

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Análise do Potencial da Produção de Hidrogênio Verde no estado da Bahia: uma abordagem orientada a painéis dinâmicos

AUTORES:

Pablo Roberto de Jesus do Santos
Fernando Antonio Soares Calhau
Rodrigo Lima Meira
Márcio André Fernandes Martins

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Análise do Potencial da Produção de Hidrogênio Verde no estado da Bahia: uma abordagem orientada a painéis dinâmicos

Resumo

Com os avanços de desastres climáticos ocasionado pelos acúmulos de gases do efeito estufa, a necessidade de um vetor energético de baixo teor de CO₂ tornou-se essencial para uma transição energética limpa e segura. Nesse contexto, o hidrogênio verde emerge como uma rota promissora, sendo um insumo importante e estratégico para descarbonização do setor industrial. Com isso, pesquisas voltadas à produção de hidrogênio verde, utilizando o excedente de energia elétrica de fontes de energia renováveis estão sendo desenvolvidas em busca de converter essa energia não armazenada em H₂. Atualmente, o Nordeste do Brasil, em particular Bahia se destaca no cenário nacional na geração de energia eólica e solar fotovoltaica, já que apresenta bons índices de irradiação solar e rajadas de ventos constantes, no entanto, devido ao superávit de geração de energia renováveis em momentos de baixa demanda, tem causado excedente de energia elétrica, possibilitando assim estudos voltados à utilização dessa energia elétrica para outros fins energéticos. Com isso, esse trabalho propõe uma ferramenta para reunir informações quantitativas sobre a energia excedente na Bahia e sua utilização para produção de H₂. Painéis interativos, baseados em dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), apresentam cenários de máximo e mínimo sobre a potencial produção de H₂ na Bahia. No primeiro cenário, o consumo de energia elétrica é suprido apenas por fontes renováveis, gerando na média dos três anos analisados 3,67 TWh, indicando o mínimo excedente para produção de H₂ e 15 TWh em média para o segundo cenário, indicando o excedente de energia máxima para produção máxima de H₂. Além disso, as informações compiladas nos painéis dinâmicos apresentarão indicadores sobre a produção de hidrogênio auxiliando nas análises técnico-econômicas da implantação e operação de processos em escala.

Palavras-chave: Fontes renováveis, Hidrogênio Verde, Painéis dinâmicos

Abstract

With the advances of climate disasters caused by the accumulation of greenhouse gases, the need for a low CO₂ energy vector has become essential for a clean and safe energy transition. In this context, green hydrogen emerges as a promising route, an important and strategic input for the decarbonization of the industrial sector. Therefore, research aimed at producing green hydrogen, using the surplus of electrical energy from renewable energy sources, is being developed to convert this non-stored energy into H₂. Currently, the Northeast of Brazil, particularly the Bahia state, stands out in the national scenario in the generation of wind and solar photovoltaic energy, since it has good levels of solar irradiation and constant wind gusts. However, dividing the surplus of renewable energy generation at times of low demand has caused a surplus of electrical energy, enabling studies to use this energy for other energy purposes. Therefore, this work proposes a tool to gather quantitative information on the surplus energy potential in Bahia and its use for producing H₂. Based on data from the Electric Energy Trading Chamber (CCEE), interactive panels present maximum and minimum scenarios for H₂ production. In the first scenario, consumption is supplied only by renewable sources, generating an average of 3.67 TWh over the three years analyzed, indicating the minimum surplus for H₂ production, and 15 TWh on average for the second scenario, indicating the maximum surplus energy for maximum H₂ production. In addition, the information compiled in the dynamic panels will generate indicators on hydrogen

production, assisting in the technical-economic analyses of the implementation and operation of large-scale processes.

Keywords: Renewable sources, Green Hydrogen, Dynamic panels.

Introdução

A transição para uma energia limpa e inclusiva é crucial diante das frequentes catástrofes climáticas provocadas pelos gases de efeito estufa. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023, aproximadamente 88% da matriz elétrica brasileira é renovável, destacando-se os grandes centros hidrelétricos, contudo, devido a incentivos fiscais voltados à diversificação da matriz elétrica, fontes como eólicas e solar fotovoltaica têm demonstrado crescimentos significativos ao longo dos anos. No Nordeste, especialmente na Bahia, as condições favoráveis de rajadas ventos e da radiação solar por longos períodos do ano tem impulsionado a geração de energia solar fotovoltaica e eólica (DE JONG ET AL., 2017), deixando o estado em primeiro em rankings de geração energia renovável. Segundo a CCEE, a Bahia conta com cerca de 10 GW de capacidade instalada em energia eólica e 2 GW em solar fotovoltaico, com um potencial instalável de cerca de 100 GW de energia solar e 70 GW de energia eólica (ATLAS EÓLICO DA BAHIA, 2013; ATLAS SOLAR DA BAHIA, 2018). No entanto, devido à rápida expansão das fontes renováveis, os excedentes de energia elétrica não armazenada em momentos de menor consumo no estado têm sido recorrentes. Com isso, pesquisas voltadas na produção em escalar de hidrogênio verde a partir do excedente das fontes eólica e solar fotovoltaicas têm sido desenvolvidas.

Segundo Souza (2009), a produção mundial de hidrogênio é majoritariamente derivada de combustíveis fósseis, representando aproximadamente 90%, enquanto a produção a partir de fontes renováveis é cerca de 4%. No Brasil, em especial no Nordeste, há um grande potencial produtor de hidrogênio verde. A Bahia, em particular, se destaca nesse cenário como um potencial produtor de H₂V, possuindo um potencial de produção de cerca de 81 milhões de toneladas de hidrogênio verde, com um consumo de água estimado em aproximadamente 1,3 bilhões de m³ de acordo o Atlas H2V Bahia (2023). A produção de hidrogênio verde comumente ocorre através da eletrólise da água, onde a água desmineralizada recebe uma corrente elétrica que promove a quebra das ligações entre O₂ e H₂ na molécula de água. Para que esse processo ocorra, são necessários eletrolisadores, que permitem a reação, resultando em H₂ e O₂ com alto grau de pureza. Atualmente, existem diversos tipos de eletrolisadores no mercado; no entanto, segundo Macedo (2022), o eletrolisador de membrana polimérica (PEM) demonstra a maior eficiência na produção de hidrogênio utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis intermitentes.

Com isso, este trabalho busca demonstrar o potencial de produção em escala de hidrogênio verde no estado da Bahia nos 3 últimos anos, fazendo uma análise orientada a painéis interativos que demonstram o potencial de produção de hidrogênio verde considerando o excedente horário produzido pelas fontes renováveis em momentos de superávit da rede. Nesse trabalho será calculado o excedente de energia produzido pelas fontes renováveis, e em seguida, através da eficiência de eletrolisador industrial conhecido, avaliar a produção de H₂V no estado.

Metodologia

Para a construção dos painéis dinâmicos, foram coletados dados sobre o comportamento do setor elétrico da Bahia para identificar momentos de excedente de energia elétrica. Utilizando dados do site da CCEE

e do sistema de informações de geração da ANEEL (Siga-ANEEL), obteve-se o perfil horário de geração e consumo no estado. Após a realização da ETL (do inglês *Extract, Transformation Load*) dos dados, estimou-se o potencial de produção de hidrogênio verde no estado. Considerando a eficiência energética de um eletrolisador industrial PEM de 10 MW com uma eficiência energética de 51 kWh/kg_{H_2} da H-TEC SYSTEMS® e os dados de excedente, calculou-se o potencial produção de hidrogênio, desconsiderando possíveis perdas no processo de eletrólise. Além disso, foram considerados dois cenários de produção de hidrogênio verde na Bahia.

No primeiro cenário foi considerado que o estado seria suprido apenas por fontes renováveis (eólica e solar fotovoltaica). Assim, foram identificados os momentos em que houve excedente de energia elétrica para determinar a produção. Para calcular o potencial de produção de hidrogênio verde neste cenário, primeiramente foi calculada a geração de energia elétrica das fontes eólica e solar fotovoltaica, conforme,

$$E_{ren} = E_{sol} + E_{eol}, \quad (1)$$

em que, E_{ren} é o acumulado das fontes eólica e solar fotovoltaica, E_{sol} é a energia solar fotovoltaica gerada no estado, E_{eol} é a energia eólica gerada no estado. Assim, a partir dos dados horários de consumo de energia elétrica do estado cedidos pela CCEE e dados horários calculados de E_{ren} , foi possível determinar os momentos de superávit de energia elétrica na rede, de modo que,

$$E_{exc} = \begin{cases} E_{ren} - C_{cons} & \text{se } E_{ren} > C_{cons} \\ 0 & \text{se } E_{ren} \leq C_{cons} \end{cases}, \quad (2)$$

em que, E_{exc} é a energia elétrica excedente, C_{cons} é o consumo da rede elétrica.

Após determinar o excedente, com os dados de eficiência energética do eletrolisador, foi estimado o potencial produção de H_2 , sendo indicado por,

$$prod_{H_2} = \frac{E_{exc}}{\eta_{fe}}, \quad (3)$$

em que, $prod_{H_2}$ é a produção horária de hidrogênio e η_{fe} é a eficiência do eletrolisador.

Para o segundo cenário de produção de hidrogênio verde, a rede elétrica será suprida por fontes convencionais de energia elétrica sejam elas hidráulicas ou térmicas, utilizando somente as fontes de energia renovável (eólica e solar) em momentos que a demanda de carga não é suprida pelas outras fontes. Nesse caso, o excedente produzido pelas fontes convencionais é desconsiderado levando em conta somente o excedente das fontes eólica e solar fotovoltaica. Assim, primeiramente, determinou-se geração das fontes hidráulicas e térmicas presentes no estado, como indicado por,

$$E_{outra} = E_{hidro} + E_{Term}, \quad (4)$$

em que, E_{outra} é o acumulado geração das outras fontes de geração, e E_{hidro} é a geração por hidrelétrica no estado e E_{Term} é a geração de todas as termoeletricas.

Através dos dados horários de E_{outra} e dos dados do consumo de energia elétrica, foram determinados os momentos que estado apresenta déficit e excedente dessas fontes sendo posteriormente desconsiderados o excedente produzido por elas, como demonstrado em,

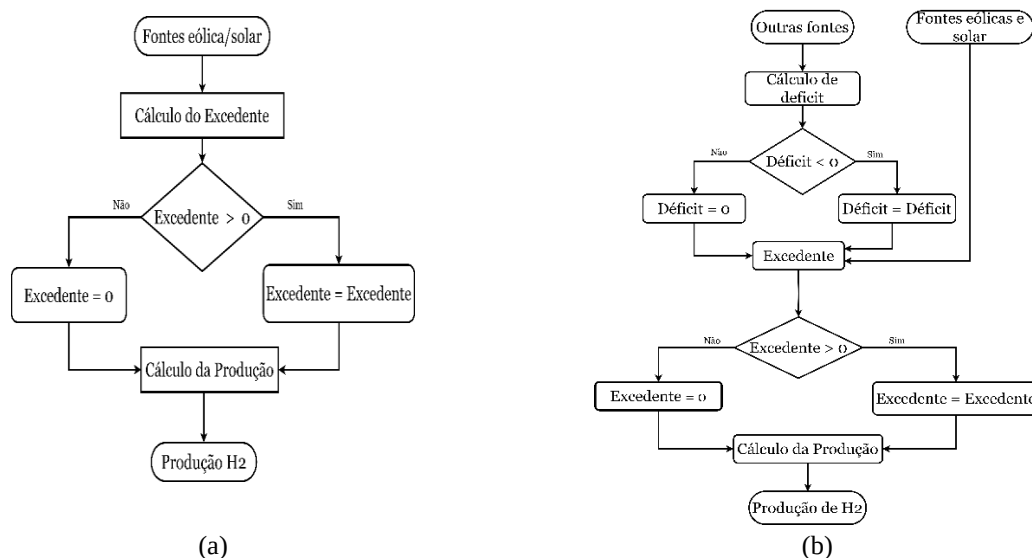
$$E_{deficit} = \begin{cases} C_{cons} - E_{outra} & \text{se } E_{outra} < C_{cons} \\ 0 & \text{se } E_{outra} \geq C_{cons} \end{cases}. \quad (5)$$

Após isso, foram determinados os momentos em que as fontes renováveis apresentariam excedente, conforme indicado na Equação 6.

$$E_{exc} = \begin{cases} E_{ren} - E_{deficit} & \text{se } E_{ren} \geq E_{outra} \\ 0 & \text{se } E_{ren} < E_{outra} \end{cases}. \quad (6)$$

Com os dados dos excedentes após suprimento da rede, foi determinado o potencial produção de hidrogênio verde com os dados calculados do segundo cenário utilizando a Equação 3. A Figura 1 sumariza os fluxogramas de ambos os cenários.

Figura 1: (a) Fluxograma do primeiro cenário de produção; (b) Fluxograma do segundo cenário de produção

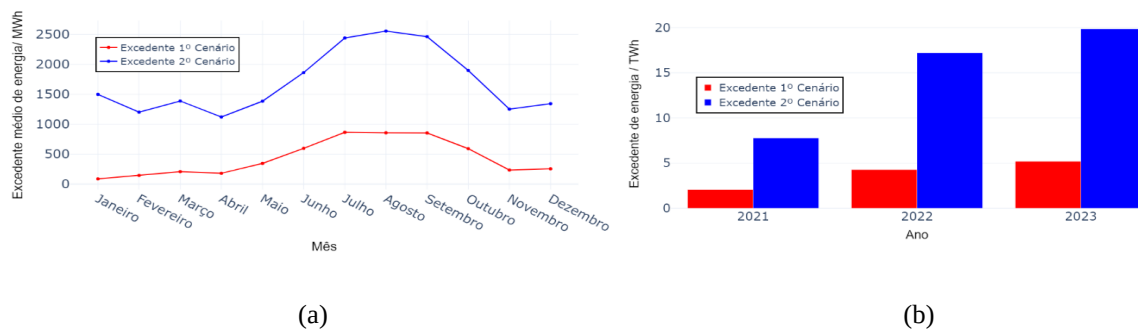


Após determinar o potencial de produção de H₂V e o potencial H₂O consumido pelo eletrolisador, foram criados painéis interativos no Power BI. Esses painéis mostram a produção potencial de hidrogênio ao longo de três anos e permitem uma análise técnica baseada em indicadores de produção. Estes painéis estão disponibilizados em um site online PROTEC (2024).

Resultados e Discussão

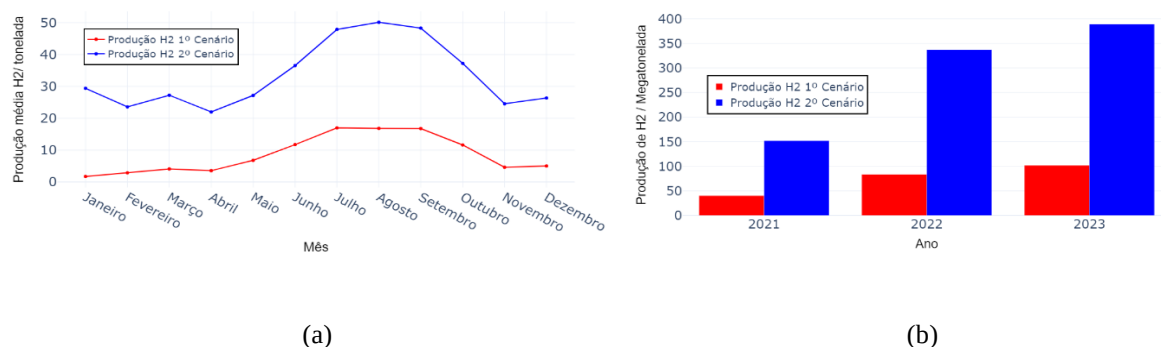
A análise dos dados revelou que o estado da Bahia apresentou um crescimento no excedente de energia, impulsionado pelo avanço das fontes renováveis, conforme ilustrado na Figura 2b. No intervalo dos meses de junho a outubro, em média, há um pico de excedente das fontes de energia eólica e fotovoltaica, como demonstrado no gráfico Figura 2a.

Figura 2: (a) Excedente médio de eletricidade; (b) Excedente de energia anual



Com base nos dados horários de excedente, constatou-se que o estado possui uma disponibilidade significativa de energia excedente não armazenada para a produção de hidrogênio verde. Assim, verificou-se que o potencial de produção de hidrogênio verde no estado atingiria em média nesse período 75 megatoneladas por ano no primeiro cenário crescendo para 293 megatoneladas por ano no segundo cenário. A Figura 3 e a Tabela 1 ilustra o comportamento potencial da produção H₂V considerando todo o excedente de energia elétrica.

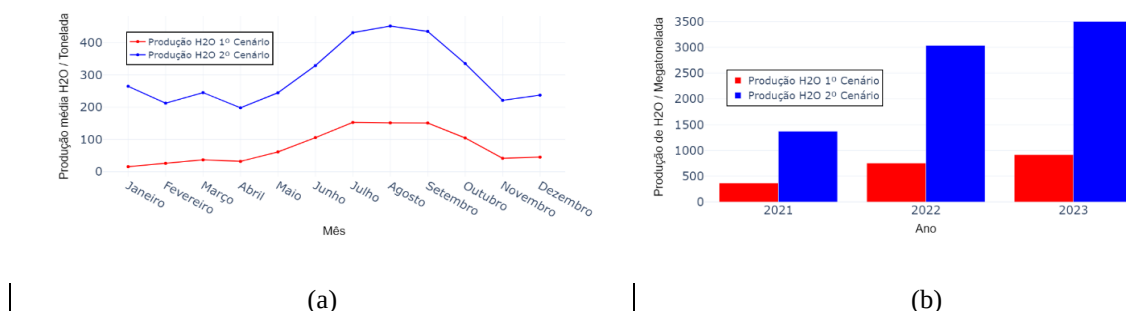
Figura 3: (a) potencial de produção média mensal de hidrogênio; (b) potencial de produção anual de hidrogênio.

Tabela 1: Produção de H₂ e Consumo de H₂O primeiro cenário.

Ano	Potencial de Produção H ₂ 1ºcenário / Mt	Potencial de Produção H ₂ 2ºcenário / Mt
2021	40	152
2022	84	337
2023	101	389

Também foi possível determinar o consumo potencial de H₂O. Em média, o consumo de água seria de 665 megatoneladas por ano de H₂O no primeiro cenário e 2636 megatoneladas por ano de H₂O no segundo cenário. A Figura 4 e na Tabela 2 apresentam o potencial comportamento do consumo de H₂O para produção H₂.

Figura 4: (a) Média mensal do consumo de água pelo eletrolisador; (b) Consumo anual de água pelo eletrolisador

Tabela 2: Consumo de H₂O do eletrolisador

Ano	Consumo H ₂ O 1º cenário / Mt	Consumo H ₂ O 2º cenário / Mt
2021	363	1370
2022	763	3040
2023	916	3500

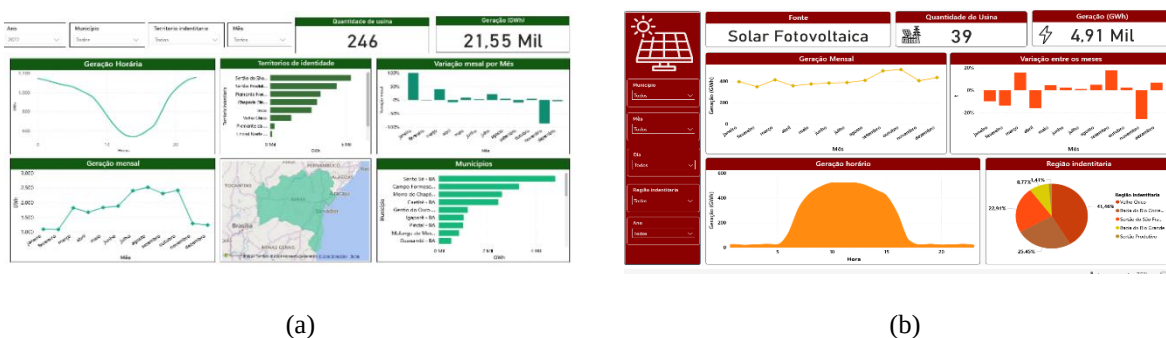
Por fim, através dos dados avaliados foram construídos painéis interativos sobre a produção de hidrogênio demonstrando o comportamento potencial da produção de H₂ na Bahia no período de 3 anos, disponível no site em desenvolvimento endereçado em PROTEC (2024) conforme exemplificado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5: (a) Painel sobre a produção H2 primeiro cenário, (b) Painel sobre a produção de H2 segundo cenário



Figura 6: Site desenvolvido na pesquisa.

(a) Painel de geração de energia eólica presente no site, (b) Painel de geração de energia solar presente no site



Conclusões

Conclui-se que o estado possui um excedente significativo de energia elétrica, com uma média anual de 4 TWh no primeiro cenário e 15 TWh no segundo cenário. Esse aumento na produção de excedente é resultado da expansão de capacidade instalada de energia eólica e solar fotovoltaica no estado. Esses cenários colocam o estado em uma posição estratégica para a produção de hidrogênio verde. Utilizando todo o excedente de energia, o estado poderia produzir, em média, 75 megatoneladas por ano de hidrogênio no primeiro cenário, consumindo 681 megatoneladas por ano de água, e 293 megatoneladas por ano de hidrogênio no segundo cenário, com um consumo médio de 2637 megatoneladas por ano de água. Espera-se, por fim, que este trabalho contribua para o desenvolvimento de tecnologias voltadas à produção de hidrogênio verde, destacando o potencial do estado em liderar iniciativas sustentáveis e inovadoras no setor energético.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq (projeto de pesquisa nº 25424) e à FAPESB (PIE0008/2022) pelo financiamento.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA –ANEEL. Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA). Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel> . Acesso em: 20/07/2024.

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

AWS TRUEPOWER; CAMARGO SCHUBERT; FIEB/SENAI CIMATEC. Bahia: Atlas Solar. Curitiba: Camargo Schubert; Salvador: SECTI; SEINFRA: CIMATEC/SENAI, 2018.

CAMARGO SCHUBERT; AWS TRUEPOWER. Bahia: Atlas Eólico. Curitiba: Camargo Schubert; Salvador: SECTI; SEINFRA: CIMATEC/SENAI, 2013.

CAMÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CCEE. Dados de geração de elétrica. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/en/web/guest/dados-e-analises/dados-geracao> . Acesso em: 30/07/2024

CAMÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). Dados de consumo da rede elétrica. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/en/web/guest/dados-e-analises/consumo> . Acesso em: 30 /06/ 2024.

DE JONG, P., CUNHA, F. B. F., MOUSINHO, M. C. A. D. M., PRIMO, R. G. B., SANTOS, J. A. F. D. A., & TORRES, E. A. Complementaridade das energias eólica e solar na Bahia. In Congresso Brasileiro de Energia (CBE). [Outra instituição], 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional (BEN 2023). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf> . Acesso em: 20/07/2024

H-TEC SYSTEMS. H-TEC SYSTEMS PEM Electrolyze Modular Hydrogen Platform (MHP). Disponível em: <https://www.h-tec.com/en/products/detail/mhp-series/mhp-electrolyser/> . Acesso em: 04 /06/2024

MACEDO, S. F., & PEYERL, D. Perspectives and economic viability analysis of hybrid wind and solar photovoltaic systems for hydrogen production and storage: a case study of the Brazilian electricity sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(19). 2022.

PROTEC UFBA. Estudo do potencial de produção de hidrogênio verde no estado da Bahia. Disponível em: <https://sites.google.com/view/producao-hidrogenio-bahia/in%C3%ADcio>. Acesso em: 10/07/2024

SOUZA, M.M. Tecnologia do Hidrogênio. FAPERJ. Rio de Janeiro: Synergia Editora. 2009.

SENAI CIMATEC; SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. Bahia: Atlas H2V. Salvador: SENAI CIMATEC, 2023.