

ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE GASES: UM ESTUDO DAS TECNOLOGIAS CCUS E P2G NA BACIA DO RECÔNCAVO

MARIA EDUARDA DE ANDRADE RIOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ALANA ALMEIDA DA COSTA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

GEORGE CÂMARA
SENAI CIMATEC

ROBERTO CÂMARA

ROSANA LOPES LIMA FIALHO

Introdução

Reservatórios geológicos têm sido considerados uma alternativa para armazenamento de gases em larga escala, auxiliando em problemas relacionados à intermitência e falta de despachabilidade das fontes de energia renováveis. No entanto, nem todo reservatório é adequado para instalações de armazenamento de energia, principalmente hidrogênio, por questões como permeabilidade, porosidade, profundidade, rocha capeadora, entre outros. A Bahia abriga vários reservatórios esgotados de óleo e gás, podendo ser um potencial local para aplicação das tecnologias relacionadas ao armazenamento dos gases.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Devido à natureza estocástica e não contínua da disponibilidade de fontes renováveis, o armazenamento de energia elétrica é um dos principais desafios para a integração de usinas renováveis de grande porte na rede elétrica. O armazenamento de gases na formação geológica, onde o gás armazenado pode ser retirado em períodos de alta demanda é uma opção de armazenamento de energia a longo prazo. O objetivo geral deste estudo é estudar duas das tecnologias de armazenamento subterrâneo de gases, a CCUS e P2G para potencial aplicação dessas tecnologias em reservatórios da Bacia do Recôncavo.

Fundamentação Teórica

Sistemas subterrâneos de armazenamento de gases, incluindo o armazenamento de gás natural, CO₂ e H₂, estão sendo explorados como uma solução potencial para a transição energética, com o H₂ podendo ser armazenado no subsolo em formações geológicas, como aquíferos e reservatórios de petróleo e gás depletados. Tecnologias como a captura, armazenamento, captura e utilização de carbono (CCUS) e a Power to Gas (P2G) representam tecnologias protagonistas do processo de transição energética e podem ser aplicadas em reservatórios geológicos.

Metodologia

Para a execução deste trabalho foi realizado um estudo exploratório, em livros, artigos, revistas e documentos, dado que foi possível o conhecimento do objeto tanto no contexto em que se insere como, o seu significado e extensão. A metodologia de pesquisa aplicada neste trabalho constituiu-se na utilização de dados secundários. Esses dados foram obtidos através da análise dos documentos disponibilizados pela EPE (2022), consulta à especialistas de outras universidades, participação em cursos e eventos relacionados ao objeto de estudo.

Análise dos Resultados

Os reservatórios de petróleo e gás depletados são opções adequadas para armazenamento subterrâneo de gases, devido às suas estruturas geológicas já estarem bem caracterizadas, boa estanqueidade dos reservatórios e integridade da sua rocha capeadora, além da pré-existência de instalações superficiais e subterrâneas. A Bahia foi pioneira na aplicação das tecnologias subterrâneas no Brasil. Além da sua proximidade com refinarias, polo petroquímico, termelétricas e as maiores cidades baianas, a torna uma região potencial para a aplicação de tecnologias, como CCUS e P2G.

Conclusão

O pioneirismo quanto aos novos usos dos reservatórios geológicos pode colocar toda a indústria de petróleo e gás do estado da Bahia em destaque mundial, principalmente em um estado que possui a maior capacidade instalada para produção de energia eólica e um dos maiores produtores de energia solar do Brasil. O uso dos reservatórios depletados de petróleo e gás para armazenamento de CO₂, H₂ e outros gases, através de tecnologias como a CCUS e P2G, pode possibilitar a produção de metano para atender diversas indústrias sendo mais um elemento para contribuir com a transição energética.

Referências Bibliográficas

CÂMARA, G. A. B.; GÁLVEZ-MARTOS, J. L. (2022, July). Decision-making method for application of Underground Technologies in porous geological reservoirs. In 11th International Workshop on Advances in Cleaner Production. Florence, Italy. CÂMARA, G.; GALERA, S. Geological Reservoir Use: New Trends – A Legal Aspect Analysis. In 10th International Workshop on Advances in Cleaner Production. Ferrara, Italy, 2021. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>.

Palavras Chave

Armazenamento geológico, Bacia do Recôncavo, CCUS e P2G

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fapesb para realização deste trabalho.

ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE GASES: UM ESTUDO DAS TECNOLOGIAS CCUS E P2G NA BACIA DO RECÔNCAVO

1 INTRODUÇÃO

Reservatórios geológicos têm sido considerados uma alternativa para armazenamento de gases em larga escala, auxiliando em problemas relacionados à intermitência e falta de despachabilidade das fontes de energia renováveis. Estudos e projetos recentes apontam os reservatórios geológicos como uma excelente opção para armazenamento de gases, como hidrogênio (H_2), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), ou um local para conversão de energia renovável em gás (MATOS et al., 2019).

No contexto brasileiro, a Bahia reúne aspectos que podem favorecer o armazenamento geológico de gases, por ser um dos estados com maior produção de energia solar e eólica (EPE, 2022). A Bahia também, abriga a Bacia do Recôncavo, que é a primeira bacia produtora de petróleo do Brasil e possui vários reservatórios esgotados de óleo e gás, podendo ser um potencial local para aplicação das tecnologias relacionadas ao armazenamento dos gases.

O armazenamento geológico em larga escala de, por exemplo, gás natural, como em cavernas salinas e meios porosos (aquíferos salinos, reservatórios esgotados de petróleo e gás), é viável em vários projetos comerciais atuais. No entanto, nem todo reservatório é adequado para instalações de armazenamento de energia, principalmente hidrogênio, por questões como permeabilidade, porosidade, profundidade, rocha capeadora, entre outros. Além disso, não existe experiência industrial no armazenamento de hidrogênio puro em campos petrolíferos esgotados no mundo, existindo apenas experiência industrial no armazenamento de hidrogênio misturado com outros gases (ZIVAR et al., 2021).

Por outro lado, o caminho para a descarbonização também requer lidar com grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2) antropogênico, já que o petróleo e o gás natural ocupam uma grande parcela da matriz energética mundial (EPE, 2022), o que torna necessário o desenvolvimento de soluções globais e abrangentes para o tratamento, transporte e armazenamento de uma variedade de gases e misturas de gases. No futuro, gases como CO_2 , H_2 , e metano podem estar competindo pelos mesmos locais de armazenamento, tratados nos mesmos ativos de modo alternado (SAMARA; von OSTROWSKI; JAEGER, 2022).

Este trabalho faz um levantamento das tecnologias para armazenamento geológico de gases, enfatizando as vantagens e desvantagens de duas delas: a captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS – *Carbon Capture Utilization and Storage*) e a tecnologia conhecida como *Power-to-Gas* (P2G), uma combinação de H_2 e CO_2 , resultando em CH_4 e água (H_2O). Adicionalmente é apresentada as condições que podem favorecer a aplicação dessas tecnologias em reservatórios de petróleo e gás natural da Bacia do Recôncavo.

2 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis está aumentando consideravelmente, sendo que no Brasil atingiu 78,1% em 2021 (EPE, 2022). Devido à natureza estocástica e não contínua da disponibilidade de fontes renováveis, o armazenamento de energia elétrica é um dos principais desafios para a integração de usinas renováveis de grande porte na rede elétrica (MATOS et al., 2019). Baterias e capacitores ou outros meios são adequados para armazenamento de curto prazo de gases, como hidrogênio (H_2) e representam uma capacidade de armazenamento limitada. A outra opção é o armazenamento de gases na formação geológica, onde o gás armazenado pode ser retirado em períodos de alta demanda e, portanto, oferece um armazenamento de longo prazo. Os reservatórios geológicos têm sido considerados uma alternativa para armazenamento de gases em larga escala, auxiliando nos problemas

relacionados à intermitência e falta de despachabilidade das fontes de energia renováveis (MATOS et al., 2019). A Bacia do Recôncavo, localizada no estado da Bahia, apresenta diversos reservatórios de petróleo e gás natural depletados que podem servir como armazenadores de gases e fornecimento desses gases para diversos usos e indústrias. Desta forma, o objetivo geral deste estudo é estudar duas das tecnologias de armazenamento subterrâneo de gases, a CCUS e P2G para potencial aplicação dessas tecnologias na Bacia do Recôncavo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O uso do subsolo como uma opção para armazenar energia é fundamental para a consolidação das energias renováveis e o estabelecimento de uma economia verde. Sistemas subterrâneos de armazenamento de gases, incluindo o armazenamento de gás natural, CO₂ e H₂, estão sendo explorados como uma solução potencial para a transição energética, com o H₂ podendo ser armazenado no subsolo em formações geológicas, como aquíferos e reservatórios de petróleo e gás depletados.

Conforme Rifkin (2002), o uso de H₂ em larga escala é apontado como o futuro da transição energética, haja vista que tem potencial para transcender as estruturas econômicas, políticas e sociais. Esse autor afirma que essas mudanças teriam um impacto de mesma relevância que o início do uso do carvão mineral como combustível no século XVIII, dando início a Revolução Industrial. Assim, percebe-se a existência de uma extensa área de aplicação para o estudo do armazenamento geológico de gases no Brasil visto que o país tem aumentado o uso de energias renováveis na matriz energética, saindo de 39,5% em 2014 e passando para 44,7% em 2021 (EPE, 2022).

Entre as principais tecnologias de armazenamento subterrâneo, cita-se: o armazenamento de gás natural (Natural Gas Storage - NGS); o armazenamento e captura de carbono (Carbon Capture and Storage - CCS); a captura, armazenamento e utilização de carbono (CCUS – *Carbon Capture Utilization and Storage*); o armazenamento de energia em forma de ar comprimido (Compressed Air Energy Storage - CAES); o armazenamento subterrâneo do gás H₂ (Underground Storage Gas Hydrogen); e a conversão de energia para gás (Power-To-Gas, P2G via H₂) (CÂMARA; GALERA, 2021). Neste trabalho a ênfase está na tecnologia CCUS, que engloba a CCS e a P2G.

Quando se fala de tecnologias protagonistas do processo de transição energética, a CCUS, é a que aparece como um dos maiores destaques. Na tecnologia CCUS ocorre a captura CO₂ a fim de ser convertido em recursos de suma relevância, como produtos químicos, materiais e combustíveis de transporte. Ainda vale ressaltar que a injeção de CO₂ pode contribuir para pressurizar o reservatório e aumentar a recuperação de petróleo (Figura 1). Sua aplicação na matriz energética permite a rotatividade do gás carbônico como combustível na cadeia produtiva, além de impactar de diversas formas, questões políticas e econômicas que podem trazer diversos benefícios para a organização da sociedade e da indústria (PHILBIN, 2020).

Figura 1 - Esquema simplificado da Tecnologia CCUS

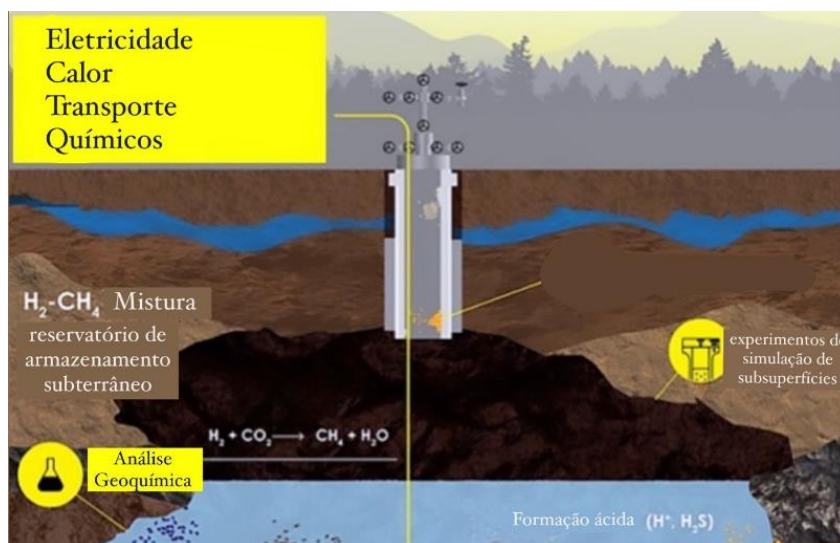


Fonte: Adaptado de Prospero Events Group, 2022.

A tecnologia P2G representa um processo essencial que aborda a gestão do excedente de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis. É por meio da eletrólise da água que ocorre a conversão do excedente de eletricidade em hidrogênio ou metano (gás natural) renovável. Esse processo envolve a divisão de suas moléculas em hidrogênio e oxigênio, com o H₂ resultante podendo ser armazenado e utilizado como combustível limpo para diversas finalidades, conhecido por hidrogênio verde (BUDNY; MADLENER; HILGERS, 2014).

De acordo com Judd e Pinchbeck (2016), claramente, o armazenamento de gases é um componente essencial na cadeia de gás natural e, em um cenário futuro, suas várias instalações podem entrar em contato com misturas de gás natural/hidrogênio. Existem demonstrações de projetos P2G na Europa e alguns dos projetos incluem injeção na rede de gás natural (STEEN, 2016).

Figura 2 - Ilustração da reação que ocorre no reservatório a partir da interação do hidrogênio e o gás carbônico.



Fonte: Adaptada de NETL (2022).

Em alguns cenários, o H₂ pode ser adicionalmente transformado em metano renovável por meio de um processo conhecido como metanação. Após gerado, pode ser injetado na rede de gás natural existente ou armazenado em reservatórios subterrâneos para uso futuro, o que representa uma alternativa para a exploração desse gás, e uma maneira de manter sua rotatividade no ciclo de energia sem emissão de novos poluentes. A tecnologia P2G desempenha um papel mais que crucial na gestão da intermitência da geração de energia renovável, oferecendo uma solução eficaz para o armazenamento e aproveitamento do excedente de energia, contribuindo assim para a estabilidade e sustentabilidade da matriz energética (VASCONCELOS; OLIVEIRA; ASSAYAG, 2010).

4 METODOLOGIA

Para a execução deste trabalho foi realizado um estudo exploratório, em livros, artigos, revistas e documentos, dado que foi possível o conhecimento do objeto tanto no contexto em que se insere como, o seu significado e extensão. A metodologia de pesquisa aplicada neste trabalho constitui-se na utilização de dados secundários. Esses dados foram obtidos através da análise dos documentos disponibilizados pela EPE (2022), consulta à especialistas de outras universidades, participação em cursos e eventos relacionados ao objeto de estudo.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Para que o armazenamento geológico seja realmente uma alternativa segura e eficaz para o processo de transição energética, são requeridas condições geológicas favoráveis, como formações e estruturas rochosas adequadas, para garantir o armazenamento seguro e protegido de substâncias no subsolo, tudo isso a longo prazo. Os reservatórios de petróleo e gás depletados são opções mais adequadas para armazenamento subterrâneo de gases, devido às suas estruturas geológicas já estarem bem identificadas e caracterizadas, boa estanqueidade das estruturas dos reservatórios e integridade da sua rocha capeadora, além da pré-existência de instalações superficiais e subterrâneas (ZIVAR et al., 2021).

No Brasil, as condições geológicas na Bahia oferecem locais privilegiados para armazenamento geológico, como o campo de Camaçari e a formação de sal na Ilha de Itaparica, contidos na Bacia do Recôncavo, cuja possui formação rochosa de arenito, ideal para armazenamento de energia, e madura, ou seja, em declínio produtivo, para que seja realizada a injeção de gases com a finalidade de geração de energias renováveis (CÂMARA; GÁLVEZ-MARTOS, 2021).

A Bahia também foi pioneira na aplicação das tecnologias subterrâneas no Brasil em um estudo de injeção de CO₂ para recuperação de petróleo (EOR-CO₂), que se iniciou em 1987 pela Petrobras com um projeto no campo de Buracica, localizado na Bacia do Recôncavo (KETZER et al., 2015). Outrossim, sua proximidade com refinarias (potenciais produtores de hidrogênio), polo petroquímico, polo industrial, termelétricas e outras indústrias, aliada a proximidade com as maiores cidades baianas (Salvador e Feira de Santana), a torna uma região potencial para a aplicação de tecnologias subterrâneas.

Para que as tecnologias CCUS e P2G possam vir a ser plenamente implantadas e aproveitadas é preciso reconhecer que todas possuem pontos fortes que as tornam indispensáveis no cenário da transição energética da matriz mundial. Entretanto, também apresentam questões que vão de encontro à sua consolidação, sejam estas consequentes de recursos econômicos não tão acessíveis, fatores políticos, além de desafios ambientais e da própria eficiência dos processos.

Conforme já mencionado, a CCUS oferece benefícios notáveis, como a aplicação avançada da recuperação de óleo (EOR), que utiliza o CO₂ capturado para aprimorar a produção

de petróleo e, ao mesmo tempo, podendo armazená-lo subterraneamente, contribuindo para a estabilidade do mercado de energia. Além disso, permite a utilização do CO₂ capturado como insumo em diversos setores, reduzindo a necessidade de novas emissões em indústrias dependentes de combustíveis poluentes, como energia, produção química, cimento e refinarias (PHILBIN, 2020). É preciso destacar que o CCUS assume um papel importante na economia circular, ajudando a mitigar os impactos das mudanças climáticas e impulsionando a inovações tecnológicas e socioeconômicas.

No entanto, existe a necessidade de uma estrutura regulatória estruturada para hospedar projetos de CCUS, uma vez que poucos países atualmente têm essas estruturas já consolidadas, sendo necessários pesquisa e desenvolvimento tecnológico contínuo para explorar oportunidades adicionais de captura de CO₂ no Brasil (CÂMARA; GALERA, 2021). Existem também desafios econômicos significativos, devido aos altos custos associados à captura, purificação e transporte do CO₂, o que limita a participação de várias nações no processo de transição energética. Adicionalmente, considerando fatores técnicos e ambientais, como a incerteza em relação ao armazenamento de longo prazo em formações geológicas (AL-MAMOORI, 2017.)

A Power-to-Gas, participa de maneira ativa do processo de transição energética, com potencial para transformar a forma como a economia e a sociedade se comportam (RIFKIN, 2002). P2G apresenta participação significativa no armazenamento de energia remanescente de diversos processos da indústria, fomentando a prática da economia verde, cuja hidrogênio é um dos principais protagonistas (CÂMARA; GALERA, 2021). Além disso, possibilita que essa energia esteja disponível para ser utilizada por outros setores da indústria, o que ainda auxilia a reduzir emissões de gases como CO₂ uma vez que não serão necessários (FORMER, 2020). P2G é a única tecnologia atualmente disponível que permite o armazenamento de longo prazo de eletricidade renovável, ao mesmo tempo em que a torna disponível para todos os outros setores de consumo de energia (DENA, 2019).

Entretanto, a eletrólise, base da tecnologia P2G, tem eficiência de conversão de energia relativamente baixa, consequência de perdas durante o processo, demandando mais recursos para rendimento satisfatório, exigindo uma infraestrutura muito específica, podendo ser economicamente complexa de se implementar e fazer manutenção. Na maioria das vezes, para a produção de metano renovável, é preciso a entrada de capital adicional, levando a custos de produção a serem ainda mais altos, quando comparamos com o hidrogênio (FILHO, 2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O pioneirismo quanto aos novos usos dos reservatórios geológicos pode colocar toda a indústria de petróleo e gás do estado da Bahia em destaque mundial, principalmente em um estado que possui a maior capacidade instalada para produção de energia eólica e um dos maiores produtores de energia solar do Brasil. O uso dos reservatórios depletados de petróleo e gás para armazenamento de CO₂, H₂ e outros gases, através de tecnologias como a CCUS e P2G, pode possibilitar a produção de metano para atender diversas indústrias sendo mais um elemento para contribuir com a transição energética em busca de uma produção mais limpa e otimizada em todos os setores da sociedade.

REFERÊNCIAS

AL-MAMOORI, A. et al. *Carbon Capture and Utilization Update*. Energy Technology, v. 5, n. 6, p. 834–849, 2017.

- BUDNY, C.; MADLENER, R.; HILGERS, C. *Economic Feasibility of Pipe Storage and Underground Reservoir Storage Options for Power-to-Gas Load Balancing*. Energy Procedia, v. 61, p. 2201–2205, 2014.
- CÂMARA, G. A. B.; GÁLVEZ-MARTOS, J. L. (2022, July). *Decision-Making Method for Application of Underground Technologies in Porous Geological Reservoirs*. In 11th International Workshop on Advances in Cleaner Production. Florence, Italy.
- CÂMARA, G.; GALERA, S. *Geological Reservoir Use: New Trends – A Legal Aspect Analysis*. In 10th International Workshop on Advances in Cleaner Production. Ferrara, Italy, 2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional**. Relatório Final, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 08 set. 2023.
- FILHO, H. N. S. et al. *Produção de Hidrogênio (Power to Gas) e suas Aplicações na Matriz Energética*. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2020.
- GERMAN ENERGY AGENCY (DENA). 2019. Disponível em: <https://www.dena.de/en/themen-projekte/projekte/projektarchiv/power-to-gas-strategy-platform/>. Acesso em: 22 set. 2023.
- JUDD, R.; PINCHBECK, D. *Hydrogen Admixture to the Natural Gas Grid*. Compendium of Hydrogen Energy (pp. 165-192), 2016 Woodhead Publishing.
- KETZER, J. M., MACHADO, C. X., ROCKETT, G. C., & IGLESIAS, R. S. *Brazilian Atlas of CO₂ Capture and Geological Storage*. 2015.
- MATOS, C. R., CARNEIRO, J. F., & SILVA, P. P. *Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification*. Journal of Energy Storage, 21, 241-258, 2019.
- NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. *Power to Gas*. 2022. Disponível em: <https://fuelcellworks.com/news/netl-conducts-surveillance-and-monitoring-technology-research-for-underground-hydrogen-storage-as-part-of-shasta-collaboration/>. Acesso em: 08 set. 2023.
- PHILBIN, S. P. *Critical Analysis and Evaluation of the Technology Pathways for Carbon Capture and Utilization*. Clean Technologies, v. 2, n. 4, p. 492–512, 2020.
- PROSPERO EVENT GROUP. *CCUS*. 2022. Disponível em: <https://twitter.com/prosperoevents?lang=en>. Acesso em: 22 set. 2023.
- RIFKIN, Jeremy. *The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. 2002.
- SAMARA, H., von OSTROWSKI, T., & JAEGER, P. *Geological Storage of Carbon Dioxide and Hydrogen in Jordanian Shale Formations*. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE-210202-MS, 2022.
- VASCONCELOS, A. B.; OLIVEIRA, D. C. DE; ASSAYAG, M. N. *Uso do CO₂ como Matéria-prima para Produção de Combustíveis e Intermediários*. UFRJ, 2010.
- ZIVAR, D., KUMAR, S., & FOROOZESH, J. (2021). *Underground Hydrogen Storage: A Comprehensive Review*. International Journal of Hydrogen Energy. 2021.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fapesb para realização deste trabalho.