato de cinzas e materiais vulcânicos com água, principalmente de lagos. Além disso, o fundo do oceano é rico em materiais desse tipo, porém a dificuldade de acesso a esses depósitos naturais torna a coleta pouco vantajosa. As mais comuns são: a analcima, chabazita, clinoptilolita, heulandita, natrolita, filipsita e estilbita.

Esses materiais possuem ampla aplicabilidade da separação de metais pesados de fluidos, solos, e de gases como a amônia, sendo utilizados na agricultura em tratamentos limitados desses gases. Em contrapartida, o tipo natural é de difícil uso na indústria, visto que seus usos dependem da formação cristalina de sua estrutura molecular, o que determina as propriedades de adsorção e sua utilidade prática, já que seus poros são, usualmente, pequenos demais, para a adsorção de gases com moléculas maiores. Ademais, depósitos naturais de zeólitas não são de fácil renovação, em razão do extenso período de tempo necessário para a formação das rochas que os originam (Król, 2020).

Figura 30 - Zeólita natural (chabazita)



Fonte: EARTH Magazine (2014)

3.7.1.4 Zeólitas Sintéticas

Zeólitas sintéticas têm ganhado cada vez mais espaço, como adsorventes e catalisadores, tendo em vista que, atualmente, há mais de cem tipos de zeólitas produzidas de forma artificial. Diferentemente das naturais, em condições laboratoriais, esses materiais podem ser obtidos em períodos curtos de tempo, com a recriação dos processos hidrotérmicos ocorridos nas formações rochosas que as originam, de forma sintética e controlada (Król, 2020). Nesse processo, tem-se controle sobre a formação estrutural do mineral produzido, permitindo a obtenção de zeólitas com propriedades específicas e mais propensas a determinados usos. Com isso, torna-se possível a formação de zeólitas com poros de maior diâmetro, uma vantagem sobre as naturais, visto que isso dá a elas a capacidade de adsorver moléculas maiores, aumentando, assim, a gama de aplicações.

Na indústria, zeólitas sintéticas possuem amplo potencial como catalisadoras na petroquímica e no refinamento de óleo, a partir do petróleo como matéria prima, sendo consideradas uma das maiores conquistas da química no século XX (Primo et al., 2014). Além disso, devido às propriedades adsorventes, são utilizadas na separação e purificação de gases pós-combustão, como o dióxido de carbono expelido das reações de queima. Junto a isso, algumas zeólitas são capazes de

adsorver moléculas de água, tendo uso na desidratação de etanol e outros combustíveis voláteis.

Figura 31 - Zeólita sintética (5A)



Fonte: Molecular Sieve Desiccant (s.d.)

3.8 COMPONENTES

3.8.1 Bateria

Figura 32 - Bateria Selada 6VCC 12Ah UNIPOWER UP6120



Fonte: Mundomax (2025)

3.8.2 Botão de Pulso

Figura 33 - Botão de pulso Modelo 36.127



Fonte: V&B DO BRASIL (2025)

3.8.3 Conector de Bateria Faston

Figura 34 - Conector de Bateria Faston



Fonte: Loja Elétrica (2025)

3.8.4 Controlador de Carga

Figura 35 - Controlador de carga solar PWM 10A



Fonte: Energysshop (2025)

3.8.5 Microventilador

Figura 36 - Microventilador 120mm x 120mm



Fonte: GP Chocadeiras (2024)

3.8.6 Módulo fotovoltaico

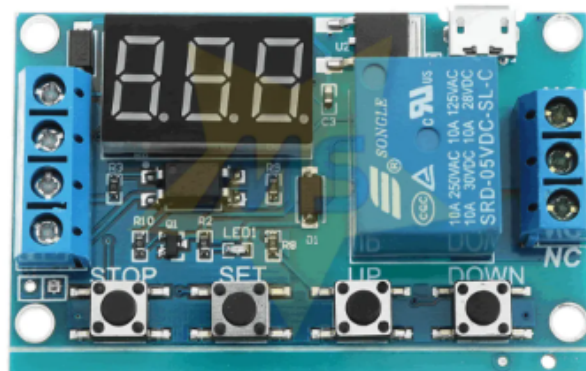
Figura 37 - Painel Fotovoltaico 18VCC 10W



Fonte: Energyshop (2025)

3.8.7 Módulo Temporizador

Figura 38 - Módulo Temporizador Digital Programável



Fonte: Marino Store (2024)

3.8.8 Zeólita 13X

Figura 39 - Peneira Molecular 13X



Fonte: MTE Group (2024)

4 EXPERIMENTOS ENVOLVENDO O FILTRO

4.1 TESTE DE ADSORÇÃO DA ZEÓLITA 13X EM CONDIÇÕES NORMAIS DE CONCENTRAÇÃO DE GÁS CARBÔNICO

4.1.1 Materiais

- Algodão;
- Faca;
- Fenolftaleína;
- Garrafa PET 2L;
- Microventilador de tensão alternada;
- Papel higiênico;
- Suporte para frascos químicos;
- 100g de zeólitas 13X.
-

4.1.2 Montagem

Inicialmente a garrafa foi cortada para retirar sua parte inferior, de forma que ficasse aberta. Em sequência, foi encaixada, virada para baixo, em um suporte comumente utilizado para frascos químicos. Assim, foi possível colocar uma porção adequada de algodão na boca da garrafa, com o objetivo de que o ar possa sair mas os minerais não. Finalmente, as zeólitas 13X foram apoiadas no algodão e, com mais suportes, o microventilador foi posicionado acima, mas de modo a empurrar o ar para dentro do recipiente. Ademais, guardou-se uma pequena quantidade de zeólitas, a fim de mantê-las como amostras brancas.

Figura 40 - Estrutura do experimento



Fonte: os autores (2025)

4.1.3 Funcionamento

Com tudo devidamente preparado, o experimento foi iniciado ao ligar o microventilador na tomada, fazendo com que ele gerasse um fluxo de ar capaz de passar pelas zeólitas, pelo algodão e sair pela boca da garrafa. Durante isso, algumas moléculas de dióxido de carbono se prendem nos poros dos minerais, sendo esse processo denominado adsorção.

Cerca de 30 minutos depois, foram colocadas duas zeólitas que receberam fluxo de ar e uma zeólita que era amostra branca em uma superfície clara, nesse caso, em sobre uma folha de papel higiênico. Logo após, pingou-se um pouco de fenolftaleína em ambas, o que fez com que reagissem.

Em um primeiro momento, todas estavam idênticas: apresentavam poucos pontos rosa. Entretanto, após assoprar uma delas, feito que gerou fluxo de ar e aumentou a concentração de CO₂ próximo do mineral, ela se mostrou notavelmente mais rosada.

Figura 41 - Funcionamento do experimento



Fonte: os autores (2025)

4.1.4 Resultados obtidos

Diante dos dados obtidos, inicialmente, concluiu-se que as zeólitas tinham, de fato, a capacidade de capturar CO₂ nos seus poros, bem como a fenolftaleína poderia tornar isso visível. Porém, testes futuros com a mesma substância mostraram divergências, levando a dúvidas sobre o funcionamento da reação, já que se descobriu que a fenolftaleína não reage diretamente com o dióxido de carbono, e sim com meios básicos.

Figura 42 - Amostra de zeólita 13X com fenolftaleína



Fonte: os autores (2025)

4.2 TESTE DE ADSORÇÃO DA ZEÓLITA 13X EM ALTA CONCENTRAÇÃO DE CO₂

4.2.1 Materiais

- Ácido acético;
- Algodão;
- Balança precisa;
- Bicarbonato de sódio;
- Fenolftaleína;
- Garrafa PET 2L;
- Papel higiênico;
- Suporte para frascos químicos;
- Vasilha;
- 100g de zeólitas 13X.

4.2.2 Montagem

Foi montada uma estrutura improvisada com suporte para frascos químicos, um funil de vidro, uma vasilha e uma garrafa pet cortada e furada, que foi reutilizada da prática anterior. Assim, passou-se um funil pela boca da garrafa, colocando nela, portanto, uma porção de algodão, de forma a evitar o mergulho dos minerais adsorventes. Na vasilha, abaixo da estrutura, foi preparada uma solução com bicarbonato de sódio e ácido acético que, por sua vez, além de liberar altas quantidades de gás carbônico, o direciona, dispensando o uso de um microventilador.

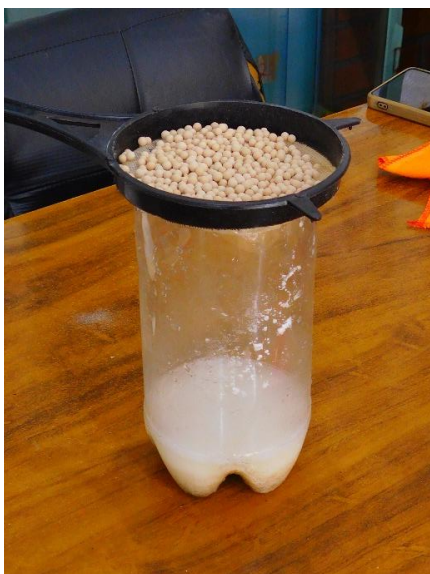
Figura 43 - Estrutura montada para a realização do experimento



Fonte: os autores (2025)

Outro modelo físico também foi feito para a realização do teste. Sendo que, foi montado com a base de uma garrafa pet de 2L, no qual derramou-se a solução libertadora de CO₂ com uma peneira de cozinha sobreposta, parte onde iam as zeólitas. Semelhante ao modelo anterior, neste, o ar também apresenta fluxo direcionado para cima gerado pela mistura.

Figura 44 - Segunda estrutura utilizada no teste

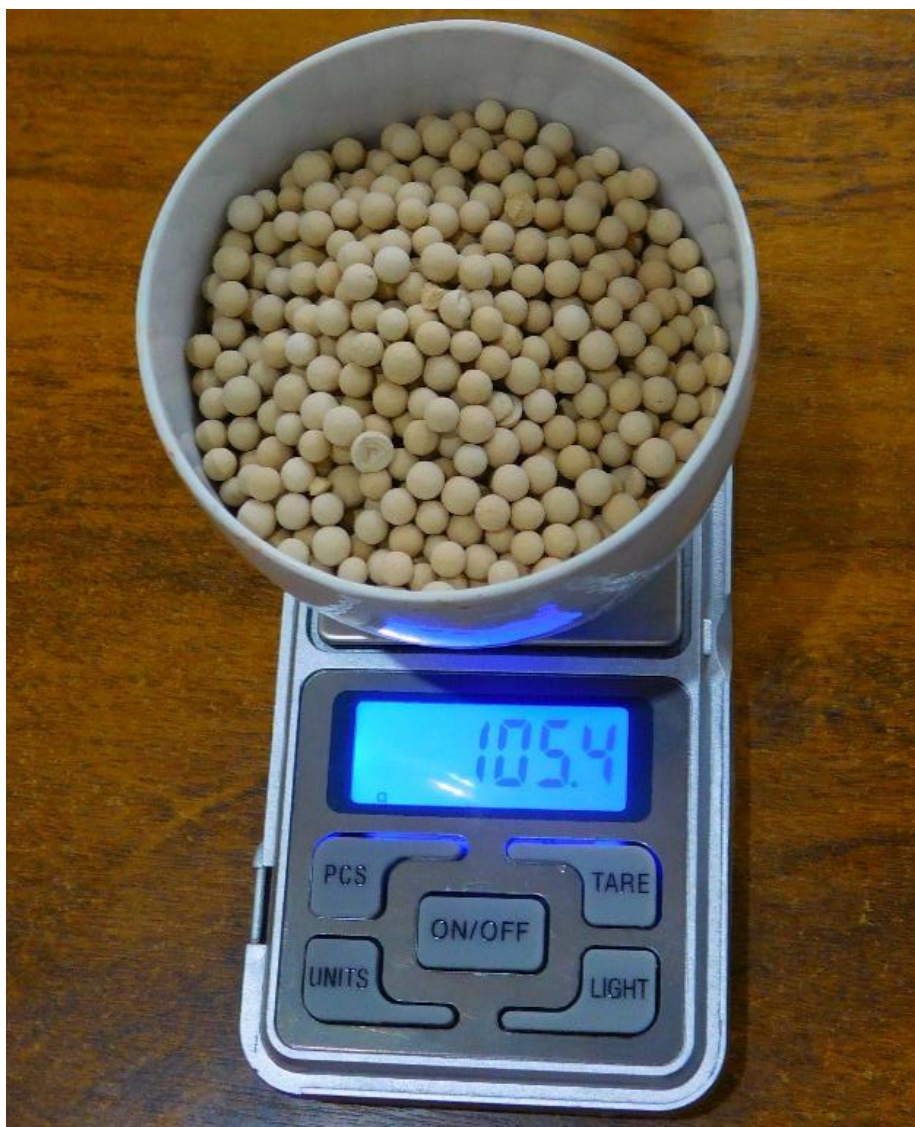


Fonte: os autores (2025)

4.2.3 Funcionamento

Antes de tudo, a balança foi configurada e a massa das zeólitas, que já passaram por um experimento anteriormente, foi medida após elas serem colocadas em uma vasilha, resultando em 105,4g.

Figura 45 - Zeólitas em uma vasilha posicionada sobre uma balança, demarcando 105,4g



Fonte: os autores (2025)

Continuamente, a preparação da solução demarca o início do teste, devido ao CO₂ liberado passar pelas zeólitas e a adsorção começar a ocorrer. O teste é de suma importância pois possibilita uma análise mais precisa do comportamento dos minerais no ambiente com concentrações mais altas desse gás, simulando o uso em uma área mais industrializada.

28 min depois, as zeólitas foram postas novamente no recipiente a fim de medi-las novamente e, ademais, algumas passaram por um teste com fenolftaleína sobre uma folha de papel higiênico. Suas propriedades adsorventes, a princípio, deveriam ser notadas através do aumento de sua massa, e/ou pela alteração de sua cor ao entrar em contato com a substância reagente, mas, diferentemente do que se esperava, elas ainda constavam 105,4g e mantinham a mesma cor.

Então, objetivando uma maior eficiência, a estrutura foi alterada. Com base nisso, a nova estruturação (Figura 43) permite que o gás carbônico passe mais facilmente pelas pequenas pedras, já que não há algodão bloqueando parte do ar que sobe. Cerca de 30 minutos após, as zeólitas apresentaram o mesmo resultado de antes da troca de recipiente.

4.2.4 Resultados obtidos

Ao fim do experimento, constatou-se o mantimento, tanto da coloração normal da zeólita, mesmo após a aplicação de fenolftaleína, quanto da sua massa. Em relação à massa, concluiu-se que a falta de aumento nos valores encontrados indica a saturação da amostra, tornando necessária a dessorção do dióxido de carbono capturado para a realização de novos testes. Já a respeito da falta de coloração rosada após a aplicação da fenolftaleína, que em meio ácido (PH menor que 7) absorve todas as cores e em meio com PH maior que 7 reflete somente a cor rosa, tem-se como explicação mais plausível a ausência de reações químicas na captura de CO₂ por zeólitas, que não alteram a composição química do gás, mantendo seu baixo PH e, por consequência, não formam um elemento reagente à fenolftaleína.

Figura 46 - Zeólitas com a mesma cor, mesmo após terem passado por um teste com fenolftaleína



Fonte: os autores (2025)

4.3 TESTE DE DESSORÇÃO DA ZEÓLITA 13X UTILIZANDO AR QUENTE

4.3.1 Materiais

- Secador de cabelo;
- 2 Recipientes;
- Balança precisa;
- 100g de zeólitas 13X.

4.3.2 Montagem

Colocou-se as zeólitas em um recipiente grande e fundo para que fosse possível aquecê-las da melhor maneira.

4.3.3 Funcionamento

Com o recipiente preparado, ligou-se o secador de cabelos diretamente nos minerais adsorventes, com o intuito de que o fluxo de ar quente separasse as moléculas de CO_2 dos poros deles. A partir disso, realizou-se a medição de massa com o auxílio de um copo plástico, importante para que o peso das zeólitas se distribua por toda a superfície útil da balança.

4.3.4 Resultados obtidos

No total, foram realizadas dez medições com as amostras, em um intervalo de dois dias e com a efetuação de testes de dessorção, adsorção ao ar livre e adsorção

com fluxo de ar. Para os tempos de repouso, as amostras foram colocadas em um saco plástico e em potes com tampa. Já para a ventilação, foi utilizado um ventilador de mesa.

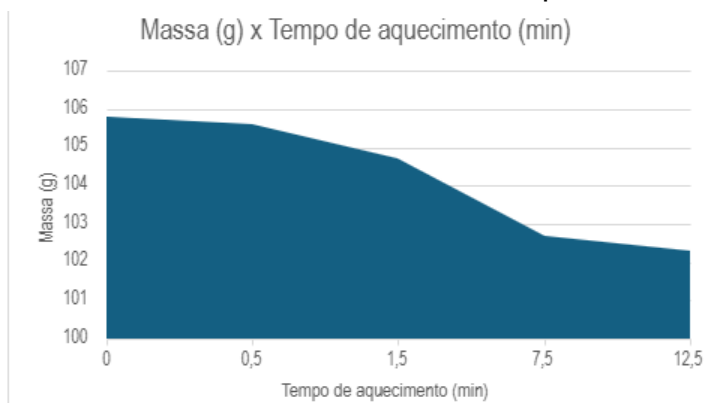
Figura 47 -Tabela dos resultados obtidos no experimento de dessorção

Condição	Duração	Total	Massa
Repouso			105,4g
Aquecimento	30seg	30seg	105,6g
Aquecimento	1min	1,5min	104,7g
Aquecimento	3min	4,5min	102,7g
Aquecimento	5min	9,5min	102,3g
Ar livre	2h	2h	103,5g
Repouso	24h	24h	104,2g
Aquecimento	5min	5min	103,3g
Repouso	20min	20min	103,5g
Ventilação	25min	25min	104,6g
Aquecimento	5min	5min	103,5g

Fonte: Os autores (2025)

Com a análise dos resultados, pôde-se concluir que, a partir do aquecimento, as zeólitas apresentaram uma massa ligeiramente menor, recuperando essa perda após a ventilação, seja por um fluxo de ar direcionado, ou pelo contato direto com o ar. Essa perda não foi recuperada, porém, nos intervalos de repouso em potes fechados. Os dados, portanto, reforçam os estudos feitos acerca das propriedades de adsorção, por conta da estrutura molecular da amostra, com o aumento da massa após a ventilação indicando a presença de gás carbônico na estrutura interna das zeólitas, assim como sua ausência após a diminuição da massa pela dessorção.

Figura 48 - Gráfico dos resultados obtidos no experimento de dessorção



Fonte: Os autores (2025)

5 METODOLOGIA

5.1 TIPO DE PESQUISA

A pesquisa do projeto se demonstrou de caráter explicativo. De acordo com Gil (2002, p. 45) “Essas pesquisas têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Esse é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas”. A obtenção de dados e informações se deu pela análise de trabalhos e artigos de outros pesquisadores sobre assuntos relacionados ao uso de zeólitas na adsorção, assim como às emissões e captura de gases de efeito estufa, principalmente acerca do gás carbônico, revelando características de uma pesquisa qualitativa, focada em apresentar os fatos estudados, explicando o funcionamento dos materiais analisados, além de abordar e analisar dados estatísticos e, portanto, explicar e comprovar a eficácia dos minerais porosos na coleta de gases e os efeitos das mudanças climáticas no planeta, demonstrando traços de uma pesquisa quantitativa. Com isso, a pesquisa apresentou caráter quali-quantitativo, com a mistura das duas abordagens em diferentes assuntos e com objetivos distintos.

5.2 FUNÇÃO DOS COMPONENTES

5.2.1 Bateria

Serão usadas duas baterias de 6VCC, em série, com capacidade de 12Ah, resultando, assim, em uma tensão de 12VCC. A bateria terá o propósito de armazenar a energia captada pelo módulo fotovoltaico, para uso em momentos em que não há forte incidência de luz, como em dias nublados ou à noite, ao mesmo tempo em que leva parte dessa energia para o restante do dispositivo. No mais, devido às suas características, as baterias escolhidas são capazes de manter o funcionamento do dispositivo por até 44h, em casos onde não há incidência solar, se mostrando úteis para o projeto que, por sua vez, tem o tempo delimitado em 5h de uso por conta de fatores filtrantes. Fórmula para descobrir o tempo de duração do circuito com base nas baterias:

$$T = \frac{I_{bateria}}{I_{carga}}$$

5.2.2 Botão de Pulso

O botão acionará o módulo temporizador, por meio de um pulso, de modo iniciando sua contagem, sendo que, por conta deste estar programado no modo P1.3, caso receba um segundo pulso, ele parará de contar e desligará a alimentação para o microventilador. Dessa forma, o componente serve de “Trigger” para o temporizador.

5.2.3 Conector de Bateria Terminal Faston

O conector de bateria tipo Faston será utilizado para fazer a ligação elétrica segura e rápida entre a bateria e os demais componentes do protótipo. Ele facilita a montagem e manutenção do sistema, garantindo uma conexão firme, confiável e de fácil manuseio.

5.2.4 Controlador de carga

O controlador de carga é o responsável por direcionar a energia elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico até as baterias, e também por conduzir a energia necessária para os demais componentes. Sua função é evitar sobrecargas e descargas profundas, protegendo a bateria e garantindo maior vida útil ao sistema, além de reduzir a tensão de 18V recebida do módulo fotovoltaico para 14V, permitindo a recarga da bateria, e entregar apenas 12V para o restante do circuito, atingindo a tensão ideal para a ligação do módulo temporizador e do microventilador. Junto a isso, ele indica, no seu visor, a geração de energia por parte do módulo fotovoltaico, assim como a conexão com as baterias.

5.2.5 Microventilador

O microventilador, de 12VCC e 0,2A, será responsável por direcionar o ar para o interior do dispositivo, aumentando assim o fluxo de ar que passará pelo filtro e, conseqüentemente, a eficiência do projeto.

5.2.6 Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico de 18VCC e 10W alimentará a bateria com o uso da luz solar captada, proporcionando uma fonte de energia sustentável ao circuito.

5.2.7 Módulo Temporizador

A função do módulo temporizador no dispositivo é interromper a circulação de corrente elétrica para o ventilador, desligando o equipamento, após um tempo previamente determinado. Portanto, uma forma simples de desligar o microventilador, quando o filtro tiver sua capacidade máxima atingida, de acordo com o tempo que zeólita leva para isso.

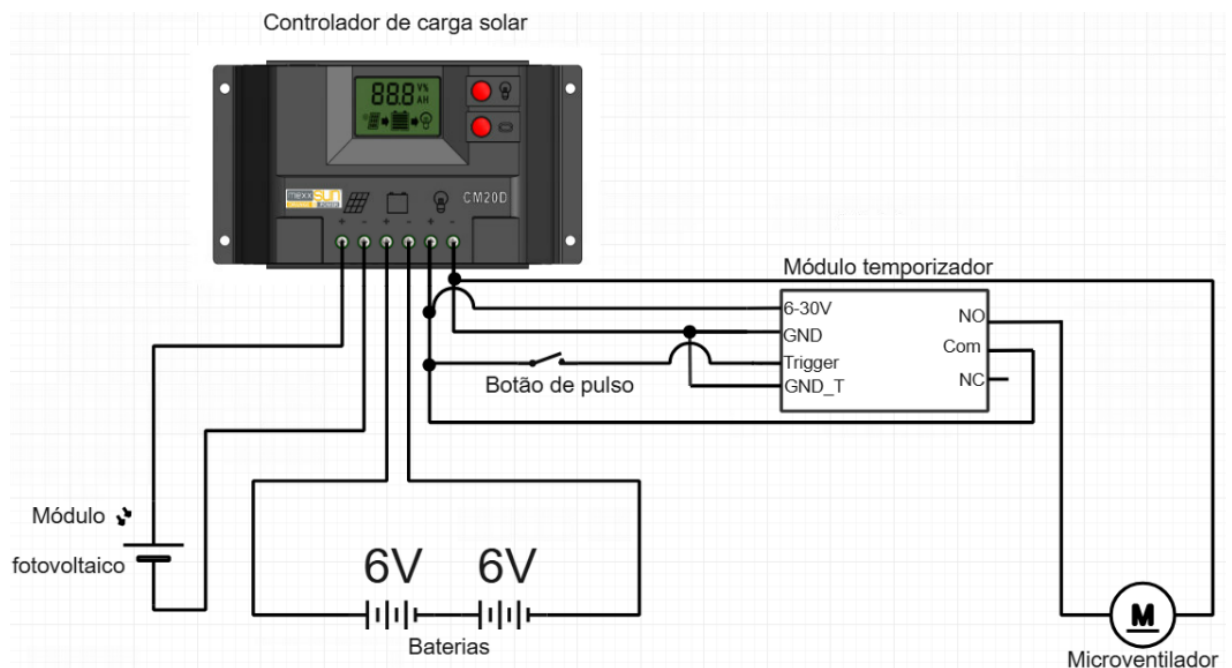
5.2.8 Zeólitas

As zeólitas são os materiais responsáveis por capturar o gás carbônico presente no ar direcionado ao filtro. Suas características adsorventes permitem que o CO₂ seja posteriormente separado e armazenado.

5.3 ESQUEMA ELÉTRICO

5.3.1 Diagrama do circuito

Figura 49 - Esquema elétrico



Fonte: Wondershare EdrawMax (2025)

5.3.2 Funcionamento

O módulo fotovoltaico capta a energia solar e a transforma em energia elétrica, entregando 18V ao controlador de carga. Deste, a tensão tem seu valor reduzido para, aproximadamente, 14V, o necessário para a recarga das baterias, e a corrente é conduzida a elas. Com isso, o controlador reduz novamente a tensão, dessa vez para cerca de 12V, e conduz a corrente ao restante do circuito.

O módulo temporizador, acionado pelo botão de pulso, interrompe a passagem da corrente ao microventilador, no fim do tempo previamente determinado.

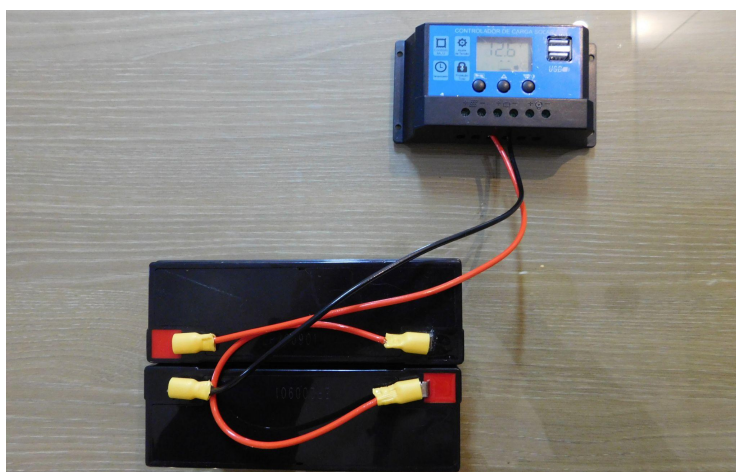
5.3.2.1 Ação do controlador de carga solar

O controlador de carga recebe a energia solar convertida em energia elétrica, regula a tensão, dependendo da finalidade, recarrega as baterias e conduz sua energia para o restante do circuito.

5.3.2.2 Montagem do controlador de carga solar

- Baterias postas em série;
- Terminais positivo e negativo do conjunto de baterias conectados aos seus respectivos polos nos terminais de carga de bateria do controlador;
- Terminais positivo e negativo do módulo fotovoltaico conectados aos seus respectivos polos nos terminais de carga solar do controlador;
- Restante do circuito conectado aos terminais de saída de carga do controlador.

Figura 50 - Ligação das baterias



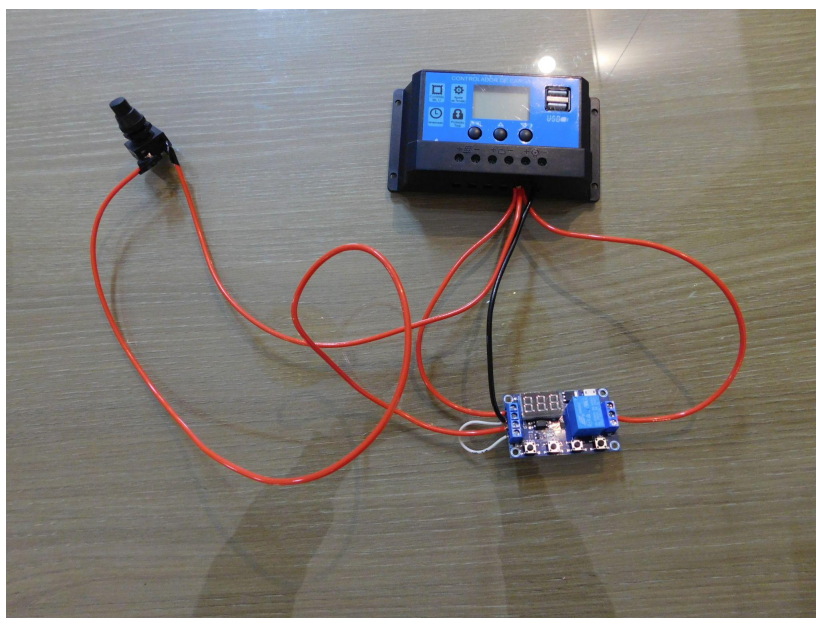
Fonte: Os autores (2025)

Figura 51 - Ligação do módulo fotovoltaico



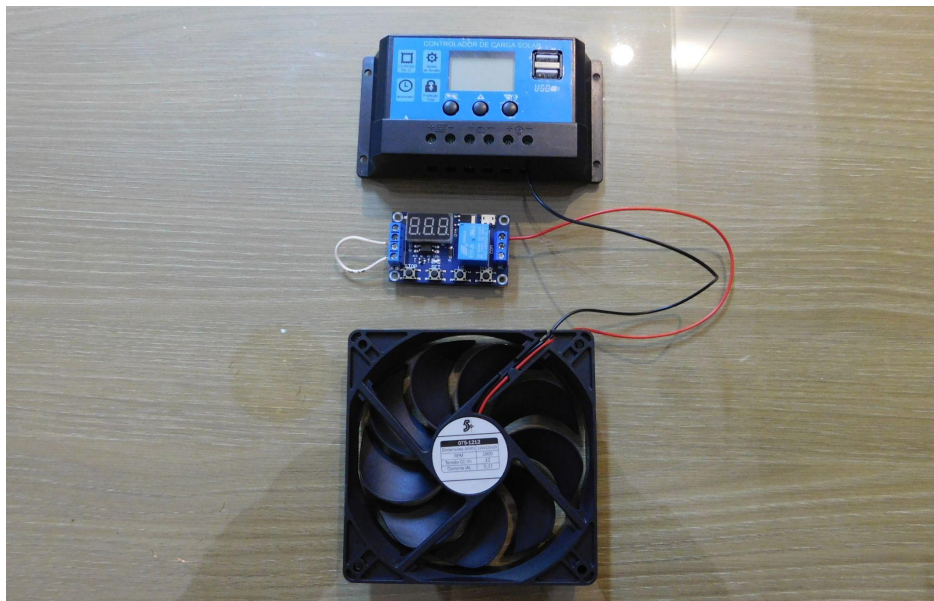
Fonte: Os autores (2025)

Figura 52 - Ligação do módulo temporizador



Fonte: Os autores (2025)

Figura 53 - Ligação do microventilador



Fonte: Os autores (2025)

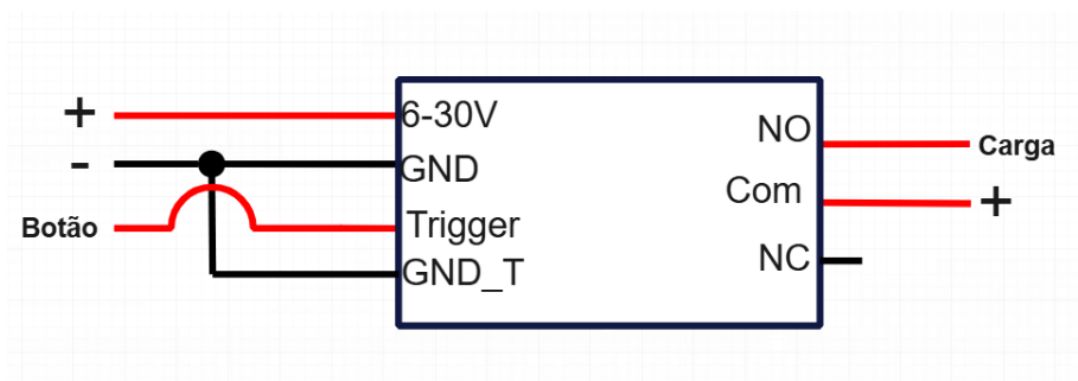
5.3.2.3 Ação do módulo temporizador

O módulo temporizador possui diversos modos de funcionamento, que definem a atuação do “Trigger” na sua ativação e desativação. Para o atual protótipo, será utilizado o modo P1.3 que, com o recebimento de um sinal do botão de pulso, inicia a contagem do tempo e ativa o relé do temporizador, de modo a comutar os contatos de saída, fechar o contato normalmente aberto e, por consequência, ativar o microventilador. Ao pressionar o botão novamente, o módulo, junto ao microventilador, é desligado, e o tempo reinicia.

5.3.2.4 Montagem do módulo temporizador

- Terminal “6-30V” conectado ao positivo do controlador de carga;
- Terminal “GND” conectado ao negativo do controlador de carga;
- Terminal “Trigger” conectado ao positivo do controlador de carga, com o botão de pulso como interruptor;
- Terminal “Com” conectado ao positivo do controlador de carga;
- Terminal “NO” conectado ao positivo do microventilador.

Figura 54 - Esquema de ligação do módulo temporizador



Fonte: Wondershare Edrawmax (2025)

6 CRONOGRAMA

Tabela 3 - Cronograma de 2024

2024	MA R	ABR	MAI	JUN	JUL	AG O	SET	OU T	NO V
Escolha do tema	X								
Levantamento de literatura científica	X	X	X	X	X				
Introdução			X						
Tema		X							
Problema		X							
Objetivos		X							
Justificativa			X						
Estado da Arte					X				
Fundamentação teórica						X			
Metodologia						X			
Cronograma					X				
Recursos					X				
Resultados esperados ou parciais						X			
Referências		X	X						
Avaliação do CRC								X	
Produção do Banner								X	
26ª Exposchmidt									X

Fonte: os autores (2024)

Tabela 4 - Cronograma de 2025

2025	MA R	ABR	MAI	JUN	JUL	AG O	SET	OU T	NO V
Levantamento de literatura científica	X	X							
Doação de Zeólitas 13X	X								
Fundamentação Teórica	X	X			X				
Experimento 1		X							
Lista de figuras		X	X		X				
Lista de tabelas		X	X		X				
Lista de siglas		X	X		X				
Experimento 2			X						
Dimensionamento do esquema elétrico			X						
Compra do controlador de carga			X						
Compra do módulo fotovoltaico			X						
Doação de baterias			X						
Experimento 3				X					
Referências				X	X		X		
Compra do relé temporizador				X					
Doação do microventilador				X					
Construção do modelo 3D				X	X		X		
Compra do botão de pulso					X				

2025	MA R	ABR	MAI	JUN	JUL	AG O	SET	OU T	NO V
Compra de cabos com bitola 1,5mm ²					X				
Montagem do circuito elétrico completo					X				
Cronograma					X				
Resultados					X				
Considerações finais					X				
Compra da estrutura do projeto em acrílico							X		
Produção do banner							X		
Montagem da estrutura do projeto							X		
13ª IFCITEC							X		
Avaliação do CRC						X	X		
27ª Exposchmidt									X

Fonte: os autores (2025)

7 RECURSOS

Tabela 5 - Recursos

Material	Valor unitário	Quantidade	Valor total	Fonte	Data
Zeólita 13X	R\$ 00,00	100g	R\$ 00,00	Doação	27/03/2025
Controlador de carga solar PWM 10A	R\$ 49,99	1 Unid.	R\$ 49,99	Mercado Livre	09/05/2025
Módulo Fotovoltaico 18VCC 10W	R\$ 78,99	1 Unid.	R\$ 78,99	Mercado Livre	09/05/2025
Módulo Temporizador	R\$ 29,80	1 Unid.	R\$ 29,80	Mercado Livre	09/05/2025
Bateria 6VCC 12Ah	R\$ 00,00	2 Unid.	R\$ 00,00	Doação	29/05/2025
Microventilador 120mm x 120mm	R\$ 00,00	1 Unid.	R\$ 00,00	Doação	20/06/2025
Conector de Bateria Terminal Faston	R\$ 1,28	4 Unid.	R\$ 5,12	Shopee	01/07/2025
Botão de Pulso Modelo 36.127	R\$ 24,50	1 Unid.	R\$ 24,50	V&B DO BRASIL	03/07/2025
Estrutura/Carçaça em chapas de acrílico	R\$ 456,00	1 Unid.	R\$ 456,00	Cooper Acrílicos	08/09/2025
Valor final: R\$644,40					

Fonte: os autores (2025)

8 RESULTADOS

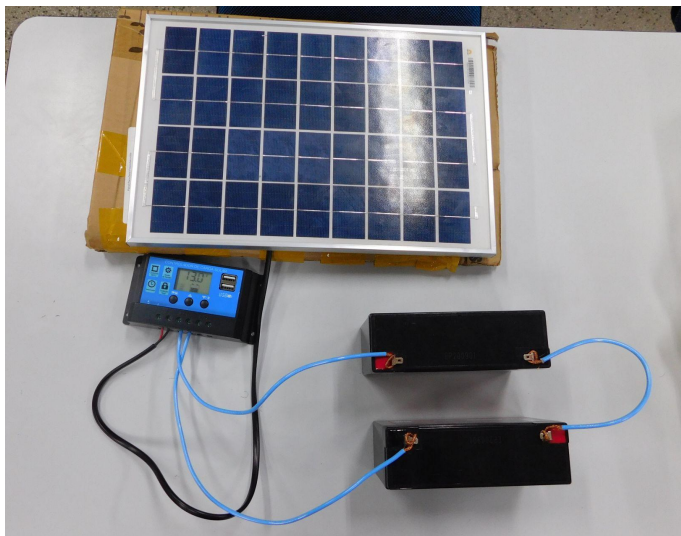
8.1 PESQUISA

Com base na pesquisa acerca das propriedades, eficiência, usos e limitações dos minerais adsorventes, conjuntamente aos testes de adsorção e dessorção realizados ao longo do desenvolvimento do projeto, obteve-se a confirmação, estatística e visual, da propriedade das zeólitas de coletar o gás carbônico diretamente de um fluxo de ar atmosférico, assim como a possibilidade de retirada do gás de sua estrutura molecular através da passagem de ar quente, com a massa aumentando e diminuindo, conforme o objetivo do teste. Ademais, mesmo após 16 medições pós-teste, incluindo os dois processos, as faixas de massas mínimas e máximas encontradas se mantiveram as mesmas, demonstrando sua capacidade de regeneração e evidenciando uma vantagem de seu uso como elemento filtrante, ainda que, segundo os estudos já apresentados, essa capacidade tenha a tendência de diminuir ao longo de processos posteriores.

8.2 PROTÓTIPO

A partir da aquisição do módulo fotovoltaico, do controlador de carga e das baterias, vindas de uma doação, tornou-se executável o primeiro teste de ligação do circuito. Com os componentes devidamente conectados e as baterias ligadas em série, para que as tensões fossem somadas, foi possível identificar sua detecção pelo controlador de carga, que indicava a conexão e a tensão recebida em seu visor, assim como a identificação da sua recarga, com uma tensão de aproximadamente 14V, advinda do módulo fotovoltaico. Inicialmente, a tensão recebida pelas baterias, de 6V cada, totalizava 13V, revelando diferença de potencial maior do que o esperado, decorrente de uma das baterias. Posteriormente, esse excesso de tensão foi reduzido. Em vista da ausência dos componentes a serem alimentados pelo sistema, não foi possível realizar testes precisos na saída de carga do controlador.

Figura 55 - Primeiro teste de ligação



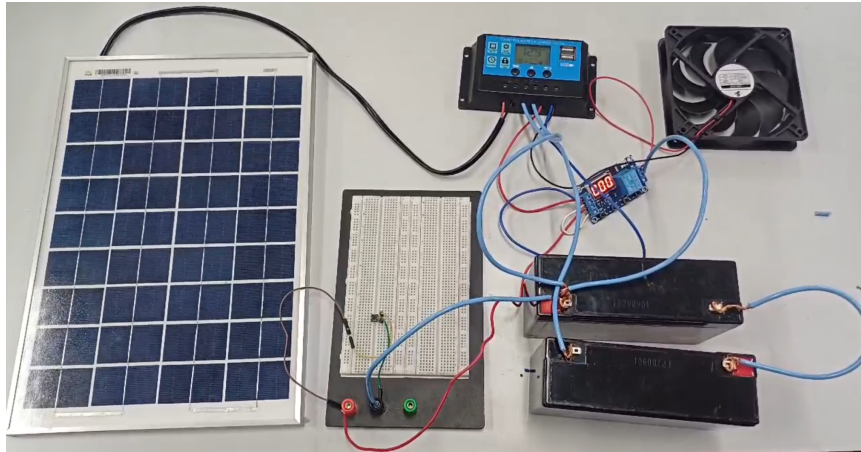
Fonte: Os autores (2025)

Em uma data posterior ao primeiro teste do circuito, foi doado ao grupo o microventilador necessário para a sequência da montagem do protótipo, o que permitiu a efetuação do próximo teste, revelando a confirmação da eficácia do controlador de carga em levar ao sistema a tensão das baterias, mesmo enquanto elas são alimentadas por uma tensão de 14V.

Como componente de medição e controle do tempo de funcionamento do dispositivo, foi escolhido o módulo relé temporizador, configurado para iniciar o sistema e a contagem do tempo ao recebimento de um pulso elétrico, desligando o circuito e reiniciando a contagem no caso do envio de um segundo pulso. No início dos testes com a adição do temporizador, encontrou-se uma dificuldade em efetuar sua ligação com o restante do circuito, em detrimento dos diversos terminais encontrados no componente, junto à divergência de informações nos manuais encontrados com pesquisas na internet. Porém, dentro de alguns dias, com a ajuda de profissionais da área da eletrônica e automação, foi descoberta a forma de ligação correta, permitindo o primeiro teste temporizado do protótipo.

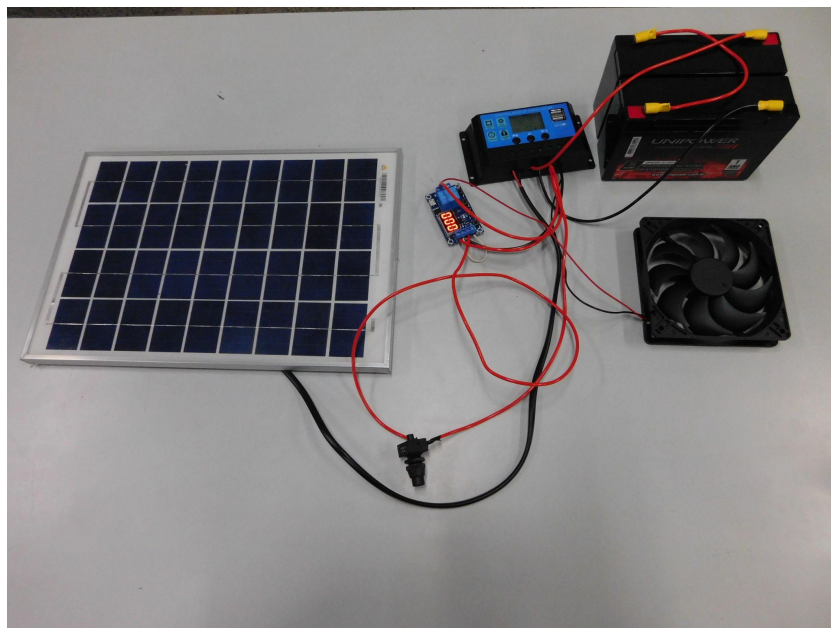
Devido à falta do botão de pulso, foi realizada a ligação do relé com um pulso proveniente de um botão tátil, conectado ao conjunto através de uma protoboard. Porém, posteriormente, foi implementado o botão ideal para o sistema, assim como condutores de cores padronizadas, para melhor identificação das polaridades, e conectores para as baterias, entregando uma maior facilidade na montagem.

Figura 56 - Teste de ligação com adição do módulo temporizador



Fonte: Os autores (2025)

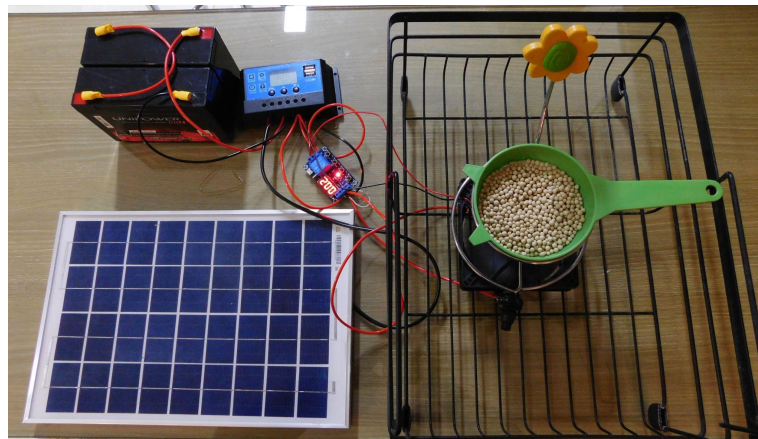
Figura 57 - Teste de ligação com adição do botão



Fonte: Os autores (2025)

Eventualmente, foram realizados testes de adsorção, juntando os componentes elétricos do protótipo com o elemento filtrante, posto em um filtro improvisado, o que permitiu a passagem de ar atmosférico pelas zeólitas, em um fluxo direcionado, advindo do microventilador. Dessa forma, tendo em vista que usou-se dos componentes corretos em situações possíveis de uso do projeto, pôde-se estimar a massa de CO₂ coletada dentro do tempo delimitado previamente para o funcionamento do dispositivo.

Figura 58 - Teste de adsorção com filtro improvisado



Fonte: Os autores (2025)

Os testes foram efetuados ao longo de, aproximadamente, quatro horas e meia, após um prévio processo de dessorção, que teve o objetivo de retirar das zeólitas o gás carbônico coletados nos testes anteriores. No período entre a dessorção e o primeiro teste de adsorção, a medição de massa dos minerais indicava 102,4g, sendo essa a menor massa registrada nas análises da amostra, desde o início do projeto. Ao final do teste, com a passagem constante de ar pelo filtro, exceto pelos curtos períodos de medição, a amostra registrou uma massa de 105,7g, trazendo dificuldades para elevar esse número até o fim dos testes. Em vista disso, definiu-se um tempo de funcionamento recomendado de cinco horas até a troca do filtro, tendo o módulo temporizador como responsável por desligar o circuito após esse período.

Figura 59 - Tabela do teste de adsorção

Condição	Duração	Total	Massa
Repouso			102,4g
Ventilação	10min	10min	103,8g
Ventilação	10min	20min	104,5g
Ventilação	10min	30min	105g
Ventilação	30min	60min	105,5g
Ventilação	60min	120min	105,7g
Ventilação	60min	180min	105,7g
Ventilação	80min	260min	105,7g

Fonte: Os autores (2025)

Apesar da boa performance do circuito e filtro, a estrutura externa do protótipo é de extrema relevância para o projeto. Isso porque, além de garantir a proteção dos principais componentes, auxilia no direcionamento do fluxo de ar oriundo do microventilador. Vale ressaltar que, tendo em vista que ele deve ser apresentar resistência à água e ações do tempo, o material selecionado para sua composição foi o acrílico transparente.

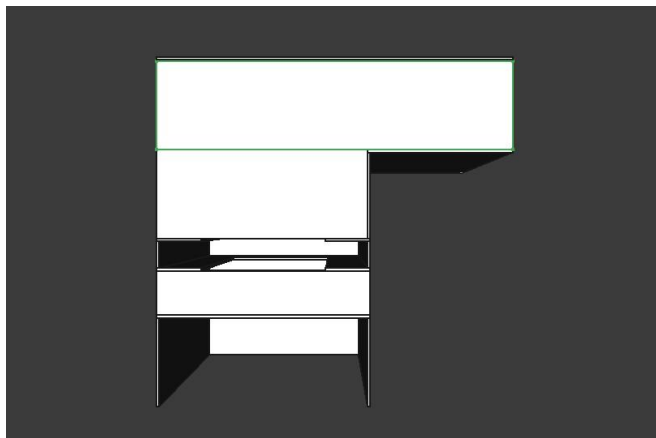
Baseando-se nisso, foi elaborado um modelo 3D que demonstra como planeja-se moldar a carcaça do dispositivo, tendo, portanto, três partes principais: um espaço para o alojamento dos componentes elétricos, um para o microventilador e um compartimento para a inserção das zeólitas.

Figura 60 - Modelo 3D sem filtro



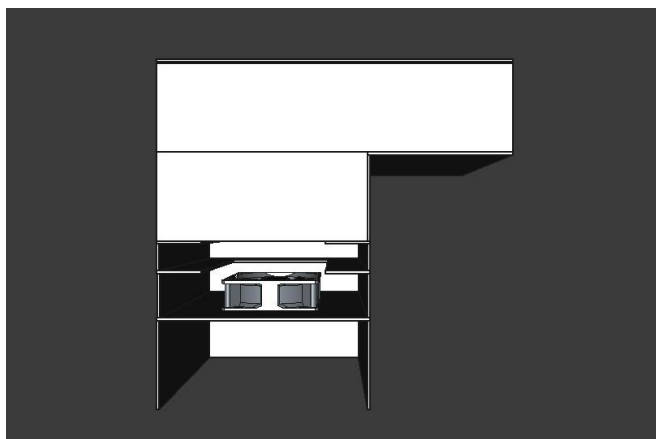
Fonte: Os Autores (2025)

Figura 61 - Vista frontal do modelo 3D



Fonte: Os Autores (2025)

Figura 62 - Vista frontal com visão para o acoplamento do microventilador no modelo 3D



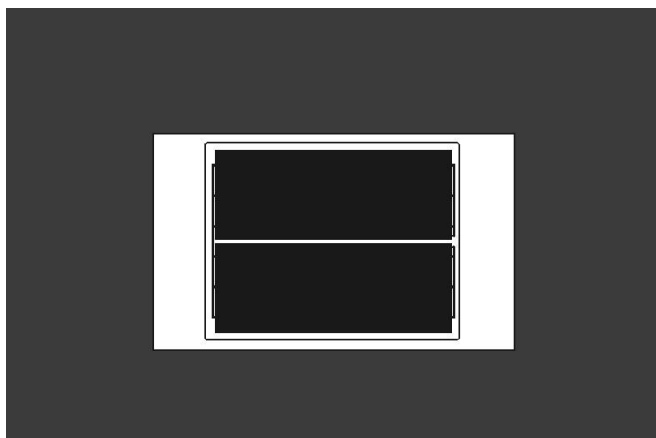
Fonte: Os Autores (2025)

Figura 63 - Vista frontal com visão interna do modelo 3D



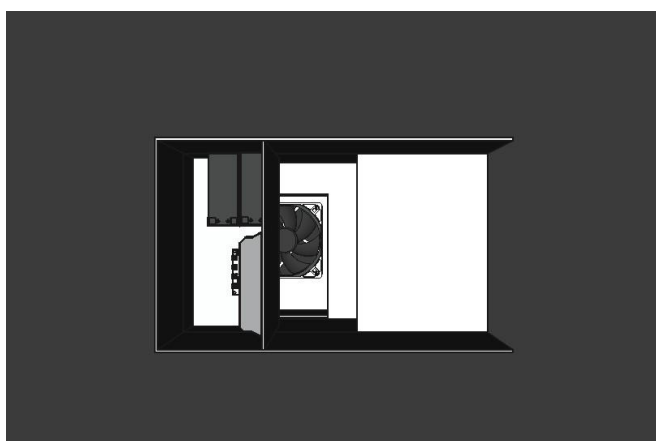
Fonte: Os Autores (2025)

Figura 64 - Vista superior com topo, demonstrando o posicionamento do módulo fotovoltaico no modelo 3D



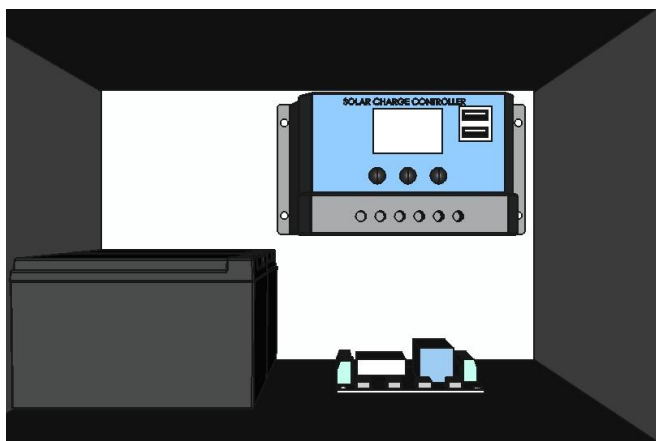
Fonte: Os Autores (2025)

Figura 65 - Vista superior sem topo do modelo 3D



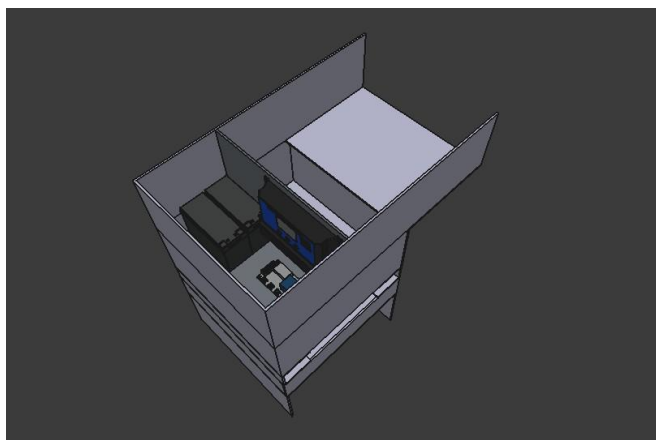
Fonte: Os Autores (2025)

Figura 66 - Vista lateral esquerda do espaço para componentes do modelo 3D



Fonte: Os Autores (2025)

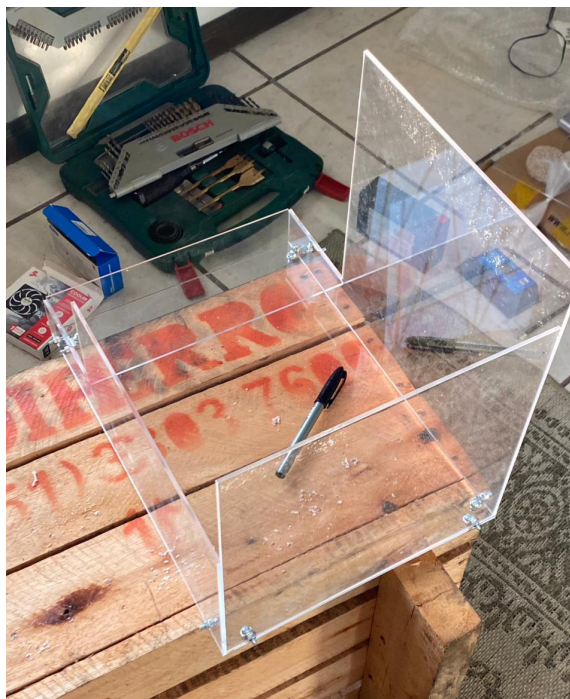
Figura 67 - Vista superior com acesso ao compartimento de componentes no modelo 3D



Fonte: Os Autores (2025)

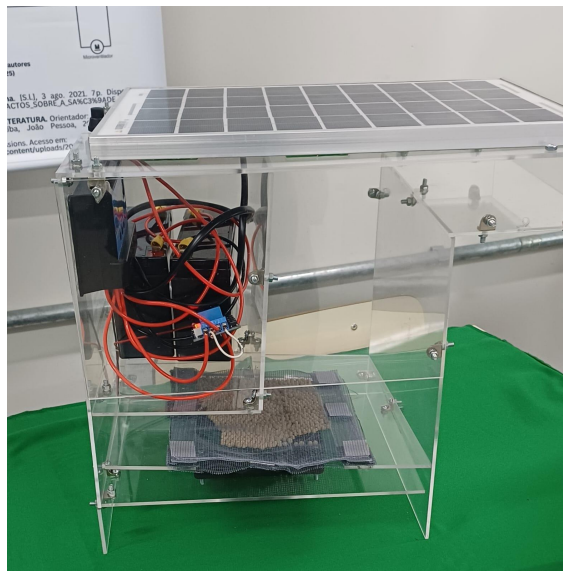
E assim foi montada a estrutura que, apesar de se assemelhar ao planejado, acabou por sofrer alterações devido a questões de facilidade na abertura para manutenção e melhora na rigidez das junções.

Figura 68 - Montagem da estrutura



Fonte: Os Autores (2025)

Figura 69 - Protótipo na XIII IFCITEC

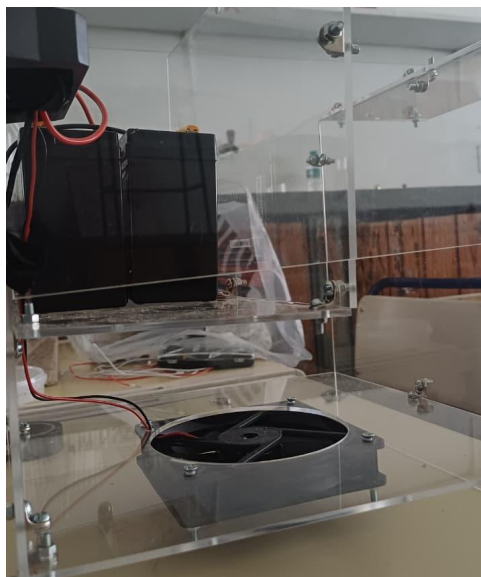


Fonte: Os Autores (2025)

Com a carcaça adequada, se faz possível a realização de mais testes, principalmente considerando que as condições com ele são as ideais e adaptadas para o funcionamento do filtro.

Como não foi possível baseado no custo e dimensões do protótipo, a etapa de dessorção foi realizada fora dele, posicionando o secador de cabelos no suporte metálico para frascos químicos, de modo a direcionar o fluxo de ar para dentro do béquer de vidro, onde alojam-se as zeólitas. Em contrapartida, a etapa de adsorção foi feita no próprio ECOCAPTURE, de forma que optamos por ligar somente as baterias, o microventilador e o controlador de carga, visto que, para testarmos o tempo total que leva à saturação do mineral, o temporizador não se faz útil por limitá-lo.

Figura 70 - Estrutura do processo de adsorção sem o filtro



Fonte: Os autores (2025)

Antes do início da dessorção, verificou-se que a massa das zeólitas estava em 103,3g, devido ao período de tempo em que permaneceram guardadas. Após isso, a dessorção começou, sendo que 20 minutos de aquecimento as fizeram pesar 98,9g. O processo foi repetido e, pesando depois de 20 minutos, constatou-se a massa de 98,1g. Para confirmação, o elemento filtrante foi deixado sob um jato de ar quente por mais 10 minutos, onde concluiu-se que havia chegado o limite das zeólitas e que, a partir disso, elas poderiam somente capturar o dióxido de carbono.

Figura 71 - Processo de dessorção



Fonte: Os autores (2025)

Assim foi feito. O elemento filtrante foi posto no filtro e, posteriormente, tudo foi encaixado no protótipo, o esquema foi ligado e, por fim, o microventilador começou a impulsionar ar no mineral. Depois de 20 minutos de adsorção a massa aumentou para 100,4g, indicando a captura do gás por meio do prendimento das moléculas nos microporos das zeólitas 13X, formados devido à estrutura cristalina do material. A etapa de 20 minutos foi repetida mais duas vezes e o peso passou para 101,6g e 102,4g, respectivamente. Devido ao tempo curto disponível, as zeólitas foram postas em repouso e o teste foi continuado no dia seguinte, após cerca de 21 horas.

Figura 72 - Vista superior do processo de adsorção



Fonte: Os autores (2025)

Levando em consideração que o filtro ficou guardado por horas, os procedimentos foram reiniciados com a medição de massa da amostra, que constou 102,4g. Em seguida, ligou-se o microventilador novamente e iniciou-se a etapa de ventilação. 20 minutos após o começo, os minerais constaram 103,2g e seguiram com essa massa pelas próximas 5 pesagens, que ocorreram nas 2 horas e 10 minutos seguintes.

Com horas de experimento e um total de doze pesagens, junto às experiências anteriores, pôde-se confirmar diversas características das Zeólitas 13X,

como a sua capacidade de adsorção, regeneração e o tempo que leva à saturação. Portanto, fica claro que, de acordo com a fundamentação teórica, o mineral é capaz de coletar dióxido de carbono em seus poros, assim como tem capacidade para liberá-lo e se tornar disponível para outras etapas de coleta.

Figura 73 - Tabela de resultados do teste de adsorção com o protótipo

Condição	Tempo	Massa
Repouso		103,3g
Aquecimento	20min	98,9g
Aquecimento	40min	98,1g
Aquecimento	60min	98,1g
Ventilação	20min	100,4g
Ventilação	40min	101,6g
Ventilação	60min	102,4g
Repouso		102,4g
Ventilação	20min	103,2g
Ventilação	40min	103,2g
Ventilação	60min	103,2g
Ventilação	90min	103,2g
Ventilação	120min	103,2g
Ventilação	140min	103,2g

Fonte: Os Autores (2025)

Além disso, notou-se que, conforme a amostra se aproxima do valor de saturação, isto é, chega ao ponto máximo de coleta que a zeólita é capaz de atingir, a velocidade em que o gás carbônico é adsorvido reduz, tornando o processo mais longo. Isso se comprova ao analisar a variação dos valores obtidos que, inicialmente, passa de 98,1g para 100,4g em 20 minutos, indicando um aumento de 2,3g e, após, a variação reduz para 1,2g e, posteriormente, 0,8g durante a mesma contagem de tempo.

Logo, segundo dados obtidos pelo grupo, o protótipo se mostrou útil ao que é proposto, com estrutura eficaz para a realização da captação de carbono.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a análise do projeto até aqui, pode-se pontuar que os objetivos iniciais, tanto o objetivo geral, quanto os específicos, foram atingidos, com os testes de adsorção e dessorção comprovando as características adsorventes da zeólita 13X, assim como a capacidade de regeneração, apontando-a como o elemento filtrante ideal para o projeto. Outrossim, a montagem do protótipo revela a possibilidade de gerar um fluxo de ar direcionado ao filtro, alimentando o dispositivo com energia solar e armazenando parte dela, permitindo que funcione mesmo em dias com pouca luz.

Durante o desenvolvimento do projeto, foram encontradas dificuldades e limitações de estudo, como a falta de recursos para efetuação de testes em ambientes e condições controladas, além de formas mais precisas de medição, assim como a realização de testes de dessorção com captura e armazenamento do dióxido de carbono fora das amostras, sem que volte para a atmosfera, já que os testes feitos no projeto não incluíram o armazenamento do gás. Junto a isso, foi encontrada uma dificuldade na busca por estudos relacionados à captura de CO₂ diretamente do ar por zeólitas, com o foco sendo, na maioria dos artigos pesquisados, a captura de CO₂ em gases de pós combustão, como a fumaça advinda da queima de combustíveis fósseis e carvão.

Assim, conclui-se que o estudo acerca dos principais tópicos, como emissões de gases de efeito estufa, mudanças climáticas, minerais adsorventes e seus usos na coleta de gás carbônico, igualmente como na construção do protótipo e os desafios encontrados ao longo do processo, expandiram os conhecimentos dos integrantes nas diversas áreas estudadas, contribuindo com o aprendizado do grupo, e a descoberta de importantes assuntos, como os efeitos reais das mudanças climáticas, suas causas e ações eficazes para sua mitigação, além de técnicas, formas e estratégias de pesquisa. Junto a isso, o aprendizado inclui conhecimentos voltados para a área da eletrônica e seus fundamentos, com a montagem dos componentes do protótipo exigindo estudos sobre seu funcionamento.

Ademais, o projeto contribui com os estudos sobre coleta de carbono, emissões de GEE, zeólitas e outros materiais capazes de adsorver e coletar esses gases, reunindo descobertas advindas de diversos estudos, realizados por outros pesquisadores. Junto a isso, com os testes realizados, o projeto demonstra a

possibilidade de confirmação da capacidade da zeólita 13X de coletar CO₂, apontando o ganho e a perda de massa durante os processos de adsorção e dessorção como indicadores claros da presença do gás nos poros das amostras utilizadas.

Outrossim, é considerável a possibilidade de realizar a dessorção no próprio protótipo. Porém, esse processo demanda altas temperaturas, exigindo que o material usado seja resistente a essas condições, além da necessidade de equipamentos capazes de armazenar o CO₂, já que é recomendável que esse armazenamento seja feito em ambientes controlados para evitar perdas e a devolução do gás à atmosfera. Em vista disso, a dessorção no protótipo não é possível no presente projeto, mas é importante considerá-la em estudos futuros.

Ademais, o custo total do protótipo desenvolvido foi de R\$ 644,40, sendo a estrutura de acrílico o componente de maior valor individual. Entretanto, esse valor poderia ser reduzido em uma produção em larga escala, uma vez que materiais alternativos, como PVC, alumínio fino ou chapas metálicas recicladas, podem substituir o acrílico, mantendo a resistência estrutural e diminuindo o custo final. Além disso, a compra de componentes eletrônicos em maior quantidade possibilitaria a redução do valor unitário, tornando o processo de fabricação mais econômico. Dessa forma, a aplicação industrial do dispositivo mostra-se viável, sobretudo em locais com alta concentração de dióxido de carbono, como centros urbanos e regiões próximas a indústrias. A instalação nesses ambientes poderia contribuir para a melhoria da qualidade do ar, além de servir como ferramenta de conscientização ambiental.

Considerando os aspectos citados, estima-se que uma produção em escala industrial poderia reduzir o custo por unidade em até 40%, mantendo a eficiência do sistema e tornando o dispositivo economicamente e ambientalmente viável para aplicação em diferentes contextos.

O projeto busca, portanto, ser implementado em empresas que visam se comprometer com a responsabilidade ambiental e que trabalham diretamente com gases, principalmente fazendo o uso de CO₂, seja em seus produtos finais ou no desenvolvimento deles. Isso porque são capazes de realizar a dessorção de forma eficaz e segura com as tecnologias necessárias, que, possam ter sua produção otimizada ao utilizar do presente TCCT. No mais, ainda se busca implementar a ideia a fim de tornar possível a sua utilização direcionando o CO₂ para funções diversas.

REFERÊNCIAS

A preliminary survey into the temperature conditions and residence time distribution of minimally processed MAP vegetables in Belgian retail display cabinets. **International Journal of Refrigeration**, ano 1994, v. 17, 14 fev. 2003. p. 436-444. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0140700794900035?via%3Dihub>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ALBUQUERQUE, F. R. de; SANTOS, I. M. G.; SOUZA, A. G. de. OBTENÇÃO DE FILTROS CERÂMICOS PELO MÉTODO DA ESPUMA POLIMÉRICA UTILIZANDO MATÉRIAS PRIMAS NATURAIS. *In*: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2001, Florianópolis. **ANAIS DOS CONGRESSOS BRASILEIROS DE CERÂMICA** [...]. João Pessoa: Departamento de Química da Universidade Federal da Paraíba, 2001. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2001/artigos/15-027.doc>. Acesso em: 10 ago. 2024.

ALENCAR, Neiliane Maria *et al.* A saúde ambiental e a sua influência na qualidade de vida: uma revisão integrativa / Environmental health and its influence on quality of life: an integrative review. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 6, p. 33093-33105, jun. 2020. 2525-8761. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-021>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/11001>. Acesso em: 9 ago. 2024.

ALCOFORADO, Fernando. **Aquecimento Global, Mudança Climática Global e Seus Impactos Sobre a Saúde Humana**. [S.l.], 3 ago. 2021. 7 p. Disponível em: https://www.academia.edu/50652674/AQUECIMENTO_GLOBAL_MUDAN%C3%87A_CLIM%C3%81TICA_GLOBAL_E_SEUS_IMPACTOS_SOBRE_A_SA%C3%9ADE_HUMANA. Acesso em: 12 de abr. de 2025.

ANDRADE, Gerson Bessa de *et al.* Performance geoeconômica, gases de efeito estufa e mudanças climáticas, uma análise da nova fronteira agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Avaliação**, Acre, v. 13(2 spe), 12 jul. 2024. 2763-5775. DOI: <https://doi.org/http://doi.org/10.4322/rbaval202412029>. Disponível em: <http://www.rbaval.periodikos.com.br/article/doi/10.4322/rbaval202412029>. Acesso em: 11 abr. 2025.

As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de energia e de processos industriais em 2019. Instituto de Energia e Ambiente, [s. l.], 1 dez. 2020. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>. Acesso em: 26 de abr. de 2025.

BERGAMINI JUNIOR, Sebastião. ESG, Impactos Ambientais e Contabilidade. **Pensar Contábil**, Rio de Janeiro: Conselho Regional de Contabilidade do Estado do Rio de Janeiro, ed. 80, ano XXIII, n. 23, p. 46-54, Bimestral. Disponível em: <http://www.spell.org.br/documentos/ver/63568/esg--impactos-ambientais-e-contabilidade/i/pt-br> . Acesso em: 9 ago. 2024.

CARBON footprint and Life Cycle Costing of beef cattle in the Brazilian midwest. **Journal of Cleaner Production**, ano 2017, v. 147, 11 jan. 2017. p. 119-129. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617300288?via%3Dihub>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CARVALHO, Eduardo. Considerada fracasso na época, Rio 92 foi 'sucesso' para especialistas. *In*: G1. **Globo Natureza**. São Paulo, 29 mai. 2012. Disponível em: <https://glo.bo/LBFP1b>. Acesso em: 20 abr. 2025.

CLEAN AIR FUND. **The State of Global Air Quality Funding 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.cleanairfund.org/wp-content/uploads/2021/09/The-State-of-Global-Air-Quality-Funding-2021-report-compressed-2.pdf>. Acesso em: 11 de abr. de 2025.

COLLADO, Pedro Henrique. **ANÁLISE DOS EFEITOS POLUENTES DOS GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO ADVINDOS DA AGRICULTURA NO BRASIL E PRINCIPAIS PAÍSES EMISSORES**. Orientador: Leandro Cardoso de Moraes. 2023. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/fd010eac-3df2-40d5-8bf2-c3ea9ae5ea5f>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CONFERÊNCIA do clima começa em Paris. ECOA, 2015. Disponível em: <https://ecoa.org.br/conferencia-do-clima-comeca-em-paris/>. Acesso em: 15 de abr. de 2025.

COSTA, Bárbara Meier da. **SÍNTESE DE ZEÓLITAS A PARTIR DE CINZA DE CARVÃO PARA CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO**. Orientador: PROF. DR. MARÇAL JOSÉ RODRIGUES PIRES. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/9542/1/000481683-Texto+Completo-0.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2024.

COSTA, Falberni de Souza *et al.* **Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 2, ano 2006, p. 693-700. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/Gn9xzX9Th5csQnsBkwmpysk/#>. Acesso em: 10 de abr. de 2025.

CUNHA, Cleyzer Adrian; SCALCO, Paulo Roberto. CRESCIMENTO ECONÔMICO BRASILEIRO E EMISSÃO DE CO₂. **Revista do Desenvolvimento Regional**, Rio Grande do Sul: Redes, ed. 18, ano 2013, n. 2, p. 214-230, Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=552056835012>. Acesso em: 20 abr. 2025.

DEUTCH, John M. *et al.* **Update of the MIT 2003: Future of Nuclear Power**. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009. 19 p. Disponível em: <https://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nse-thesis-2004-dostal.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

DIAS, Maria Assunção Faus da Silva. Efeito Estufa e Mudanças Climáticas Regionais. **REVISTA USP**, São Paulo, ed. 71, p. 44-51, 1 nov. 2006. Bimestral. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/download/13550/15368>. Acesso em: 18 mar. 2025.

DINIZ, Eliezer Martins. **O Protocolo de Kyoto**. Revista Brasileira de Economia, Rio de Janeiro, p. 311–321, ano 1998. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rbe/article/download/729/8089>. Acesso em: 14 de abr. de 2025.

FEARNSIDE, P. M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, ano 2002, v. 16, n. 44, p. 99-123. DOI: 10.1590/S0103-40142002000100007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/XSwmhQjJmfndLx5RYZpvjxh/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 set. 2024.

FERREIRA, Iago Mozer. **UTILIZAÇÃO DE ZEÓLITAS COMO ADSORVENTES PARA A REMOÇÃO DE CO₂: UMA REVISÃO DA LITERATURA**. Orientador: Dr. ° Genaro Zenaide Clericuzi. 2021. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia, Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. Disponível em: <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:US:0fff0912-3da3-46a3-b161-2fb9d1b6728>. Acesso em: 15 jun. 2024.

FERREIRA, Marcello. A Física na Escola: um legado da SBF, um patrimônio da educação básica. **A Física na Escola**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 230508–1, 2023. DOI: 10.59727/fne.v21i1.66. Disponível em: <https://fisicanaescola.org.br/index.php/revista/article/view/66>. Acesso em: 18 mar. 2025.

FLECK, Leandro; TAVARES, Maria Hermínia Ferreira; EYNG, Eduardo. **Adsorventes naturais como controladores de poluentes aquáticos: uma revisão**. EIXO, Brasília, ed. 2, ano 2013, p. 39-52, 23 jun. 2013. Disponível em: <https://arquivorevistaeixo.ifb.edu.br/index.php/RevistaEixo/article/view/105/49>. Acesso em: 12 de abr. de 2025.

FLUIDOS SUPERCRÍTICOS EM APLICAÇÕES INDUSTRIAIS. Cadernos de Pesquisa em Educação (CADPED), 2025. Disponível em:

<https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/download/18099/9980/47074>. Acesso em: 11 set. 2025.

FONSECA, Marília Pinto Lins. **PROCESSAMENTO, CONSERVAÇÃO E EMBALAGEM DE ALIMENTOS: APLICAÇÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO SUPERCRÍTICO E ATMOSFERA MODIFICADA**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/dbbfff662-cb2a-4458-a166-bf399ddea593/MARILIA%20PINTO%20FONSECA%20LINS%202017.pdf>. Acesso em: 11 set. 2025.

FULLER, Richard *et al.* **Pollution and health: a progress update**. The Lancet, Estados Unidos, v. 6, ano 2022, p. 535-547. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(22\)00090-0/fulltext#ig1](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(22)00090-0/fulltext#ig1). Acesso em: 21 de abr. de 2025.

GALVÃO FILHO, João Baptista. CAPÍTULO 2 POLUIÇÃO DO AR. *In*: ROVERE, Emílio Lebre La *et al.* (Aut.). **MEIO AMBIENTE: ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS**. Tradução: . 1º ed. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 1990. cap. 2. p. 35-55, Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12059/1/Cap2_poluicao_do_ar.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

GOUVEIA, Lucas Gabriel Teixeira. **Avaliação de materiais adsorventes com diferentes propriedades para a captura de CO₂**. Orientador: Mariliz Gutterres. 2020. TCC (Especialização) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213008/001117081.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 de abr. de 2025.

HEIMPEL, Ellen; HONG, Sim Shang; BRATT, Rachael. Efeito estufa: Como funcionam as mudanças climáticas?. **ClimateScience**, 10 dez. 2021. Disponível em: <https://climatescience.org/ptBR/advanced-greenhouse-effect>. Acesso em: 18 mar. 2025.

IPCC - THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC**. [S.l.]. IPCC, 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/sr15/graphics/#cid_455. Acesso em: 12 abr. 2025

KLEIN, Filipa. **VALORIZAÇÃO DE CO₂ COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A INDÚSTRIA: USOS EM ALIMENTOS E CONSERVAÇÃO**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2022. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970719973969804/Dissertacao%20de%20Mestrado_87451_Filipa.pdf. Acesso em: 11 set. 2025.

KOBIYAMA, Sachi Espindola. **Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Análise das Emissões Diretas e Evitadas de Dióxido de Carbono Equivalente**. Orientador: Marcelo Seleme Matias. 2022. 99 f. Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Repositório Institucional da UFSC, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237521>. Acesso em: 9 ago. 2024.

KRÓL, Magdalena. **Natural vs. Synthetic Zeolites**. In: MDPI Open Access Journals. **Crystals**. Polônia, 17 jul. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/10/7/622>. Acesso em: 13 de abr. de 2025.

LEE, Bruce Y.. 10 problemas de saúde relacionados a alterações climáticas. In: Medscape. **Medscape**. local indefinido, 24 abr. 2019. Disponível em: https://portugues.medscape.com/verartigo/6503479#vp_1?form=fpf . Acesso em: 30 abr. 2024.

LEITE, Vinicius Pazini; DEBONE, Daniela; MIRAGLIA, Simone Georges El Khouri. Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde. **Vitalle**: Revista de Ciências da Saúde, Diadema, v. 32, n. 3, p. 143-153, 22 fev. 2020 2177-7853. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.14295/vittalle.v32i3.12220> . Disponível em: <https://periodicos.furg.br/vittalle/article/view/12220> . Acesso em: 9 ago. 2024.

LIMA, Luís Spencer. Interacções de van der Waals. **Wikiciências**, [s. l.], v. 2, p. 16-17, 8 jan. 2011 DOI: <https://doi.org/http://doi.org/10.24927/rce2014.125>. Disponível em: <https://wikiciencias.casadasciencias.org/wiki/images/c/c3/wikiciencias012011.pdf#page=18>. Acesso em: 19 mar. 2025

LIMA, Yakine Santana *et al.* **ESTUDO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DE CO2 EM ZEÓLITA 13X PARA A SEPARAÇÃO DE GASES INDUSTRIAIS**. . 2007. 7 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e arquitetura, UNIFACS, campinas, 2007. Disponível em: https://www.portalabpg.org.br/site_portugues/anais/anais4/resumos/4PDPETRO_6_2_0420-1.pdf. Acesso em: 26 jun. 2024.

LISBOA, Diego Oliveira; FAGUNDES, Rodrigo Carvalho; LIMA, Yakine Santana. Avaliação da capacidade de adsorção de CO2 em zeólitas 13X e 5A através do Método Gravimétrico . **Seminário Estudantil de Produção Acadêmica**, Lisboa: UNIFACS, ano 2006, p. 1-9, Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/article/view/40/34>. Acesso em: 25 jun. 2024.

MAIA, Letícia Maria D.; LUCAS, Marcela de A.; MATOS, Janara de C.. Participação de Briófitas na redução de gases do Efeito Estufa. **Revista Eletrônica Anima Terra**, Mogi das Cruzes: FATEC Mogi das Cruzes, ed. 18, ano IX, art. 3, p. 31-45, Semestral. Disponível em: <https://www.fatecmogidascruzes.com.br/pdf/animaTerra/edicao18/artigo3.pdf> . Acesso em: 17 jul. 2024.

MIRANDA, J. L. **O ANTROPOCENO E O CO₂: PROCESSOS DE CAPTURA E CONVERSÃO.** Revista Virtual de Química, 2018. Disponível em: <https://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/Jussara2NoPrelo.pdf>. Acesso em: 11 set. 2025.

MENSURAÇÃO econômica da emissão de CO₂ da frota dos transportadores autônomos de cargas brasileiros. **Journal of Transport Literature**, Brasília, ano 2012, v. 6, n. 2, jan. 2012. Research Directory, p. 234-252. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jtl/a/d8nR7yChPfm6yQPwmnNFnfM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 abr. 2025.

Metano. CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/24/2020/08/Metano.pdf>. Acesso em: 10 de abr. de 2025.

METANO **Fórmula** **Química.** Freepik. Disponível em: https://br.freepik.com/fotos-premium/ch4-metano-formula-quimica-3d-estrutura-quimica-ilustracao-3d_42412237.htm. Acesso em: 12 de abr. de 2025.

MINERAL Resource of the Month: Zeolites. *In:* Earth Magazine. EARTH: The Science Behind the Headlines. Estados Unidos, 3 out. 2014. Disponível em: <https://www.earthmagazine.org/article/mineral-resource-month-zeolites/>. Acesso em: 14 de abr. de 2025.

MODELO de Molécula do Óxido Nitroso. Depositphotos. Disponível em: <https://depositphotos.com/br/vector/nitrous-oxide-n2o-laughing-gas-molecule-model-and-formula-332235840.html>. Acesso em: 12 de abr. de 2025.

MOLECULAR Sieve 5A Desiccant. Molecular Sieves Desiccants. *[S.l.]. [s.d.]*. Disponível em: <https://www.molecularsievedesiccants.com/molecular-sieve-5a>. Acesso em: 14 de abr. de 2025.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. **Aquecimento global: fato ou ficção. Aquecimento global: natural ou antrópico?** Maceió: Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, [s.d.]. 37 p. Disponível em: <https://share.google/g3QF4l0Oo7TFiWH2n>. Acesso em: 26 set. 2024.

MOTA, M. L. A. **PANORAMA ATUAL DOS PROCESSOS DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CO₂.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/16753/1/MLAMota.pdf>. Acesso em: 11 set. 2025.

NETO, Marcos Siqueira *et al.* **EMIÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM DIFERENTES USOS DA TERRA NO BIOMA CERRADO**. *Ciência do Solo*, Brasil, v. 35, ano 2011, p. 63-76. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/38V6K75fLfgmKLjFgQmmbWk/?lang=pt>. Acesso em: 10 de abr. de 2025.

PACHECO, Maria Raquel Pereira dos Santos; HELENE, Maria Elisa Marcondes. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 4, p. 204-220, ago. 1990. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/jNbF8gZjK8MDMhL6PhjqNFC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 abr. 2025.

PRIMO, Ana; GARCIA, Hermenegildo. Zeolites as catalysts in oil refining. *In*: Royal Society of Chemistry. **Chemical Society Reviews**. [S.l.]. 7 mar. 2014. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/cs/c3cs60394f/unauth>. Acesso em: 13 de abr. de 2025.

RIBEIRO, Carolina Silva; OLIVEIRA, Gilca Garcia de. CONFLITOS SOCIOAMBIENTAIS NO MEIO SOCIOECONÔMICO: O CASO DE BROTAS DE MACAÚBAS, BAHIA. **Revista Brasileira de Energia**, Brasil: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, ed. 26, ano 2020, p. 19-29, 16 dez. 2020. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/view/61/18>. Acesso em: 20 abr. 2025.

RITCHIE, Hannah, et. al. **Greenhouse gas emissions**. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 11 de abr. de 2025.

RONCONI, Celia M.; SANTOS, Thiago C. dos. Captura de CO₂ em Materiais Híbridos. **Revista Virtual de Química**, Niterói: PubliSBQ-RVq, ed. 6, n. 1, p. 112-130, 22 ago. 2013. Bimestral. Disponível em: <https://rvq.s bq.org.br/pdf/v6n1a09>. Acesso em: 17 jul. 2024.

ROSER, Max et al. **Greenhouse Gas Emissions**. Our World in Data, 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 20 de abr. de 2025.

ROTICH, Brian ; CSORBA, Ádám; MICHÉLI, Erika. SOIL AND WATER CONSERVATION IN KENYA; PRACTICES, CHALLENGES AND PROSPECTS. **ResearchGate**, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363862398_SOIL_AND_WATER_CONSERVATION_IN_KENYA_PRACTICES_CHALLENGES_AND_PROSPECTS. Acesso em: 13 mar. 2025.

SCABIN, Denise. **Gases de Efeito Estufa (GEE)**. São Paulo (Estado). Secretaria do Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. Disponível em:

<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/gases-de-efeito-estufa-gee/>. Acesso em: 10 de abr. de 2025.

SCOVAZZI, Tullio. **Do Protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris**. Revista da Faculdade de Direito da UFMG, Belo Horizonte, n. 78, p. 469–476, 2021. Disponível em: <https://www.direito.ufmg.br/revista/index.php/revista/article/view/2178/1998>. Acesso em: 14 de abr. de 2025.

SOUZA, Lidiane Matos de. **Principais causas da intensificação do efeito estufa, e as suas consequências ambientais**. Orientador: Larissa De Bortolli Chiamolera Sabbi. 2014. 37 f. TCC (Especialização) - Curso de Gestão Ambiental em Municípios, DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/22586>. acesso em: 12 abr. 2025.

SOUZA, Rafaela. Efeito Estufa. *In*: UOL. **Mundo Educação**. [S.l.]. s.d. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/efeito-estufa.htm>. Acesso em: 19 mar. 2025.

STEIN, Theo; ALLEN, Monica. 2024 Arctic Report Card documents rapid, dramatic change. *In*: NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. **Climate.gov**. [S.l.]. 10 dez. 2024. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2024-arctic-report-card-documents-rapid-dramatic-change>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SUN, Wenqiang *et al.* Co-removal of CO₂ and particulate matter from industrial flue gas by connecting an ammonia scrubber and a granular bed filter. **Journal of Cleaner Production**, Shenyang, v. 257, n. 120511, p. 1-12, 1 jun. 2020 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120511> . Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620305588> . Acesso em: 26 jul. 2024.

VITAL, Marcos Henrique Figueiredo. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 167-244, set. 2018 Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/16043>. Acesso em: 20 abr. 2025.

WHAT is the NDIR sensor and why is it preferred over other types of sensors? Aranet Forum, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://forum.aranet.com/aranet-home-devices-aranet4-aranet2-aranet-radiation-aranet-radon/what-is-the-ndir-sensor-and-why-is-it-preferred-over-other-types-of-sensors/>. Acesso em: 20 de abr. de 2025.