

EMMANUEL DALMAZ DE FREITAS

Generate and Store G-A-S: Sistema de reaproveitamento e armazenamento de gases emitidos por fornos industriais em diversas empresas.

CAMPO LARGO

2025
EMMANUEL DALMAZ DE FREITAS

Generate and Store G-A-S: Sistema de reaproveitamento e armazenamento de gases emitidos por fornos industriais em diversas empresas.

Relatório do projeto de pesquisa realizado através do Programa de Iniciação Científica do Colégio Sesi Campo Largo – PR, apresentado como requisito de submissão de feiras de ciências.

Professora Orientadora: Amanda de Souza Maloste

Contato: Amanda (041) 98865-1608

Email: amanda.maloste@sistemafiep.org.br

CAMPO LARGO

AGRADECIMENTOS

A Prof.^a Amanda de Souza Maloste que, possibilitou a conclusão e aperfeiçoamento do projeto

A Prof.^a Caroline Alvez da Rosa Schimdt pelo apoio e ajuda nas correções dos trabalhos produzidos

Ao meu pai e mãe, que me ajudaram no desenvolvimento da ideia e produção dos protótipos.

Ao meu colega Caio, que por mais de não estar mais participando do projeto, ajudou na produção do primeiro artigo

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL.....	9
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
3 METODOLOGIA	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5 CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS.....	29

RESUMO

A poluição atmosférica, resultante da emissão de gases por diversos setores industriais, constitui um dos principais desafios ambientais e econômicos da atualidade, gerando impactos expressivos na saúde pública, na biodiversidade e no equilíbrio climático. No estado do Paraná, esse problema se agrava devido à concentração de indústrias que utilizam fornos em seus processos produtivos, como é o caso de fábricas cerâmicas, a exemplo da Incepa, Germer e Cerâmica Santa Rita. Considerando esse cenário, a Organização das Nações Unidas (ONU) incluiu, entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, a meta de ação contra as mudanças climáticas provocadas pela intensificação da liberação de gases poluentes. Nesse contexto, o presente projeto propõe o desenvolvimento de um sistema tecnológico integrado, composto por turbinas e tanques de armazenamento, voltado à captação, aproveitamento e reutilização dos gases emitidos durante os processos industriais. A estrutura do sistema é constituída por oito componentes principais: tubos de transporte de gás, compressor, turbina geradora de energia, termômetros e pressostatos para monitoramento, válvulas de controle, válvula de alívio de pressão, tanque de armazenamento e sistema em cascata para separação de gases por densidade. A turbina possibilita a conversão parcial da energia contida nos gases em energia mecânica ou elétrica, enquanto os tanques e separadores viabilizam o reaproveitamento de compostos como a amônia (NH_3), passível de aplicação agrícola como fertilizante ou como insumo na limpeza industrial. Dessa forma, o sistema propõe uma alternativa viável para a redução da poluição atmosférica nas atividades industriais, promovendo o uso eficiente dos subprodutos e contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais. Além disso, a proposta alinha-se aos princípios da sustentabilidade e da economia circular, podendo representar um diferencial competitivo às indústrias que adotarem práticas produtivas mais limpas e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Poluição. Emissões. Reutilização. Armazenamento. Sistema

ABSTRACT

Atmospheric pollution, resulting from the emission of gases by various industrial sectors, represents one of the main environmental and economic challenges today, generating significant impacts on public health, biodiversity, and climate balance. In the state of Paraná, this issue is worsened by the concentration of industries that use furnaces in their production processes, such as ceramic factories like Incepa, Germer, and Cerâmica Santa Rita. Given this scenario, the United Nations (UN) has included, among its 17 Sustainable Development Goals, the goal of taking action against climate change caused by the increased release of polluting gases. In this context, the present project proposes the development of an integrated technological system, composed of turbines and storage tanks, aimed at capturing, utilizing, and reusing gases emitted during industrial processes. The system's structure consists of eight main components: gas transport pipes, compressor, energy-generating turbine, thermometers and pressure gauges for monitoring, control valves, pressure relief valve, storage tank, and a cascade system for gas separation by density. The turbine enables the partial conversion of the energy contained in the gases into mechanical or electrical energy, while the tanks and separators allow for the reuse of compounds such as ammonia (NH_3), which can be used in agriculture as fertilizer or as an input for industrial cleaning. Thus, the system offers a viable alternative for reducing air pollution in industrial activities, promoting the efficient use of by-products and contributing to the mitigation of environmental impacts. Furthermore, the proposal aligns with the principles of sustainability and the circular economy, potentially providing a competitive advantage to industries that adopt cleaner and more environmentally responsible production practices.

Keywords: Pollution. Emissions. Reuse. Storage. System.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento progressivo das emissões de poluentes atmosféricos tornou-se uma das principais ameaças ambientais da atualidade. A emissão desenfreada de gases nocivos e partículas sólidas, proveniente principalmente de atividades industriais, têm contribuído de forma significativa para a degradação ambiental e comprometido a saúde humana. O que antes era considerado apenas um obstáculo ambiental passou a configurar-se como uma emergência global.

Dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021) indicam que, desde 2010, as emissões de gases de efeito estufa no Brasil aumentaram cerca de 40%, passando de 1,7 bilhão para 2,4 bilhões de toneladas em 2021.

No setor industrial, a indústria cerâmica é uma das que mais contribuem para esse cenário. Estima-se que a produção brasileira de revestimentos cerâmicos emite, em média, 3,26 kg de CO₂ equivalente por metro quadrado de produto fabricado, agravando o aquecimento global e os seus impactos associados, como o aumento da frequência de secas, enchentes e instabilidades climáticas (SOUZA et al., 2020).

Além do dióxido de carbono, gases como os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o dióxido de enxofre (SO₂), frequentemente liberados em processos industriais, participam da formação das chuvas ácidas. Estas, por sua vez, afetam diretamente a qualidade do solo, comprometem a vegetação, contaminam corpos d'água e contribuem para a degradação de estruturas arquitetônicas e monumentos históricos (PEREIRA; MORAIS, 2019).

Adicionalmente, partículas sólidas em suspensão intensificam a poluição urbana, ao passo que metais pesados oriundos de resíduos industriais podem se acumular no solo e em recursos hídricos, comprometendo ecossistemas inteiros. Esses poluentes também exercem efeitos adversos sobre a saúde humana.

A exposição prolongada a monóxido de carbono (CO), NO_x, SO₂, partículas e metais pesados está diretamente relacionada ao desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares, como doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), silicose, baritose, hipertensão arterial, infartos e, em casos mais graves, certos tipos de câncer (OLIVEIRA; SILVA, 2021).

Diante desse panorama preocupante, torna-se urgente o desenvolvimento de soluções sustentáveis, tecnológicas e economicamente viáveis, que reduzam a emissão de poluentes e possibilitem o aproveitamento de seus subprodutos de maneira inteligente.

Nesse sentido, alinhando-se com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente o de número 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, essa pesquisa propõe o estudo do desenvolvimento de um sistema para a captura e armazenamento de gases industriais, com vistas à sua reutilização em processos diversos. A ideia central consiste em viabilizar a coleta seletiva de gases como a amônia (NH_3), que, além de ser poluente, pode ter aplicação útil em formulações de fertilizantes agrícolas e em produtos de limpeza industrial.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar formas de armazenar os gases poluentes, em destaque o dióxido de carbono (CO_2), que são expelidos nas fabricas e impedir que maiores quantidades desses gases nocivos sejam liberadas para a atmosfera e posteriormente desenvolver um protótipo capaz de ser aplicado.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estudar os processos de queima nos fornos industriais, juntamente dos combustíveis usados.
- Produção de um protótipo em 3D, e posteriormente uma maquete física, com o intuito de expandir para um modelo em larga escala.
- Diminuir as emissões dos gases, e dar uma nova função para eles, seja gerando energia ou reutilizando-os.
- Desenvolver e produzir uma solução sustentável para uma emergência global.
- Realizar reuniões com variados profissionais com o intuito de amplificar os conhecimentos sobre a produção do projeto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A poluição atmosférica industrial configura-se como um dos principais desafios ambientais da atualidade, impactando diretamente a qualidade do ar, a saúde pública e o equilíbrio dos ecossistemas.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), aproximadamente 21% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) originam-se do setor industrial, posicionando-o como um dos maiores responsáveis pelo agravamento do aquecimento global. Entre os principais poluentes liberados pelas atividades industriais destacam-se os óxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2), o dióxido de carbono (CO_2), partículas sólidas em suspensão e metais pesados, que apresentam sérios riscos ambientais e à saúde humana.

No contexto regional do Paraná, destaca-se a indústria cerâmica como um dos setores que contribuem significativamente para a emissão desses gases nocivos. Empresas como Incepa, Germer e Cerâmica Santa Rita utilizam fornos industriais que liberam altos volumes de poluentes atmosféricos. Conforme estimativas da Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER, 2022), a produção brasileira de revestimentos cerâmicos é responsável pela emissão média de 3,26 kg de CO_2 equivalente por metro quadrado fabricado, evidenciando a relevância desse segmento no cenário das emissões industriais nacionais.

Os impactos desses poluentes são multifacetados e amplamente documentados. Gases como NO_x e SO_2 são precursores da chuva ácida, fenômeno que causa a degradação do solo, afeta a biodiversidade vegetal e provoca danos à infraestrutura urbana, comprometendo materiais de construção e monumentos históricos (Mundo Educação, 2023).

Partículas finas e metais pesados presentes na atmosfera urbana, conforme dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022), exercem efeitos adversos à saúde humana, estando associados a uma maior incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer. Trabalhadores expostos continuamente a essas condições, especialmente em indústrias cerâmicas, apresentam maior risco de desenvolver patologias como silicose, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e neoplasias malignas (OXI Ambiental, 2022).

Diante deste cenário preocupante, a adoção de tecnologias sustentáveis para a diminuição das emissões industriais tem se tornado uma prioridade global. Sistemas integrados de turbinas e tanques de armazenamento emergem como soluções promissoras, capazes não apenas de reduzir o impacto ambiental, mas também de promover o reaproveitamento dos gases capturados. A amônia (NH_3), por exemplo, é um subproduto passível de captura que pode ser reutilizado como fertilizante agrícola ou como agente de limpeza na indústria, agregando valor econômico e reduzindo o desperdício (NOAA, 2023).

O conceito de CCUS (captura, uso e armazenamento de carbono) representa uma das estratégias mais inovadoras e eficazes no combate às emissões industriais. Esse sistema funciona como um “aspirador inteligente”, capturando gases diretamente das fontes emissoras, como chaminés industriais, e transportando-os por meio de tubulações até reservatórios seguros ou unidades de reutilização.

Além disso, a integração de turbinas a gás ao processo possibilita a geração de energia elétrica a partir dos gases capturados, aumentando a eficiência energética e transformando um resíduo poluente em recurso útil. Técnicas avançadas já viabilizam a conversão do CO_2 capturado em combustíveis limpos, como o metanol, o que potencializa os benefícios ambientais e econômicos da tecnologia (SMITH et al., 2020).

Em suma, o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de captura e aproveitamento dos gases industriais são fundamentais para a transição para uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

Além disso, a agenda 2030, adotada pela ONU em 2015, também busca por ações que gerem mudanças alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), abrangendo 17 ODS e 169 metas, como:

Buscar a redução dos impactos dos poluentes atmosféricos na saúde humana; contribuir para a redução da contaminação de recursos hídricos por metais pesados; propor soluções tecnológicas e sustentáveis para a indústria; colaborar com a melhoria da qualidade do ar e do ambiente urbano; promover o reaproveitamento de resíduos e subprodutos industriais e atuar diretamente na mitigação da emissão de gases de efeito estufa (NAÇÕES UNIDAS 2025).

Assim sendo, ao promover a redução das emissões, o reaproveitamento de subprodutos e a geração de energia limpa, essas soluções contribuem diretamente para o cumprimento dos acordos internacionais sobre mudanças climáticas, bem

como para a melhoria da qualidade de vida das populações afetadas pela poluição industrial.

3 METODOLOGIA

A partir da problemática levantada com enfoque na cidade da louça (Campo Largo-PR), buscou-se por meio das pesquisas bibliográficas formas de amenizar o lançamento de gases na atmosfera. Através disso, encontrou-se um vídeo de um senhor que em seu terreno, produzia fumaça líquida através da queima de madeira e outros combustíveis, para ser vendida e usada em cozinhas ou como fertilizantes (FAZENDA DOS COGUMELOS, 2024).

Com base nessa descoberta, pensou-se na ideia de um sistema de reutilização, armazenamento, e geração de resíduos da queima de combustíveis, para inserir no cotidiano das indústrias amenizando o lançamento de gases que causam o efeito estufa.

Assim sendo, após a idealização do G-A-S (nome desenvolvido pela equipe para o sistema), foi pesquisado em diversos sites sobre os tipos de combustíveis usados nas queimas, quais eram liberados em certos combustíveis, que poderiam ser usados sob pressão e que poderiam ser reutilizados de alguma maneira, a fim de compreender melhor sobre o processo e na sequência, pensar em estratégias para o desenvolvimento do protótipo virtual.

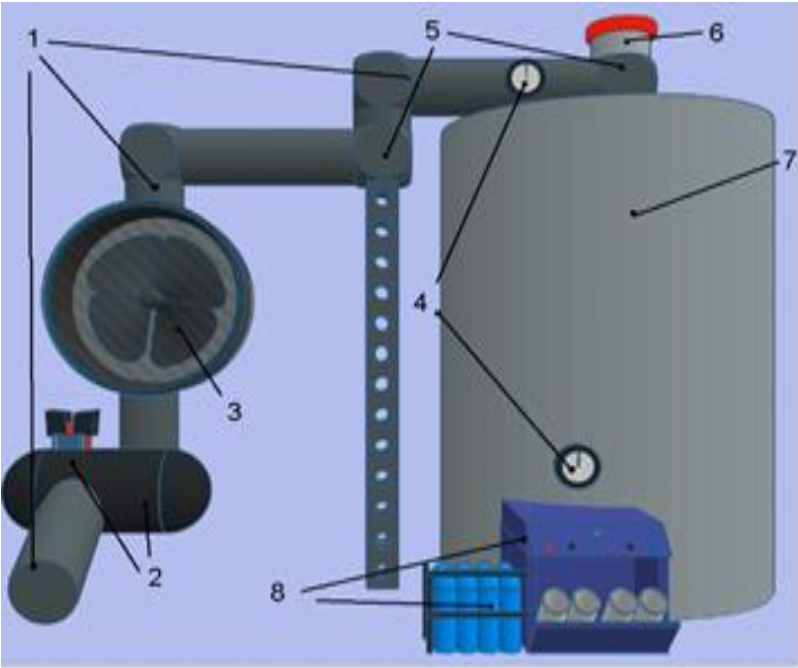
Além disso, foi necessário aprender sobre o funcionamento de certos sistemas de pressão e armazenamento, juntamente de conceitos básicos de engenharia e termodinâmica, dedicar tempo e conhecimento para a produção de um problema.

3.1 PROTÓTIPO I

Para um primeiro momento, com o levantamento bibliográfico, a primeira idealização do protótipo foi desenvolvida pelo Tinkercad¹, buscando dar mais vida a ideia a partir da modelagem 3D para posteriormente ser desenvolvido na prática.

Assim sendo, a partir dos recursos da plataforma de modelagem 3D, desenvolveu-se o sistema virtual do G-A-S, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Protótipo 3D.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Buscou-se por meio de números, desenvolver uma legenda no intuito de melhor explicar cada componente. Assim sendo, desenvolveu-se o Quadro 1, com a explanação e complemento dos aspectos da Figura 1.

Quadro 1- Estrutura em 3D do protótipo.

NÚMERO	NOME	FUNÇÃO
1	Tubos de transporte de gás	Serão os responsáveis pelo transporte de todos os gases que seriam expelidos pelas queimas nos fornos industriais, direcionando-os para os compressores, turbinas e tanques de armazenamento. Serão muito resistentes às temperaturas e pressões altas, para conseguir, em uma fábrica, ter sua função feita com êxito e sem acidentes.
2	Compressor dos gases	Antes dos gases chegarem à turbina, eles vão passar pelo compressor, que aumentaria a pressão deles, os quais seriam direcionados a turbina. Isso seria para garantir que a turbina vai ter pressão/força suficiente para conseguir gerar energia, ou se um eixo estiver conectado, permitir que, por exemplo, uma esteira, funcione sem precisar de energia.
3	Turbina de reutilização de energia	É a primeira etapa de reutilização. Os gases comprimidos, que anteriormente tinham passado pelo compressor, seriam direcionados a turbina, fazendo-a girar, assim permitindo que ela gere energia que seria armazenada, ou caso um eixo

		estiver conectado, permitir que algum componente funcione sem o uso de energia da fábrica.
4	Termômetros e pressostatos	A parte primordial para a segurança do sistema. Seria responsável pela regulação da temperatura e pressão de todos os componentes do sistema, para evitar que, por exemplo, o sistema superaqueça, fazendo os componentes derreterem, ou até mesmo, o sistema ceder pela pressão e explodir, causando uma catástrofe.
5	Válvulas do sistema	Seriam as "portas" de acesso para os gases, que permitiriam ou não a entrada de gases, de acordo com a necessidade, ou dependendo do comando que receberem. Elas regulam a entrada dos gases nos tubos e, juntamente com os pressostatos e termômetros, permitirão uma maior segurança para o sistema e a fábrica.
6	Válvula de alívio	Caso os pressostatos e termômetros detectem temperaturas e pressões altas, o sistema de alívio seria ativado, enviando assim os gases excedentes para a atmosfera. Ressaltando que seria uma pequena parte de todos os gases que serão enviados à atmosfera.
7	Tanque de armazenamento de gás	Será o setor que armazenaria os gases. Os gases, após passarem por todos os componentes, serão enviados para o tanque, irá armazená-los até serem vendidos ou enviados para empresas ou estabelecimentos que poderão ter o uso deles, como frigoríficos ou distribuidoras de gases.
8	Sistema de cascata	É como os gases seriam "Embalados" para a venda ou envio. A cascata encherá os determinados cilindros, utilizando a pressão do seu sistema junto com a do tanque de armazenamento, assim enchendo os cilindros preparados para os destinos determinados pela empresa ou estabelecimento.

Fonte: Autoria própria, 2025.

Dessa forma, com os componentes estipulados, passe-se a pensar no funcionamento do sistema, onde este será constituído em 6 etapas:

1. **Primeira etapa:** Entrada dos gases no sistema, através dos tubos de transporte.
2. **Segunda etapa:** Compressão dos gases através do compressor, direcionamento para a turbina de geração de energia, permitindo a geração de energia elétrica caso conectado a um transformador, ou caso conectado a um eixo, permitindo, por exemplo um sistema de esteiras funcionar

3. **Terceira etapa:** Após a turbina, direcionamento dos gases através das válvulas para o tanque de armazenamento.
4. **Quarta etapa:** Armazenamento dos gases poluentes provenientes da queima no tanque, para fins futuros, como a venda ou outro destino que a empresa decidir
5. **Quinta etapa:** Preparação dos gases poluentes em cilindros menores pelo sistema de cascata, para fins que a empresa decidir
6. **Sistema de segurança:** Termômetros, Pressostatos e a válvula de alívio. A pressão e a temperatura serão medidas, e caso alguma das duas esteja acima do limite recomendado a válvula de alívio será ativada para expelir os gases excedentes do sistema, evitando por exemplo uma explosão. Destacando que os gases excedentes seriam uma pequena parte comparado aos gases armazenados.

A ideia é que para esse funcionamento ser eficiente, o sistema seja conectado à saída de gases da fábrica, garantindo assim que todos os gases entrem dentro do sistema, fazendo assim que os gases sejam direcionados para dentro dos tubos, a fim de serem reutilizados e armazenados, sendo usados futuramente, dependendo de como a empresa quiser que sejam usados. O que por sua vez, permitirá às empresas poluentes uma economia que foge do linear e busca o conceito de economia circular, esta que busca dar novos fins àquilo que seria descartado e se tornaria resíduo prejudicial ao meio ambiente.

Assim sendo, a empresa/fábrica terá que disponibilizar uma área grande para a aplicação e efetivação do projeto. De forma geral, o sistema pode ser construído sendo suspenso ou colocado no chão, porém isso irá depender de onde está localizada a saída dos gases, onde e como for decidido que será o melhor local para a aplicação e funcionamento.

3.2 PROTÓTIPO II

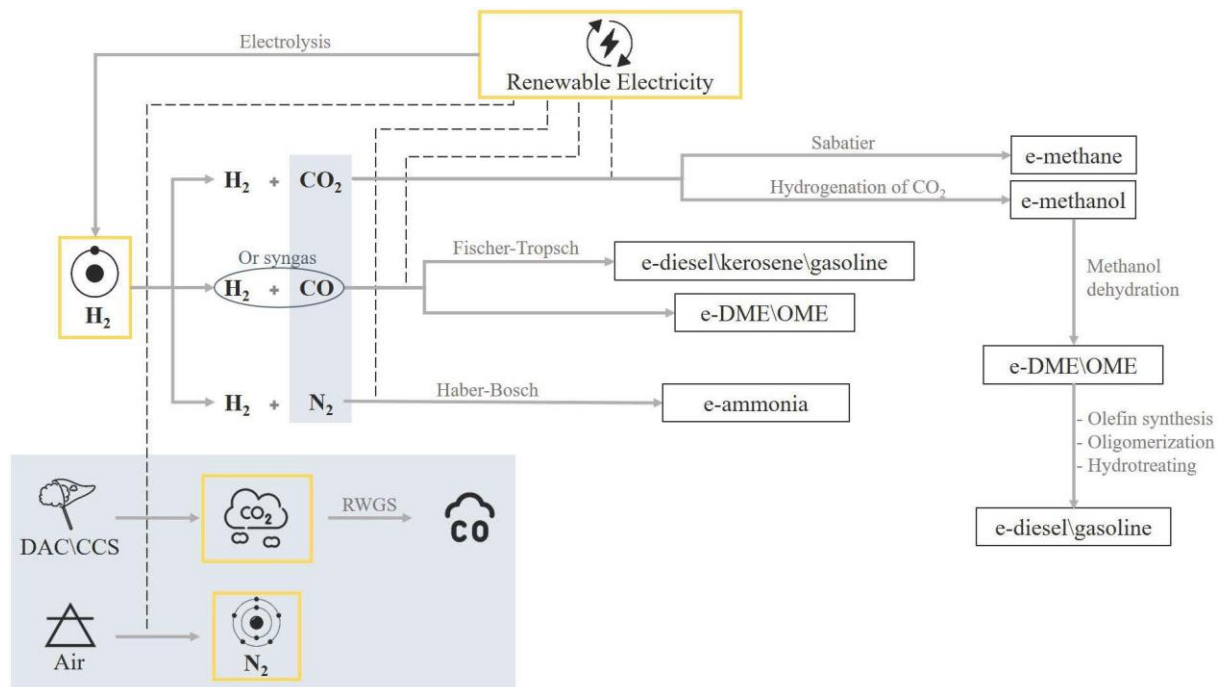
Após a produção do protótipo em 3D e das pesquisas feitas, foi realizada uma reunião presencial com o Engenheiro Químico responsável dos fornos industriais da INCEPA, tal qual trabalha com revestimentos Cerâmicos Campo Largo.

Na indústria em questão, o gás natural é o principal combustível utilizado nos processos de queima para a produção de porcelanas. No entanto, observa-se que outras fábricas do mesmo setor, localizadas em diferentes cidades, também utilizam o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o gás de xisto como fontes energéticas. Durante a queima desses combustíveis, diversos poluentes são emitidos, sendo o dióxido de carbono (CO_2) o principal subproduto com potencial de reaproveitamento.

Apesar de ser um dos gases mais nocivos à atmosfera, o CO_2 apresenta diferentes possibilidades de reutilização industrial. Ele pode ser combinado ao hidrogênio (H_2) para formar combustíveis sintéticos, como o E-diesel, querosene e gasolina, representando uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis convencionais. Além disso, o dióxido de carbono é amplamente utilizado em sistemas de refrigeração, bem como na produção de bebidas e líquidos gaseificados, demonstrando seu potencial de reaproveitamento em processos sustentáveis.

Assim sendo, pesquisou-se um esquema para representar alguns exemplos de transformações com o CO_2 , conforme a figura 2

Figura 2 - Esquema de transformação do CO_2 para combustível sintético



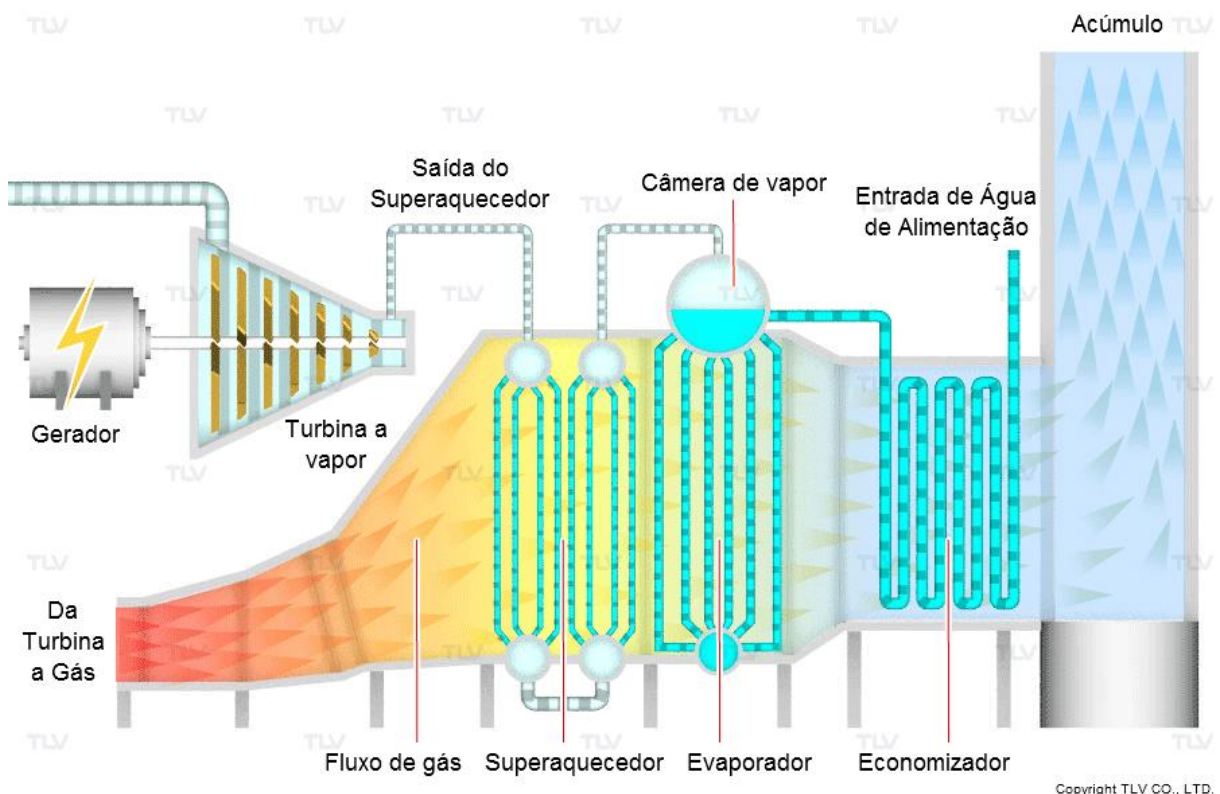
Fonte: MDPI, 2025.

Assim sendo, partir da reunião com o Engenheiro Químico, foi descoberto que, na área da queima das cerâmicas na fabricas, antes dos gases serem liberados para a atmosfera, eles passam por um sistema de recuperação de calor residual, por exemplo o Gerador de Vapor de Recuperação de Calor (HRSG).

O Sistema de recuperação de calor residual (RCR), um gerador de vapor com recuperação de calor, como o (HRSG) é um dos principais equipamentos em uma usina de ciclo combinado de turbina a gás, apresentando alta eficiência térmica e emissões mínimas de CO₂. Um HRSG é um tipo de trocador de calor que recupera o calor dos gases de exaustão de uma turbina a gás em um grau extremo. O calor é recuperado na forma de vapor, que serve como fonte de energia para uma turbina a vapor geradora de energia (Mitsubishi Powers, 2025)

Com base nessas informações, pesquisou-se um esquema do funcionamento do complexo de recuperação de calor residual, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Funcionamento do sistema de recuperação de calor residual



Fonte: TLV, 2025.

A partir das discussões realizadas em reunião, definiu-se a inclusão de um sistema de Recuperação de Calor Residual (RCR) antes do sistema de turbina

destinado à reutilização de energia. Essa modificação visa aumentar a eficiência do processo, aproveitando o calor excedente antes da exaustão dos gases para a atmosfera.

Com essa configuração, os gases liberados no ambiente atmosférico serão compostos, majoritariamente, por vapor d'água e gases residuais como compostos de enxofre, uma vez que o dióxido de carbono (CO_2) será captado e armazenado para fins comerciais ou outras finalidades que venham a ser definidas pela empresa.

Adicionalmente, considera-se a possibilidade de ampliação do sistema de armazenamento de gases, caso se verifique a presença de outros subprodutos úteis durante a queima nos fornos. Essa expansão permitiria a captação simultânea de outros gases de interesse industrial, armazenando-os juntamente com o CO_2 , otimizando ainda mais a sustentabilidade e a eficiência energética da planta.

3.2.1 Produção de um sistema simulado

A partir desses dados, foi efetuada a produção da maquete do sistema, com a adição do sistema de recuperação de calor residual e de filtros para separação do CO_2 dos demais gases, conforme apresentado na figura 4.

Figuras 4 e 5 - Produção do Protótipo II



Fonte: Autoria Própria, 2025

A maquete foi desenvolvida com placas de madeira, MDF, fitas de LED, caninhos transparentes, durepox e pedaços de grades de meta, representado a seguir na figura 5.

A parte elétrica do protótipo foi concebida utilizando fitas de LED brancas, conectadas a um cabo de aspirador de pó para ligação à tomada. As fitas de LED têm como função ilustrar o direcionamento dos gases emitidos pelos processos industriais, sinalizando visualmente o percurso até o tanque de armazenamento, bem como para os sistemas de recuperação de calor residual e de reaproveitamento de energia. Dessa forma, é possível compreender de maneira prática e intuitiva a movimentação dos gases dentro do protótipo, facilitando análises e testes iniciais do projeto.

Em um modelo em escala industrial, antes de alcançar o tanque de armazenamento ou os sistemas de recuperação e reaproveitamento, os gases passarão por filtros específicos ou por esquemas de solventes, tendo como objetivo separar o dióxido de carbono (CO_2) dos demais gases que são menos reativos ou inertes à atmosfera. Além do CO_2 , outros gases, como a amônia (NH_3), poderão ser capturados e reutilizados, por exemplo, como insumo na produção de fertilizantes agrícolas, ampliando o potencial de reaproveitamento e contribuindo para a economia circular.

No entanto, o foco inicial do projeto é o CO_2 , devido à sua elevada emissão e aos impactos negativos significativos que causa no aquecimento global e nas alterações climáticas. A priorização do CO_2 permite que o sistema seja desenvolvido de forma direcionada, garantindo eficiência na captura e armazenamento do gás mais crítico, ao mesmo tempo em que estabelece bases para futuras adaptações que possam incluir outros gases.

O sistema será projetado para se adaptar às especificações e necessidades de cada empresa ou fábrica parceira, buscando sempre o melhor desempenho operacional e a aplicação prática mais viável. A flexibilidade do projeto é fundamental para otimizar a redução de emissões, assegurando que os gases capturados recebam um destino útil e ambientalmente responsável.

As etapas de instalação e implementação do sistema serão definidas após a construção e avaliação do protótipo inicial. Os testes de funcionamento permitirão ajustes e melhorias, de modo que o sistema possa ser aplicado em empresas piloto com maior confiabilidade. Este processo gradual garante que o projeto seja seguro, funcional e alinhado às exigências industriais e ambientais.

Com base nos dados levantados e nos resultados obtidos nos testes iniciais, o próximo passo será a produção em pequena escala, seguida da busca por parcerias com empresas dispostas a realizar testes práticos do equipamento.

A expectativa é que, com a implementação desse sistema, seja possível contribuir para a redução de emissões industriais, promover uma cidade mais limpa e ecológica, e avançar na ação contra as mudanças climáticas, alinhando-se às metas da Agenda 2030 e aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, especialmente no que se refere à ação contra a mudança global do clima (ODS 13).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto, considerando as diferentes etapas de criação e teste dos protótipos propostos.

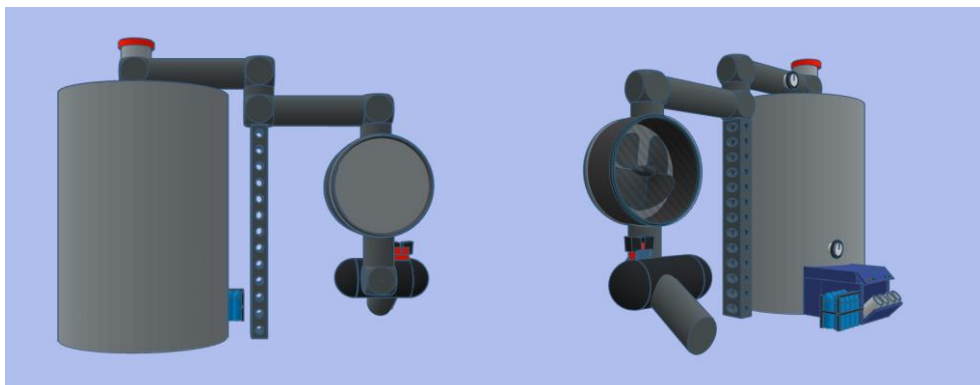
A construção de dois modelos, um digital elaborado em plataforma de simulação 3D e outro físico por meio de uma maquete funcional, permitiu avaliar de forma complementar a viabilidade estrutural, operacional e ambiental do sistema de captação e armazenamento de gases industriais.

A seguir, cada protótipo será analisado individualmente, destacando suas contribuições, limitações e potencial de aprimoramento dentro do contexto industrial proposto.

4.1 PROTÓTIPO I

O protótipo, ainda que virtual, apresenta viabilidade de replicação, pois não demanda muitos materiais e se caracteriza por um sistema simples, composto por apenas oito elementos. Entre suas funcionalidades, destaca-se a possibilidade de integração de turbinas ou sistemas a vapor para a reutilização de energia, recurso útil tanto para a geração de energia elétrica por meio de transformadores, quanto para o acionamento de esteiras ou outros mecanismos acoplados a eixos giratórios. Nas Figuras 6,7, e 8, a seguir, é possível visualizar a prototipagem de diversos ângulos.

Figura 6, 7 e 8 - Protótipo I de diferentes ângulos.





Fonte: Autoria Própria, 2025

Na simulação de funcionamento, os gases percorrem todos os componentes do sistema em um processo em série, no qual cada elemento desempenha uma função específica. Parte significativa desses gases, em especial o dióxido de carbono (CO_2), é direcionada para armazenamento e posterior comercialização ou outra destinação definida pela empresa responsável. O restante dos produtos da queima apresenta características inertes à atmosfera, contribuindo assim para reduzir o impacto ambiental, sobretudo em relação ao efeito estufa.

Quanto ao design e à organização, observa-se que as medidas e proporções do modelo virtual estão alinhadas com uma possível aplicação prática, além de indicarem facilidade de manutenção, especialmente no acesso a filtros e válvulas. A etapa de visualização em 3D possibilitou ajustes importantes, embora limitada pela simplicidade da plataforma utilizada, o Tinkercad, que não permite simulações mais complexas.

Apesar de representar em três dimensões a estrutura do sistema, o ambiente virtual atual é mais ilustrativo do que funcional, já que não oferece recursos para simulação do transporte, armazenamento ou escoamento dos gases, tampouco dos componentes auxiliares, como termômetros, pressostatos, compressores e sistemas em cascata.

4.2 PROTÓTIPO II

A visualização prática da estrutura, por meio da maquete física, possibilitou uma percepção mais realista das proporções em comparação com o mundo real (Figuras 8 e 9)

Figuras 8 e 9 - Protótipo II.



Fonte: Autoria Própria, 2025

Embora o Protótipo II não contemple, nesta versão, os sistemas de recuperação de calor residual e de reutilização de energia, mas apenas o sistema de filtragem, ainda assim foi possível compreender o funcionamento do conjunto a partir de representações visuais baseadas em imagens pesquisadas, tanto do HRSG quanto do sistema de reaproveitamento energético, ambos pertencentes ao Protótipo I.

Para contornar um problema com o fluxo de fumaça, optou-se por representar os dutos com fitas de LED brancas, cuja iluminação destacou o caminho dos gases, antecedida pelo sistema de filtros. No que diz respeito à simulação visual do fluxo, a única etapa que pôde ser representada com fumaça foi a exaustão dos gases inertes, que ocorre após a passagem pelos sistemas HRSG e SRE. Essa saída foi simulada com o uso de incensos, escolhidos por não serem prejudiciais à atmosfera.

A escolha dos materiais para a construção do Protótipo II priorizou elementos simples e acessíveis, tais como placas de madeira e MDF, canos de acrílico, fita isolante, Durepox, fitas de LED, um cabo de aspirador de pó, grades metálicas, papelão, tintas em tons de preto, cinza e amarelo, além de uma lata metálica de

inseticida reutilizada para representar o tanque. Também foram utilizadas dobradiças, um trinco pequeno para vedação, e uma mangueira adaptada como chaminé.

Embora mais compreensível e dinâmico em comparação ao Protótipo I, o segundo modelo proporciona uma visão mais didática e acessível do que se pretende desenvolver futuramente, com o apoio de especialistas da área. A expectativa é que, a partir dessa base inicial, seja possível avançar para a construção de um protótipo capaz de converter efetivamente os gases e incorporar de forma mais realista os aspectos fundamentais investigados nesta pesquisa.

4.3 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é um modelo de produção e consumo que busca manter produtos, materiais e recursos em uso pelo maior tempo possível, reduzindo resíduos e impactos ambientais, em contraste ao sistema linear baseado em “extrair, produzir, descartar” (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Nesse contexto, o projeto apresentado na Figura 10 se insere como uma proposta inovadora, uma vez que promove a captura, separação e armazenamento do CO₂ gerado na queima de combustíveis, além da recuperação de energia e reaproveitamento de gases.

Figura 10 – Projeto no contexto de economia circular.



Fonte: Autoria Própria, 2025

Dessa forma, uma problemática ambiental de escala global é transformada em uma oportunidade para reduzir os impactos negativos e promover práticas industriais mais sustentáveis. O projeto propõe, acima de tudo, uma alternativa viável e ambientalmente responsável para o gerenciamento dos gases residuais industriais, contribuindo diretamente para a diminuição dos danos causados ao meio ambiente e à sociedade.

Além disso, busca-se incentivar a conscientização das grandes empresas e da população em geral sobre os riscos e prejuízos associados à emissão desses gases, bem como evidenciar as possibilidades de enfrentamento desse desafio por meio de soluções tecnológicas inovadoras e acessíveis.

O desenvolvimento e a aplicação do sistema proposto inserem-se no contexto da promoção da inovação tecnológica no setor produtivo, alinhando-se aos princípios da economia circular e às diretrizes da Agenda 2030, com destaque para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Com o planejamento e a implementação adequados, esse sistema tem o potencial de se consolidar como uma alternativa eficaz e estratégica na redução dos impactos ambientais, contribuindo significativamente para a construção de um ambiente mais limpo, seguro e saudável diante dos desafios ambientais atuais.

5 CONCLUSÕES

A problemática inicial desta pesquisa esteve relacionada à elevada emissão de gases poluentes provenientes de processos industriais, que, além de contribuírem para o agravamento do efeito estufa, também representam riscos diretos à saúde humana, favorecendo o surgimento de doenças respiratórias e cardiovasculares, como a Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC).

Diante disso, observou-se a necessidade de propor alternativas sustentáveis que pudessem conciliar benefícios ambientais e econômicos. Nesse contexto, iniciaram-se os estudos voltados à concepção de um sistema capaz de reduzir a emissão de gases poluentes e, em seguida, buscou-se a construção de um modelo em simulador que representasse, de forma inicial, o funcionamento desse processo.

Com a finalização do protótipo virtual, a investigação sobre os métodos de armazenamento e reutilização e a produção dos artigos relacionados, foi possível compreender que, embora o sistema demande um espaço físico considerável para instalação e apresente um custo inicial relativamente elevado, os benefícios potenciais de sua implementação em uma empresa são significativos. Tais benefícios abrangem tanto o aspecto financeiro, por meio da reutilização e comercialização dos gases, quanto o ambiental, ao contribuir para a mitigação dos impactos causados pela poluição atmosférica.

O sistema traz ganhos econômicos ao permitir que gases, antes considerados resíduos sem utilidade, sejam armazenados em cilindros apropriados e comercializados para outros fins. O dióxido de carbono (CO_2), por exemplo, quando devidamente tratado, pode ser aplicado em extintores de incêndio e sistemas de refrigeração, para geração de energia e para armazenamento com fins futuros, gerando retorno financeiro.

Além disso, a adoção do projeto (G-A-S) representa uma contribuição significativa para a imagem institucional da empresa, que poderá conquistar reconhecimento por adotar medidas a favor do meio ambiente, ampliar a possibilidade de parcerias e patrocínios, e, sobretudo, contribuir para a saúde pública, reduzindo os riscos associados à exposição a gases poluentes, como os que favorecem doenças pulmonares e cardiovasculares, a exemplo da DPOC.

Assim, o sistema busca atribuir novas funções a agentes antes nocivos à atmosfera, promovendo melhores condições de convivência em um planeta mais saudável. Como próximo passo, a pesquisa será direcionada ao desenvolvimento de um sistema em pequena escala, que permita realizar testes práticos de funcionamento e validar, de forma experimental, os resultados projetados até o momento.

REFERÊNCIAS

ANFACER. Revestimento cerâmico brasileiro tem menor pegada de carbono do que espanhol e italiano. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/noticias/revestimento-ceramico-brasileiro-tem-menor-pegada-de-carbono-do-que-espanhol-e-italiano> .

Acesso em: 19 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Opções Transversais para Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa: Captura, Transporte e Armazenamento de Carbono*. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/opcoes-transversais-para-mitigacao-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-captura-transporte-e-armazenamento-de-carbono.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

CDMF. Sistema de corte de gás para segurança. Disponível em: <https://cdmf.org.br/2020/02/07/prototipo-de-sistema-de-corte-de-gas/>. Acesso em: 21 maio 2025.

CETESB. Qualidade do ar. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/> . Acesso em: 19 maio 2025.

Combustherm. Queimador industrial: Eficiência e economia em processos. Disponível em: <https://www.combustherm.com.br/blog/queimador-industrial-eficiencia-economia-processos>. Acesso em: 19 maio 2025.

Compraco. Fornos industriais: Classificação, conservação de energia e controle de poluição. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/fornos-industriais-classificacao-conservacao-de-energia-e-controle-de-poluicao>. Acesso em: 19 maio 2025.

Confor. Processos de combustão. Disponível em: <https://confor.com.br/processos-de-combustao>. Acesso em: 19 maio 2025.

DANFOSS. Amônia na refrigeração, Refrigerantes naturais NH₃. Disponível em: <https://www.danfoss.com/pt-br/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants->

and-energy-efficiency/refrigerants-for-lowering-the-gwp/ammonia-nh3/. Acesso em: 19 maio 2025

DUARTE, João Paulo Pereira. *Tecnologias de captura de dióxido de carbono: estudo de caso da produção de barrilha por carbonatação*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/19880/1/JPPDuarte.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

EIXOS. *Brasil tem alto potencial para CCS na produção de etanol, mas conhece pouco seus reservatórios*. 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/combustiveis-e-bioenergia/bicombustiveis/brasil-tem-alto-potencial-para-ccs-na-producao-de-etanol-mas-conhece-pouco-seus-reservatorios/>. Acesso em: 19 maio 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

Fazenda dos Cogumelos, ABE, Carlos. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NoWs2Oe5ARk>. Acesso em 15 maio 2025.
Fillkplas. Emissão de partículas e lavadores de gases em fornos industriais. Disponível em: <https://fillkplas.com.br/emissao-de-particulas-e-lavadores-de-gases-em-fornos-industrais>. Acesso em: 19 maio 2025.

GAS TECHNIQUE. ABNT NBR 12188:2016 – Sistemas de gases medicinais. Disponível em: <https://gastecnicque.com.br/abnt-12188.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

GOBBO, Roque Luiz; et al. Apresentação de protótipo. Disponível em: <https://fr.scribd.com/presentation/687496074>. Acesso em: 21 maio 2025.

IPCC. Sixth Assessment Report. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/>. Acesso em: 19 maio 2025.

MAXWELL. Estudo das tecnologias de transporte de gás natural. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13793/13793_3.PDF. Acesso em: 21 maio 2025.

MDPI. E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/3995>. Acesso em 23 de julho 2025.

Mega Solda Gases. Queimador para forno industrial: Tudo o que você precisa saber para otimizar a sua produção. Disponível em:

<https://www.megasoldagases.com.br/blog/categorias/artigos/queimador-para-forno-industrial-tudo-o-que-voce-precisa-saber-para-otimizar-a-sua-producao>.

Acesso em: 19 maio 2025.

Messer Brasil. Melhores sistemas de combustão para sua indústria. Disponível em: <https://www.messer-br.com/blog/sistemas-de-combustao>. Acesso em: 19 maio 2025.

MUNDO EDUCAÇÃO. Chuvas ácidas. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/chuvas-acidas.htm> . Acesso em: 19 maio 2025.

NOAA. Ocean Acidification. Disponível em: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification>. Acesso em: 19 maio 2025.

OGCI. *Hubs de CCUS no Brasil: Construindo Cenários, Superando Barreiras*. 2024. Disponível em: <https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2024/03/CCUS-Brazil-WP-PT-vf.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

OXI AMBIENTAL. Contaminação do solo por metais pesados. Disponível em: <https://oxiambiental.com.br/contaminacao-do-solo-por-metais-pesados/>. Acesso em: 19 maio 2025.

PETROBRAS. *Veja o maior programa de captura de carbono (CCUS) do mundo*. 2023. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/ccus>. Acesso em: 19 maio 2025.

RESEARCHGATE. Projeto de compressor com fins didáticos. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/336550328>. Acesso em: 21 maio 2025.

REVISTA FT. Sistema para detecção de vazamento de gás. Disponível em: <https://revistaft.com.br/sistema-para-deteccao-de-vazamento-de-gas/>. Acesso em: 21 maio 2025.

ABENGE. Protótipo de biodigestor. Disponível em: <https://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/5/Artigos/126646.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

SAG Industrial. A importância dos combustíveis no forno industrial da SAG Industrial. Disponível em: <https://www.sagindustrial.com.br/a-importancia-dos-combustiveis-no-forno-industrial-da-sag-industrial>. Acesso em: 19 maio 2025.

SME Group. Subprodutos da produção de altos fornos e sua utilização. Disponível em: <https://www.sme-group.com/pt-br/blog/subprodutos-da-producao-de-altos-fornos-e-sua-utilizacao>. Acesso em: 19 maio 2025.

Ticino Comercial. Queimadores industriais: Tipos, funcionamento e aplicações. Disponível em: <https://ticino.com.br/queimadores-industriais-tipos-funcionamento-e-aplicacoes>. Acesso em: 19 maio 2025.

TLV. Recuperação de Calor Residual. Disponível em: <https://www.tlv.com/pt-br/steam-info/steam-theory/energy-saving/waste-heat-recovery>. Acesso em 23 de julho 2025.