
Aplicação de metodologias para o cálculo do potencial teórico do H₂ em cavernas salinas: o caso da estrutura da Ilha de Matarandiba

Application of methodologies for calculating the theoretical potential of H₂ in salt caverns: the case of the Matarandiba Island structure

Recebido: 00/00/2024 | Aceito: 00/00/2024 | Publicado: 00/00/2024

Lucimara Dias Carvalho

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9380-954X>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: lucimaradias@aluno.ufrb.edu.br

Roberto José Batista Câmara

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3034-6235>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: robertocamara@ufrb.edu.br

RESUMO

O aumento da demanda por energia e o uso crescente de combustíveis fósseis têm contribuído para o aquecimento global e a vulnerabilidade energética mundial, evidenciando a necessidade urgente de uma transição para fontes de energia mais sustentáveis. O hidrogênio, com seu alto poder calorífico, surge como uma solução promissora, embora o armazenamento em larga escala e sua utilização como energético represente um desafio significativo. Este estudo aplica duas metodologias de cálculo do potencial teórico de armazenamento de hidrogênio em cavernas salinas, na estrutura salina da Ilha de Matarandiba-BA. Através da metodologia de Caglayan et al. (2020), os cálculos indicam um potencial energético total de 8,2 TWh, enquanto a metodologia de Câmara (2019) apresentou um valor de 8,4 TWh. Esses resultados apontam inicialmente a possibilidade da utilização do hidrogênio como um vetor energético para matrizes energéticas e elétricas mais sustentáveis no futuro.

Palavras-chave: Hidrogênio; Armazenamento em larga escala; Cavernas salinas.

ABSTRACT

The increasing demand for energy and the rising use of fossil fuels have contributed to global warming and global energy vulnerability, highlighting the urgent need for a transition to more sustainable energy sources. Hydrogen, with its high calorific value, emerges as a promising solution, although large-scale storage and its use as an energy carrier present significant challenges. This study applies two methodologies for calculating the theoretical potential of hydrogen storage in salt caverns, specifically within the salt structure of Matarandiba Island, Bahia. Using the methodology of Caglayan et al. (2020), the calculations indicate a total energy potential of 8.2 TWh, while the methodology of Câmara (2019) yielded a value of 8.4 TWh. These results initially suggest the feasibility of utilizing hydrogen as an energy vector for more sustainable energy and electricity matrices in the future.

Keywords: Hydrogen; Large-Scale Storage; Salt Caverns.

INTRODUÇÃO

O histórico de crises energéticas mundiais comprova o crescimento contínuo da demanda por energia ao longo dos anos, acompanhado por um aumento significativo no uso de combustíveis fósseis, gerando um cenário de vulnerabilidade global. A crise mundial do petróleo na década de 70, a crise hídrica no Brasil em 2001, a crise energética durante a pandemia de COVID19 em 2020 e a invasão da Ucrânia pela Rússia em 2022 são grandes exemplos que evidenciam a centralização e a forte dependência das matrizes energéticas e elétricas mundiais em combustíveis fósseis.

Além disso, outro fator de preocupação mundial é o aumento da temperatura média global e os impactos das mudanças climáticas no setor socioambiental. Para que a transição energética seja considerada segura, é essencial manter a elevação da temperatura abaixo de 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais, como estipulado pelo Acordo de Paris durante a COP21 em 2015 (MCTI, 2015). Atualmente o aquecimento global já alcançou 1,2 °C acima da referência inicial, e as emissões globais ainda não atingiram seu pico (ONU, 2023). Esses fatores destacam a fragilidade do sistema energético atual e a necessidade de uma transição para fontes de energia mais sustentáveis, visando a segurança energética necessária para a consolidação de um sistema mais sustentável (FGV Energia, 2023).

Nesse contexto, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) estabelece a meta de alcançar zero emissões líquidas de CO₂ até 2050 (IPCC, 2024), com o objetivo de limitar o aumento da temperatura global. Esse cenário motivou uma série de novas iniciativas com ênfase no aumento da participação de renováveis nas matrizes energéticas e elétricas do mundo, já que são compostas mais de 80% e 60%, respectivamente, por combustíveis fósseis (IEA, 2023a). O Brasil, por sua vez, apresenta um panorama diferente, já que a matriz energética apresentou, no último ano, 49,1% e a matriz elétrica atingiu 89,2% de fontes renováveis (BEN, 2024). Esta predominância destaca o país como um exemplo de diversificação e sustentabilidade energética, refletindo o potencial do Brasil em liderar a transição para energias mais limpas.

Entretanto, o país ainda se mostra fortemente dependente da fonte hídrica, o que centraliza as matrizes e continua a gerar incertezas quanto à segurança energética. Neste

cenário, o hidrogênio emerge como uma solução estratégica para a transição energética global e a descarbonização dos sistemas elétricos. Sua utilização será importante para a integração de fontes intermitentes, como a solar e a eólica, permitindo o armazenamento e a gestão eficiente de energia. O avanço nas tecnologias de captura, utilização e armazenamento de hidrogênio tem sido notavelmente significativo e necessário. O panorama atual de projetos revela que mais de 400 GW de capacidade de eletrólise para produção de hidrogênio estão em fase de desenvolvimento no mundo, com a meta de tornarem-se operacionais até 2030 (IEA, 2023b).

A versatilidade do hidrogênio está em poder ser convertido em eletricidade ou combustíveis sintéticos para diversas aplicações (EPE, 2021). Apesar disso, enfrenta desafios devido ao seu alto custo e ao elevado gasto energético da sua síntese. A utilização de água na produção de hidrogênio também levanta questões significativas por conta da alta demanda para produção, mas o aproveitamento da água do mar dessalinizada ou de águas impróprias para consumo humano, como águas poluídas, pode oferecer uma solução sustentável e renovadora para os mananciais (FGV Energia, 2023).

A cadeia produtiva do hidrogênio é bastante ampla, englobando não só as plantas de produção, mas a extração de matérias-primas para o processo de hidrólise e o desenvolvimento de materiais para o transporte, normalmente feito via dutos. O armazenamento em larga escala de hidrogênio, será essencial para consolidar o país como um líder no setor e promoverá a sustentabilidade energética em escala global, servindo como um vetor energético e permitindo o armazenamento de energia renovável durante períodos de alta produção e baixa demanda elétrica.

A principal característica do hidrogênio é o elevado potencial calorífico, que o torna uma fonte de energia altamente eficiente. Contudo, sua alta volatilidade exige um armazenamento seguro e compacto. Devido à sua natureza leve e a tendência de se expandir rapidamente quando liberado, o hidrogênio precisa ser armazenado sob altas pressões para minimizar seu volume e garantir a segurança. Essas características impõem desafios técnicos significativos, demandando soluções avançadas em termos de materiais e tecnologias de armazenamento para prevenir riscos e otimizar a eficiência no uso.

A escolha do meio armazenador deve considerar diversos fatores, incluindo o volume a ser armazenado, o intervalo de tempo de armazenamento, a velocidade de

descarga necessária e a disponibilidade geográfica. Em geral, para grandes volumes e para períodos prolongados, o armazenamento geológico se revela mais adequado, uma vez que oferece uma solução eficiente para a retenção de grandes quantidades de hidrogênio por longos períodos, utilizando formações subterrâneas naturais (Amaral, 2021). Essa estratégia de armazenagem é particularmente vantajosa em locais onde as características geológicas são favoráveis, permitindo não apenas a segurança e a integridade do armazenamento, mas também a minimização de custos associados ao processo.

Um projeto de armazenamento geológico pode ser desenvolvido em reservatórios depletados de petróleo e gás natural, minas exauridas, cavernas naturais ou cavernas salinas. Dentre essas opções, as cavernas salinas, formadas por processos de dissolução, oferecem características favoráveis ao armazenamento gasoso, como impermeabilidade e resistência a altas pressões, essenciais para armazenar hidrogênio de forma eficiente e econômica. A infraestrutura para o armazenamento em cavernas salinas é relativamente simples e pode ser desenvolvida a um custo menor em comparação com outros métodos de armazenamento subterrâneo, visto que são estruturas anteriormente já exploradas para extração de sal-gema.

Além disso, as cavernas salinas podem alcançar uma eficiência de 98% sem contaminar o hidrogênio armazenado, uma vez que o sal é inerte ao hidrogênio (Olabi, 2021). Também se destacam pela flexibilidade na escala de armazenamento, pela menor quantidade de gás de colchão (percentual de gás que não é retirado da caverna, servindo para aumento de compressão) e pela rapidez nos processos de injeção e extração. A rocha de sal possui baixos níveis de porosidade e impermeabilidade em comparação com outras rochas predominantes como xisto, lamito e granito, além de apresentar boa capacidade de autocura e plasticidade, o que confere maior estabilidade mecânica e estanqueidade ao ar (Liu, 2023).

No estado da Bahia, Brasil, a Dow Química Brasil opera no município de Vera Cruz, na Ilha de Matarandiba, há 47 anos uma área para extração de salmoura. O maciço salino explorado possui 51 poços, estando 10 ainda em exploração. A estrutura é formada por uma camada salina que se encontra entre 1200 e 1300 metros de profundidade, com aproximadamente 20 a 60 metros de espessura e 150 metros de diâmetro por poço. Acima

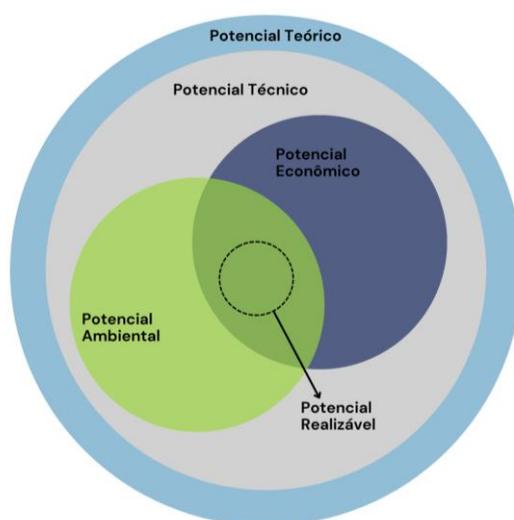
dessa camada de sal encontra-se uma camada de rochas que atua como uma laje natural, conferindo estabilidade à estrutura geológica da área (CPRM, 2018).

METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo calcular o potencial teórico do maciço salino da Ilha de Matarandiba-BA de acordo com duas metodologias publicadas, sendo elas a de Caglayan et al. (2020) e uma adaptação da metodologia utilizada no trabalho de Câmara (2019).

O conceito de potencial teórico é descrito por Caglayan et al. (2020) como o limite superior absoluto de uma capacidade, sem considerar restrições práticas ou limitações externas (Figura 1). Por exemplo, no armazenamento de hidrogênio em cavernas salinas, o potencial teórico indica a quantidade total de hidrogênio que poderia ser armazenada em todas as cavernas do maciço e sem levar em consideração outros fatores impeditivos e restritivos do projeto como: análise ambiental, análise econômica, análise social dentre outras. . Portanto, o potencial teórico é uma medida idealizada que pode ser utilizada como ponto de partida para análises mais detalhadas, onde outras restrições e condições reais são consideradas.

Figura 1. Conceito de Potencial por Caglayan et al. (2020)



Fonte: Traduzido de Caglayan et al. (2020)

A metodologia 1, proposta por Caglayan et al. (2020), para calcular o potencial teórico de armazenamento de hidrogênio na estrutura salina de Matarandiba segue um processo sistemático. O procedimento é dividido em cinco etapas principais. Inicialmente, calcula-se a temperatura da caverna com base na profundidade e na altura, parâmetros fundamentais para determinar as propriedades físicas do hidrogênio armazenado (equação 1).

$$T = 288 + 0,025 \times (Y - \frac{h_c}{2}) \quad (1)$$

Onde:

T : Temperatura da caverna (K);

Y : Profundidade da caverna (m);

h_c : Altura da caverna (m).

Em seguida, a pressão máxima que a caverna pode suportar é estimada, levando em consideração a densidade da rocha e a profundidade, a partir da qual são derivadas as pressões máxima $P_{máxg}$ e mínima P_{ming} de trabalho do gás, que correspondem à 80% e 24% da $P_{máx}$ respectivamente (equação 2).

$$P_{máx} = \rho_{rx} \times g \times (Y - \frac{h_c}{2}) \quad (2)$$

Onde:

$P_{máx}$: Pressão máxima (Pa);

ρ_{rx} : Densidade da rocha (Kg/m³);

g : Aceleração da gravidade (m/s²);

Y : Profundidade da caverna (m);

h_c : Altura da caverna (m).

Na terceira etapa, determina-se a densidade do hidrogênio, utilizando a equação dos gases ideais ajustada para a compressibilidade do hidrogênio, considerando as

pressões de trabalho (equação 3). Tendo o resultado anterior e este, é possível também obter as densidades máxima $\rho_{máxg}$ e mínima $\rho_{míng}$ do gás.

$$\rho_{h2} = \frac{P_i \times M}{Z \times R \times T} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{h2} : Densidade do hidrogênio (Kg/m³);

P_i : Pressão máxima e mínima de trabalho do gás (Pa);

M : Massa molar do hidrogênio (Kg/mol);

Z : Constante de compressibilidade;

R : Constante universal dos gases (J/K.mol);

T : Temperatura da caverna (K).

A quarta etapa envolve o cálculo da massa de hidrogênio que pode ser armazenada na caverna, levando em conta as densidades de gás, o volume da caverna e um coeficiente de segurança de 70% (equação 4).

$$m_g = (\rho_{máxg} - \rho_{míng}) \times V_c \times \theta_s \quad (4)$$

Onde:

m_g : Massa de gás na caverna (Kg);

$\rho_{máxg}$: Pressão máxima de trabalho do gás na caverna (Pa);

$\rho_{míng}$: Pressão mínima de trabalho do gás na caverna (Pa);

V_c : Volume da caverna (m³);

θ_s : Coeficiente de segurança.

Finalmente, o potencial energético da caverna é calculado multiplicando a massa de hidrogênio pelo poder calorífico inferior do gás, resultando no potencial energético total disponível para aproveitamento (equação 5).

$$P_{cav} = m_g \times p_c \quad (5)$$

Onde:

P_{cav} : Potencial energético da caverna (GWh);

m_g : Massa de gás na caverna (Kg);

p_c : Poder calorífico inferior do hidrogênio (KWh/Kg).

Já a metodologia 2, adaptada de Câmara (2019), tem como fundamento a classificação de reservas de petróleo e gás recomendada pela Society of Petroleum Engineers (SPE). De acordo com essa abordagem, as quantidades de hidrocarbonetos no subsolo são organizadas em dois grandes grupos: recursos e reservas, os quais podem ser subdivididos em categorias de acordo com o nível de certeza associado, sendo estes possíveis, prováveis e comprovados. Neste estudo, utilizou-se a metodologia de Câmara (2019), com ênfase específica no estágio de Recurso Total Comprovado. Sendo assim, o potencial energético por caverna pode ser realizado seguindo as quatro etapas a seguir.

Inicialmente é calculado o Volume Total de Recurso Comprovado (TPRV), utilizando o volume real da caverna, as incertezas geológicas e as restrições regulatórias, de acordo com a equação 6.

$$TPRV = V_R - [V_R(\gamma + \varphi)] \quad (6)$$

Onde:

$TPRV$: Volume Total de Recursos Comprovados (m³);

V_R : Volume Real da Caverna (m³);

γ : Incertezas geológicas;

φ : Restrições regulatórias.

A equação 7 possibilita o cálculo do volume útil da caverna, sendo este a diferença entre o volume real e o volume de gás de colchão que permanece dentro da caverna para manter as condições necessárias de armazenamento do gás em meios porosos ou em cavernas.

$$V_u = TPRV \times \phi \quad (7)$$

Onde:

V_u : Volume útil (m³);

$TPRV$: Volume Total de Recursos Comprovados (m³);

ϕ : Gás de removível (%).

Em seguida, a massa total de hidrogênio que pode ser armazenada é calculada com a equação 8, utilizando os dados de temperatura e pressão da caverna em estudo.

$$m_{h_2} = V_u \times \rho_{h_2} \quad (8)$$

Onde:

m_{h_2} : Massa de hidrogênio (Kg);

V_u : Volume útil (m³);

ρ_{h_2} : Densidade do hidrogênio (Kg/m³).

Por fim, o potencial energético da caverna é calculado pela equação 9, multiplicando a massa de gás na caverna pelo seu menor poder calorífico.

$$P_{cav} = m_g \times p_c \quad (9)$$

Onde:

P_{cav} : Potencial energético da caverna (GWh);

m_g : Massa de gás na caverna (Kg);

p_c : Poder calorífico inferior do hidrogênio (KWh/Kg).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Cálculo do Potencial Teórico utilizando a Metodologia 1

Os valores médios de profundidade Y e altura h_c da caverna, utilizados na equação 01 correspondem a 1250 m e 35 m, respectivamente, como uma média dos dados disponibilizados pela CPRM (2018), o que permitiu calcular a temperatura da caverna.

$$T = 288 + 0,025 \times \left(1250 - \frac{35}{2}\right) = 318,81K$$

A pressão máxima que a caverna pode suportar foi determinada a partir da Equação 2, considerando-se a densidade da rocha de sal-gema ρ_{rx} como 2,168 g/cm³ (Melo; Carvalho; Pinto, 2008) e a aceleração da gravidade g igual a 9,8 m/s², como adotado por Halliday, Resnick e Walker (2013).

$$P_{máx} = 2,168 \times 9,8 \times \left(1250 - \frac{35}{2}\right) = 26.186.188 Pa$$

Foi considerado na próxima etapa o hidrogênio como um gás ideal, permitindo a utilização da constante de compressibilidade Z igual a 1. Além disso, foram adotados a massa molar do hidrogênio M como 0,002016 kg/mol e a constante universal dos gases R com valor de 8,31 J/mol.K (Atkins; Jones, 2010). A densidade foi então calculada utilizando a Equação 3, considerando as pressões máxima $\rho_{máxg}$ (80%) e mínima $\rho_{míng}$ (24%) de trabalho do gás.

$$\rho_{máxg} = \frac{26.186.188 \times 0,8 \times 0,002016}{1 \times 8,31 \times 318,81} = 15,94 Kg/m^3$$

$$\rho_{míng} = \frac{26.186.188 \times 0,24 \times 0,002016}{1 \times 8,31 \times 318,81} = 4,78 Kg/m^3$$

Para determinar a massa de gás armazenada na caverna utilizou-se, na Equação 4, um volume aproximado de 618.501 m³ por cavidade, calculado a partir dos valores de diâmetro e altura das cavernas e considerando o método de injeção da mineradora e o formato cilíndrico gerado (Câmara, 2019). Foi utilizado um coeficiente de segurança de 70% (Caglayan, 2020).

$$m_g = (15,94 - 4,78) \times 618.501 \times 0,7 = 4.831.729,8 \text{ Kg}$$

Assim, o potencial energético foi calculado utilizando o poder calorífico do hidrogênio p_c como 33,33 kWh/kg, obtendo-se o resultado a partir da Equação 5.

$$P_{cav} = 4.831.729,8 \times 33,29 = 160.848.285 \text{ KWh} = 160,8 \text{ GWh}$$

Por fim, multiplicando o potencial energético de uma caverna pelo número total delas, 51 neste caso, obteve-se o potencial total do maciço $P_{total} = 8,2 \text{ TWh}$.

Cálculo do Potencial Teórico utilizando a Metodologia 2

A primeira etapa deste método é calculada a partir do desenvolvimento da equação 6, considerando um percentual de 14% de insolubilidade do maciço como incerteza geológica e 2% de perda geológica de gás como a única restrição regulatória a ser considerada neste estudo (Câmara, 2019). Além disso, utilizou-se o volume real da mesma forma explicada no método 1, sendo 618.501 m³.

$$TPRV = 618.501 - [618.501(0,145 + 0,02)] = 516.448,33 \text{ m}^3$$

Em seguida, é possível calcular o volume útil de gás na caverna, adotando um percentual de 40% para o gás de colchão. É importante destacar que, na literatura, esse valor varia entre 20% e 60% (Izidoro, 2023), não sendo, portanto, um parâmetro fixo. Para tal, empregou-se a equação 7.

$$V_u = 516.448,33 \times 0,60 = 258.224,16 \text{ m}^3$$

A etapa seguinte consiste em calcular a massa total de hidrogênio que pode ser armazenada por caverna com a equação 8. Para isso, utilizou-se uma pressão de trabalho de 26.186.188 Pa, temperatura média de 318, 81K e densidade do gás de 15,94 Kg/m³ (Câmara et al., 2024).

$$m_{h2} = 258.224,16 \times 15,94 = 4.939.311,828 \text{ Kg}$$

Por fim, é possível calcular o potencial de armazenamento por caverna utilizando a massa total de hidrogênio e o menor valor calorífico deste.

$$P_{cav} = 4.116.093,11 \times 33,29 = 164.429.690,8 \text{ KWh} = 164,43 \text{ GWh}$$

Assim, para este maciço, a metodologia utilizada revelou um potencial total de $P_{total} = 8,4 TWh$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente dependência global de combustíveis fósseis e as crises energéticas históricas destacam a vulnerabilidade dos sistemas energéticos atuais. A urgência de uma transição para fontes de energia mais sustentáveis é reforçada pelo Acordo de Paris e pela meta do IPCC de atingir zero emissões líquidas de CO₂ até 2050.

Esse trabalho analisa o potencial teórico de armazenamento de hidrogênio em cavernas salinas, usando a estrutura salina da Ilha de Matarandiba-BA como caso de estudo. Duas metodologias foram empregadas para calcular o potencial energético, sendo que a Metodologia 1, proposta por Caglayan et al. (2020), indicou um potencial energético total de $8,2 TWh$, e a Metodologia 2, desenvolvida por Câmara (2019), apresentou um valor de $8,4 TWh$. Essa diferença de $0,2 TWh$ (ou $200 GWh$) entre as duas metodologias representa uma discrepância percentual de aproximadamente $2,44\%$. Embora essa diferença não seja tão significativa, é importante ressaltar a escassez de dados públicos sobre o maciço e a limitada quantidade de estudos sobre armazenamento de hidrogênio em cavernas salinas, tornando essa variação compreensível.

As duas metodologias empregadas para calcular o potencial energético do maciço salino apresentam abordagens distintas, mas complementares. As diferenças existentes entre as duas se encontram na consideração de incertezas geológicas, no ajuste do volume útil e na utilização de 50% como um valor médio para o gás de colchão que, embora justificado, refletem variáveis que podem afetar significativamente os resultados.

Este trabalho é importante para a compreensão e desenvolvimento de soluções sustentáveis na transição energética global, destacando o potencial do hidrogênio como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis. Assim, essa análise comparativa destaca a relevância de abordagens múltiplas na avaliação da viabilidade do armazenamento de hidrogênio, evidenciando que ambos os métodos contribuem para uma compreensão mais abrangente das capacidades energéticas disponíveis.

Ao analisar o armazenamento de hidrogênio em cavernas salinas, especialmente na estrutura de Matarandiba-BA, o estudo fornece insights valiosos sobre a viabilidade e os desafios associados a essa tecnologia emergente, assim como enfatizam a necessidade de um entendimento abrangente das variáveis que influenciam esses cálculos. Além disso, serve como um ponto de partida para futuras investigações sobre o armazenamento de hidrogênio em larga escala na Bahia, podendo também servir de referência para governos e a iniciativa privada no desenvolvimento de projetos nesta área.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Marcelo Marques do. **Avaliação técnica do transporte e do armazenamento de hidrogênio visando a descarbonização do sistema energético nacional**. 2021. 107 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2021. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/c3f46475c596f1febd49ce19aa6614f9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 10 set. 2024.

ATKINS, Peter; JONES, Julio de Paula. **Físico-Química**. 10. ed. São Paulo: Bookman, 2010. p. 77. Tabela 1A.2.

CAGLAYAN, D. G. et al. **Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe**. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.161>. Acesso em: 08 set. 2024.

CÂMARA, R. et al. **Calculation of the Theoretical Hydrogen Storage Potential in Salinas Caves on Matarandiba Island, Bahia, Brazil**. In: 4th LATIN AMERICAN CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENERGY, WATER AND ENVIRONMENT SYSTEMS – LA SDEWES, 2024, Viña del Mar, Chile. *Anais[...]* Viña del Mar: [s.n.], 2024. p. 1-12.

CÂMARA, Roberto José Batista. **Armazenamento energético de hidrogênio e gás natural (P2G) e ar comprimido (CAES) em cavernas salinas: aspectos técnico-regulatórios, proposição e simulação de metodologia**. 2019. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, Salvador, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/31218/1/Tese%20Final%20impress%C3%A3o%2013-12.pdf>. Acesso em: 09 set. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional (BEN)**. Relatório Síntese 2024: ano base 2023. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica: Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Brasília: EPE, 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em: 17 out. 2024.

FGV Energia. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opinia_o_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf. Acesso em: 08 out. 2024.

GUIMARÃES, José Torres et al. **Relatório preliminar: Ilha de Matarandiba, Bahia**. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2018. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/20607/1/relatorio_matarandiba_07_nov_18_final.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentals of Physics**. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy statistics data browser**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>. Acesso em: 01 out. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook**. 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>. Acesso em: 01 out. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Mudança do clima 2023: Relatório Síntese**. Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 17 out. 2024.

IZIDORO, Luís Miguel Carvalho. **Caracterização de diapiros salinos para armazenamento de gás natural**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2023. Disponível em:

<https://www.proquest.com/openview/99bfb8cac5a09017886ebb4adb83f8b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 18 out. 2024.

LIU, Wei et al. The role of underground salt caverns for large-scale energy storage: A review and prospects. **Energy Storage Materials**, v. 63, p. 103045, 2023. ISSN 2405-8297. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.103045>. Acesso em: 18 out. 2024.

MELO, Paulo Roberto Cabral de; CARVALHO, Renato Senna de; PINTO, Dorival de Carvalho. Halita. In: LUZ, Adão Benvidado; LINS, Fernando Antonio Freitas.

Rochas & minerais industriais: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: Cetem/McT, 2008. Cap. 25. p. 551-584. Disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>. Acesso em: 11 ago. 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). **Acordo de Paris**. Brasília: MCTI, 2015. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf. Acesso em: 17 out. 2024.

OLABI, A. G. et al. **Large-scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, n. 45, p. 23498-23528, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.110>. Acesso em: 11 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **ONU confirma que 2023 bate recorde de temperatura global**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/257750-onu-confirma-que-2023-bate-recorde-de-temperatura-global>. Acesso em: 17 out. 2024.