

ANÁLISE DAS METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO EM MEIOS POROSOS

Data de aceite: 02/06/2023

Leonardo Portela

Universidade Federal da Bahia, UFBA

Alana Almeida da Costa

Universidade Federal da Bahia, UFBA

Rosana Fialho

Universidade Federal da Bahia, UFBA

Roberto J. B. Câmara

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, UFRB

George A. B. Câmara

Senai Cimatec

basins. The development of a tool as well as the organization of technical data from each reservoir, are essential parts of this work. The practical and theoretical results obtained so far indicate that this study will not only contribute to scientific advancement but also guide future decisions and investments in the energy sector, thus promoting a transition to a more sustainable energy matrix in Bahia and beyond.

PALAVRAS-CHAVE: Reservatórios de petróleo e gás natural, Capacidade de armazenamento de gases, Hidrogênio, Bacias.

ABSTRACT: The global energy transition demands the search for sustainable and efficient alternatives, especially in the face of the intermittency of current energy sources. In this context, hydrogen storage in oil and natural gas reservoirs stands out as a promising possibility. This study aims to develop a computational tool using Excel software to assess gas storage capacity in a reservoir specifically targeted for the Bahia region. Initially, the main methods and formulations necessary for the calculations were identified, which will be followed by the collection of specific data from the region's

1 . INTRODUÇÃO

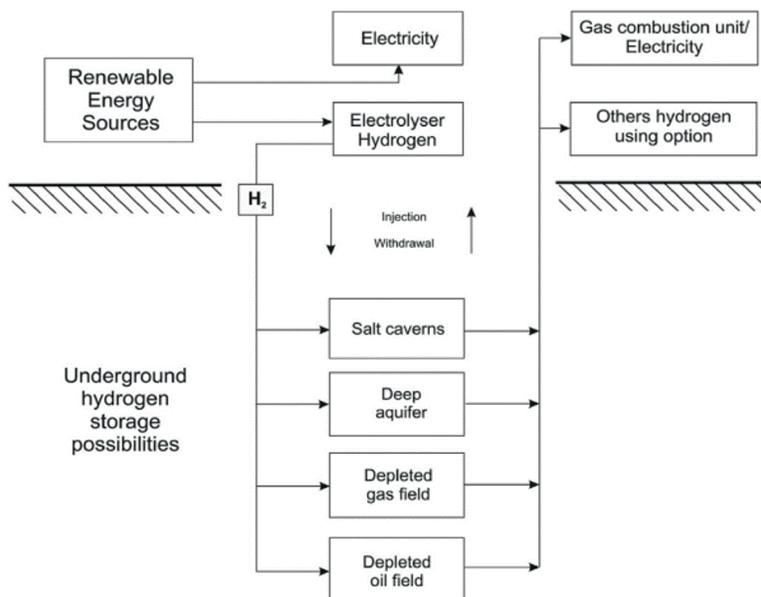
Nos últimos anos, a questão da transição energética tem ganhado destaque global devido à necessidade urgente de enfrentar os desafios das mudanças climáticas e reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis. Uma das principais preocupações nesse processo é a intermitência das fontes energéticas atuais, como solar e eólica, que muitas vezes não conseguem fornecer energia de forma constante e confiável. Essa intermitência, somada à falta de

despachabilidade dessas fontes, destaca a necessidade de buscar alternativas que possam complementar e estabilizar o fornecimento de energia.

Nesse contexto, o armazenamento de gases, especialmente o hidrogênio, tem sido considerado uma opção energética viável e otimista, especialmente em regiões com alta produção de energia solar e eólica. Essa abordagem permite que o gás seja armazenado durante os períodos de baixa demanda ou de excesso de geração de energia renovável e, posteriormente, seja disponibilizado para uso durante os períodos de alta demanda ou quando a geração renovável não é suficiente para atender às necessidades.

Tendo como base estudos recentes que indicam que reservatórios geológicos são uma alternativa promissora para o armazenamento de gases (MATOS et al., 2019), assume-se crucial o levantamento de parâmetros técnicos relevantes para avaliar a viabilidade e eficácia do armazenamento de hidrogênio em reservatórios de petróleo e gás natural depletados. Nesse quesito, este estudo visa responder a essa necessidade, buscando efetuar um estudo que vá ao encontro de uma forma mais eficiente e renovável de fornecimento de energia, capaz de atender às crescentes demandas da sociedade moderna sem comprometer o meio ambiente. A Figura 1 retrata de forma simples as possibilidades de funcionamento do processo de armazenamento do hidrogênio.

Figura 1 – O conceito de armazenamento subterrâneo de hidrogênio em estruturas geológicas



Fonte: Olabi et al. (2020).

Dentro desse contexto, as bacias de petróleo e gás natural da Bahia assumem um papel de destaque, pois possuem um grande potencial para o armazenamento de hidrogênio devido à sua infraestrutura existente e características geológicas favoráveis. O estado é um dos maiores em relação à produção de energia solar e eólica (EPE, 2022), o que o favorece, uma vez que pode utilizar da ferramenta de integração das matrizes energéticas, facilitando e tornando mais eficiente o processo de armazenamento do gás.

Somado a isso, a Bacia do Recôncavo é localizada na região, fator esse de extrema relevância, pois, como essa é a primeira bacia produtora de petróleo do Brasil, possui uma notória quantidade de reservatórios de petróleo e gás natural depletados e a bibliografia os caracteriza como potenciais locais de armazenamento. Ao analisar diversos fatores específicos das bacias da Bahia, como profundidade, pressão, temperatura, permeabilidade e outros parâmetros técnicos relevantes, este estudo busca identificar oportunidades para a implantação eficiente do armazenamento de hidrogênio na região.

O objetivo principal deste artigo é apresentar as diversas formas matemáticas, ou equações, utilizadas nos *papers* e estudos relevantes para calcular a capacidade de hidrogênio em reservatórios depletados. Este estudo tem como foco identificar as formulações mais adequadas e precisas para serem incorporadas em uma ferramenta computacional destinada à simulação desses processos, com enfoque específico na Bacia do Recôncavo. Essas equações servirão como base para a criação de um algoritmo que dará suporte à ferramenta computacional.

2 . METODOLOGIA

O objetivo principal desta metodologia é desenvolver uma ferramenta computacional no software Excel para calcular a capacidade de armazenamento de hidrogênio em reservatórios depletados. Somado a isso, visa avaliar a viabilidade de implantação do armazenamento de hidrogênio na região das bacias de petróleo e gás da Bahia, com enfoque na Bacia do Recôncavo.

Para atingir esses objetivos, será realizado um processo metodológico estruturado, incluindo pesquisa bibliográfica sobre o armazenamento de hidrogênio e estudo detalhado dos reservatórios, levantamento dos principais parâmetros técnicos e desenvolvimento de equações matemáticas específicas. Essas equações serão a base para a criação de um algoritmo que dará suporte à ferramenta computacional, garantindo uma abordagem integrada às necessidades do estudo e contribuindo para a transição energética sustentável.

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente sobre o armazenamento de hidrogênio em reservatórios de petróleo e gás, bem como um estudo aprofundado sobre a natureza e funcionamento desses reservatórios. Somado a isso, foi feita uma busca detalhada pelos principais parâmetros que deveriam ser observados e

utilizados para os cálculos de capacidade de armazenamento. Esses parâmetros incluem características como profundidade do reservatório, permeabilidade do solo, pressão, taxa de injeção de hidrogênio, entre outros.

Em seguida, foi feito um levantamento das equações de estado e fórmulas necessárias para realizar os cálculos de forma precisa. Nesse quesito, foram estudados diversos artigos e pesquisas, principalmente estrangeiras, acerca do tema. Os dados captados foram devidamente utilizados na construção da ferramenta como será apresentado posteriormente.

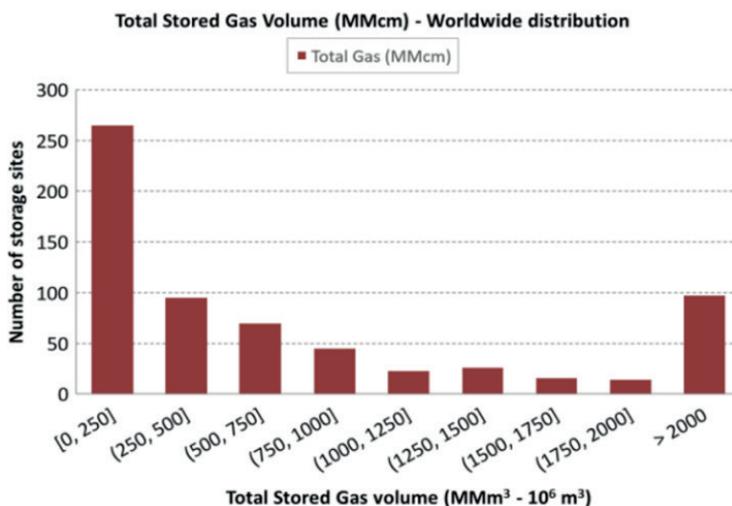
Para isso, foram utilizados recursos como a pesquisa em literatura técnica e a consulta a softwares especializados, como o REFPROP, que calcula as propriedades termodinâmicas e de transporte de fluidos de importância industrial. Após a definição dos parâmetros e a obtenção das equações de estado relevantes, deu-se início ao levantamento dos dados específicos das bacias de petróleo e gás da Bahia.

Com todos esses dados compilados e organizados, a ferramenta computacional está em desenvolvimento, utilizando as equações de estado e os parâmetros específicos de cada reservatório. Essa ferramenta permitirá a obtenção dos resultados previstos, como a capacidade de armazenamento de hidrogênio de cada reservatório, fornecendo assim informações essenciais para a avaliação da viabilidade técnica e econômica do armazenamento de hidrogênio na região da Bahia.

3 . RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a pesquisa, foram obtidos resultados práticos e teóricos que constituem fundamentos essenciais para o desenvolvimento deste estudo. A partir da análise de diversos artigos especializados, foram identificados e captados os principais parâmetros técnicos, como profundidade, permeabilidade, pressão, taxa de injeção que são fundamentais para a avaliação eliminatória da aptidão de armazenamento de um reservatório. Além desses parâmetros foram encontrados métodos e fórmulas para o cálculo do volume de hidrogênio em meios porosos. A Figura 2 mostra um pouco do cenário mundial em relação a capacidade de hidrogênio por reservatório.

Figura 2 – Estatísticas mundiais do volume total de gás armazenado por localidade



Fonte: BOUTELDJA et al. (2021).

Tendo como referência campos de gás depletados e aquíferos salinos, os volumes de poros dos reservatórios foram convertidos em volumes de hidrogênio equivalentes nas Temperatura e Pressão Padrão (STP) utilizando a equação¹ (SCADIFI, WILKINSON, GILFILLAN, HEINEMANN, HASZELDINE, 2020)

$$V_{H(STP)} = \frac{V_{H_2}(1 - S_{wi}P)}{ZP_0} \frac{T_0}{T} \quad (1)$$

De acordo com a equação 1, $V_{H(STP)}$ é o volume de hidrogênio nas condições padrão de temperatura e pressão (STP), V_{H_2} é o volume do espaço poroso adequado para armazenamento de hidrogênio, S_{wi} é a saturação de água irreduzível (definida como a menor saturação de água que pode ser alcançada displacing the água com óleo ou gás e fornecida no banco de dados CO2 Stored como 0.423), P_0 é a pressão em STP, P é a pressão do reservatório (hidrostática, calculada a partir da profundidade), T_0 é a temperatura em STP, T é a temperatura do reservatório e Z é o fator de compressibilidade do hidrogênio, que é relacionado à temperatura e pressão do reservatório. No entanto, o fator de compressibilidade possui uma fórmula² (LEMMON, HUBER, LEACHMAN, 2008) para ser calculado separadamente:

$$Z(p, T) = \frac{p}{\rho RT} \quad (2)$$

Na equação 2, p se refere à pressão, ρ à molaridade, R é a Constante Universal dos Gases (8.314 472 J/(mol · K)) e T à temperatura. É importante ressaltar que essas

equações derivam da equação de estado Younglove³ e da Nova Equação de Estado. O modelo de Younglove é usado para calcular as propriedades termodinâmicas do hidrogênio e para-hidrogênio. É baseado em dados experimentais e foi desenvolvido no National Bureau of Standards (NBS), hoje Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST). Ambas as equações de estado são explícitas na energia livre de Helmholtz e são válidas para temperaturas desde as temperaturas do ponto triplo de 13,8033 K para parahidrogênio, 13,957 K para hidrogênio normal (este trabalho) e 14,008 K para ortohidrogênio (este trabalho) até 1000 K e para pressões de até 2000 MPa, e a extrapolação se comporta bem em temperaturas e pressões muito mais altas. Importante ressaltar que a equação 1 é uma versão simplificada da equação completa do modelo de instalação de armazenamento de gás bruto³ (AMID, MIGNARD, WILKINSON, 2015) onde a capacidade total de gás natural é dada por:

$$V_s = V_r \varphi (S_g - S_{gr}), \quad (3)$$

onde V_r é o volume total da rocha (ou seja, o volume geométrico do reservatório), S_g é a fração de volume do espaço poroso ocupado pelo gás e S_{gr} é a fração irreduzível de gás que permanece praticamente quando todo o gás foi extraído até o ponto em que a pressão de fluxo de entrega está no mínimo permitido. Assumimos que a energia que impulsionou o gás para fora do reservatório veio exclusivamente de sua expansão. Dessa fórmula três, surge outra fórmula do total de hidrogênio que pode ser armazenado em um reservatório

$$\frac{V_G^H}{V_R} = \frac{y_h \varphi (1 - S_{wi}) P}{Z P_0} \frac{T_0}{T}. \quad (4)$$

onde V_{HG} é a capacidade total para hidrogênio, y_h a fração volumétrica de hidrogênio no gás, S_{wi} a saturação irreduzível de água (ou seja, a fração de água que permanece no volume poroso quando o gás é armazenado), estimada em 0,2 neste reservatório. P e T são a temperatura e pressão do reservatório, respectivamente, Z a compressibilidade, e P_0 e T_0 são a temperatura e pressão em condições padrão (1 atm e 273 K, respectivamente).

Outro método de cálculo da capacidade de hidrogênio baseia-se na ideia de que o volume previamente ocupado pelos hidrocarbonetos produzidos se torne disponível para o armazenamento de hidrogênio (CIOTTA, TASSINARI, ZACHARIAS, ZWAAN, PEYERL, 2023). A Análise da capacidade de armazenamento de hidrogênio em campos de gás foi baseada em estimativas iniciais de gás recuperável e é expressa pela equação 5

$$CR_{H_{2,MAX}} = ERG \times \frac{\rho_{CH_{4STP}}}{\rho_{CH_{4,R}}} \times \rho_{H_{2,R}} \times HHV_{H_2}. \quad (5)$$

Onde ERG é o gás natural recuperável estimado do reservatório, ρ é a densidade do gás (STP denota a condição padrão enquanto R é usado para condições específicas de pressão e temperatura do reservatório), e HHV é o valor de aquecimento mais alto do hidrogênio. A fórmula se baseia na equação de Estado Noble-Able e também foi considerado um volume médio de 45% para o gás de amortecimento, que se refere a mínima quantidade de gás que deve ser mantida no reservatório para manter a pressão adequada para a extração de gás. A fórmula surge de outras equações originárias, (MOULI-CASTILLO, HEINEMANN, EDLMANN, 2020) onde a capacidade de armazenamento de hidrogênio no reservatório é calculada substituindo o volume do campo de gás ocupado pelo gás natural recuperável pelo hidrogênio, assumindo que o gás natural do reservatório possui as propriedades do metano:

$$E_H = HHV_H \times \rho_{H,s} \times OGIP \times \frac{\rho_{CH_4,STP}}{\rho_{CH_4,s}} \times UG, \quad (6)$$

onde, E_H é a quantidade de energia armazenada como hidrogênio no gás de trabalho, HHV_H é o valor de aquecimento mais alto do hidrogênio (em MWh/kg com precisão de quatro dígitos significativos), $\rho_{H,s}$ é a densidade do hidrogênio na pressão e temperatura quando o armazenamento está cheio, OGIP é o gás original no local de armazenamento expresso como um volume na temperatura e pressão padrão (STP), RG é a quantidade recuperável de gás também expressa como um volume em STP. $\rho_{CH_4,STP}$ é a densidade do gás natural em STP, $\rho_{CH_4,s}$ é a densidade do gás natural na pressão e temperatura quando o armazenamento está cheio. A razão $\rho_{CH_4,STP} / \rho_{CH_4,s}$ é usada para converter volumes de gás em STP para volume de gás nas condições de armazenamento. UG é a fração do volume de armazenamento que pode ser usado para o gás de trabalho e é descrito na Equação

$$UG = \frac{WGV}{CGV+WGV} = \left[0.5, 0.8 \left(\frac{RG}{OGIP} \right) \right], \quad (7)$$

onde WGV é o volume do gás de trabalho que descreve a porção do volume ocupado pelo gás de hidrogênio que é ciclado dentro e fora do reservatório. CGV é o volume do gás de amortecimento, ou seja, o volume de armazenamento ocupado por uma mistura de hidrogênio e gás natural que é armazenada permanentemente. Portanto, a razão do volume do gás de trabalho para o volume total de armazenamento (CGV + WGV) é a fração utilizável do volume de armazenamento para o gás de trabalho (UG). Este estudo usa 0,5 para o valor de UG, de acordo com o estudo Rough (AMID, MIGNARD, WILKINSON, 2016). No entanto, outra restrição deve ser considerada, pois estamos considerando um sistema onde uma parte do gás de amortecimento não é o gás sendo ciclado (ou seja, gás natural). O tipo de gás de trabalho (ou seja, hidrogênio) deve representar pelo menos 20% do gás

de amortecimento (ou seja, para um armazenamento de hidrogênio, pelo menos 20% do gás de amortecimento deve ser hidrogênio). Esta restrição é considerada pelo fator 0,8 na Equação (8). Quando os campos de gás têm um volume de gás recuperável superior a 62,5% do OGIP, este estudo assume um cenário de armazenamento onde o gás de trabalho de hidrogênio representa 50% do volume de gás original no local, com base em estudos que consideram armazenamento de gás natural, armazenamento de hidrogênio e armazenamento de hidrogênio com gás de amortecimento misto. No entanto, se menos de 62,5% do OGIP for recuperável do reservatório, essa fração recuperável multiplicada por 0,8 é usada como o volume do gás de trabalho e o restante como gás de amortecimento.

$$UG = [0.5, 0.8 \left(\frac{RG}{OGIP} \right)]. \quad (8)$$

O valor de aquecimento do hidrogênio é definido como a quantidade de calor liberada durante a combustão de uma determinada quantidade de hidrogênio. Este estudo utiliza o valor de aquecimento mais alto (energia bruta ou valor calorífico bruto), que leva em consideração o calor latente de vaporização na combustão e assume que a água está em seu estado líquido no final da combustão.

Outro artigo (LABUS, TARKOWSKI, 2022) reforça a ideia de ser avaliada a mudança relativa da porosidade do reservatório, utilizando a seguinte equação 9

$$RCP = \frac{n_n - n_{n-1}}{n_0} \times 100\%. \quad (9)$$

Onde RCP é a mudança relativa na porosidade, n_n é a porosidade após a conclusão da etapa n , n_0 é a porosidade inicial.

De outra parte, foram obtidos documentos que contêm informações sobre as propriedades geológicas específicas de cada reservatório da Bahia. Esses documentos foram cruciais para a compreensão detalhada das características individuais de cada reservatório, fornecendo dados essenciais para a análise da viabilidade do armazenamento de hidrogênio na região.

Dessa forma, a equação 1, juntamente com a equação 2, foram as escolhidas para a realização dos cálculos até o presente momento do estudo. Essas formulações foram selecionadas devido à sua maior simplicidade em comparação com as outras e à sua compatibilidade com os dados disponíveis para o estudo, facilitando a obtenção e aplicação dos parâmetros necessários.

Na parte prática, foi iniciado o desenvolvimento da ferramenta computacional, que será uma fundamental para a realização dos cálculos de capacidade de armazenamento de hidrogênio. Além disso, esta sendo elaborada uma tabela para organização dos dados das bacias da região, a qual inclui informações como profundidade dos reservatórios,

características geológicas, pressão atual, entre outros fatores relevantes. A próxima etapa deste estudo é o levantamento desses parâmetros específicos de cada bacia da Bahia e sua organização na tabela citada. Uma vez organizados os dados, serão aplicados na calculadora desenvolvida para definir a viabilidade ou não do armazenamento eficiente de hidrogênio nessas bacias. Essa análise será essencial para orientar futuras decisões e investimentos na área de energia na região da Bahia e contribuir para a transição para uma matriz energética mais sustentável e renovável.

4 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo representa um passo significativo na direção de explorar o potencial do armazenamento de hidrogênio nas bacias de petróleo e gás da Bahia. A crescente necessidade de encontrar alternativas energéticas mais sustentáveis e eficientes, aliada à intermitência das fontes energéticas atuais, destaca a importância deste trabalho. Ao longo desta pesquisa, foram identificados e analisados os principais métodos para cálculo da capacidade de armazenamento de um reservatório para o hidrogênio, assim como outras informações essenciais para o processo.

A partir desses dados, foi iniciado o desenvolvimento da ferramenta computacional no software Excel, que servirá como uma ferramenta crucial para calcular a capacidade de armazenamento de hidrogênio em cada reservatório. A criação de uma tabela para organizar os dados das bacias da Bahia também é um passo importante para este estudo. A próxima etapa deste trabalho envolverá o levantamento e organização dos parâmetros específicos de cada bacia, seguido pela aplicação desses dados na ferramenta desenvolvida. Essa análise permitirá avaliar a viabilidade técnica e econômica do armazenamento de hidrogênio nas bacias de petróleo e gás da Bahia.

Em suma, este estudo não apenas contribuirá para o avanço do conhecimento científico no campo do armazenamento de hidrogênio, mas também terá implicações práticas significativas. Os resultados obtidos serão essenciais para orientar decisões futuras e investimentos na área de energia na região da Bahia, contribuindo assim para a transição para uma matriz energética mais sustentável e renovável.

5 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. AMID, D. MIGNARD, M. WILKINSON. **Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir**. School of Engineering & School of Geosciences, The University of Edinburgh, Scotland, UK, 2015.

BOUTELDJA, Mohammed et al. **Definition of Selection Criteria for a Hydrogen Storage Site in Depleted Fields or Aquifers**. Geostock, France, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional. Relatório Final, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 31 mar. 2024.

ERIC W. LEMMON, MARCIA L. HUBER, JACOB W. LEACHMAN. **Revised Standardized Equation for Hydrogen Gas Densities for Fuel Consumption Applications**. National Institute of Standards and Technology, Boulder & University of Wisconsin-Madison Cryogenics Lab, 2008.

JONATHAN SCAFIDI, MARK WILKINSON, STUART M.V. GILFILLAN, NIKLAS HEINEMANN, R. STUART HASZELDINE. **A quantitative assessment of the hydrogen storage capacity of the UK continental shelf**. School of GeoSciences, University of Edinburgh, James Hutton Road, Edinburgh, 2020.

JULIEN MOULI-CASTILLO, NIKLAS HEINEMANN, KATRIONA EDLMANN. **Mapping geological hydrogen storage capacity and regional heating demands: An applied UK case study**. School of Geosciences, University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3FE, UK, 2020.

KRZYSZTOF LABUS, RADOSŁAW TARKOWSKI. **Modeling hydrogen – rock – brine interactions for the jurassic reservoir and cap rocks from polish lowlands**. Silesian University of Technology, 2 Akademicka St., 44-100, Gliwice, Poland & Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences, 7A J. Wybickiego, 31-261, Krakow, Poland, 2022.

MARIANA CIOTTA, COLOMBO TASSINARI, LUIS GUILHERME LARIZATTI ZACHARIAS, BOB VAN DER ZWAAN, DRIELLI PEYERL. **Hydrogen storage in depleted offshore gas fields in Brazil: Potential and implications for energy security**. 2023.

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.

OLABI, A.G. et al. **Large-vs scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions**. 2020.

6 . AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro e à UFBA por disponibilizar a infraestrutura necessária para essa pesquisa.