



**IEDS - INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

**POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE
ATRAVÉS DE FONTES RENOVÁVEIS NO NORDESTE
BRASILEIRO**

Fernando Cesar de Souza Filho

Redenção

2024

FERNANDO CESAR DE SOUZA FILHO

**POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE ATRAVÉS DE
FONTES RENOVÁVEIS NO NORDESTE BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Energias na
UNILAB, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Energias.
Orientadora: Pr. Dr^a. Maria Cristiane Martins de
Souza

Redenção

2024

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Souza Filho, Fernando Cesar de.

S729p

Potencial para geração de hidrogênio verde através de fontes renováveis no nordeste brasileiro / Fernando Cesar de Souza Filho. - Redenção, 2024. 36f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2024.

Orientadora: Pr. Dr*. Maria Cristiane Martins de Souza.

1. Hidrogênio. 2. Eólica. 3. Solar fotovoltaica. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 333.8

FERNANDO CESAR DE SOUZA FILHO

**POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE ATRAVÉS DE
FONTES RENOVÁVEIS NO NORDESTE BRASILEIRO**

Monografia julgada e aprovada para obtenção do Diploma de Graduação em Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

Data: 20/10/2024

Nota: 8,00

Banca Examinadora

Pr. Dr^a. Maria Cristiane Martins de Souza

Pr. Dr. Jose Cleiton Sousa dos Santos

RESUMO

O hidrogênio por ser um elemento abundante em nosso planeta e com propriedades termodinâmicas que o destacam, vem sendo objeto de estudo para a sua utilização em substituição em determinados usos como combustível. O potencial para a geração de hidrogênio verde no Nordeste brasileiro é promissor, devido à abundância de recursos naturais renováveis na região, especialmente a energia solar e eólica. O Nordeste possui altos níveis de radiação solar e ventos fortes, o que proporciona condições ideais para a produção de energia limpa. Além disso, já apresenta uma infraestrutura que pode ser aprimorada para suportar a produção e distribuição do hidrogênio, como terminais portuários. Este trabalho foi feito a fim de apresentar fatos do potencial energético do Nordeste brasileiro para a geração de hidrogênio verde, através de rotas de gaseificação, vapor de metano, biomassa e eletrólise, sendo este último o principal, utilizando como matéria prima na geração elétrica as fontes eólica e solar fotovoltaica.

Palavras-chave: Hidrogênio, eólica, solar fotovoltaica.

ABSTRACT

Hydrogen, as it is an abundant element on our planet and has thermodynamic properties that make it stand out, has been the subject of study for its use as a replacement for certain uses as a fuel. The potential for generating green hydrogen in the Brazilian Northeast is promising, due to the abundance of renewable natural resources in the region, especially solar and wind energy. The Northeast has high levels of solar radiation and strong winds, which provides ideal conditions for the production of clean energy. Furthermore, it already has an infrastructure that can be improved to support the production and distribution of hydrogen, such as port terminals. This work was carried out in order to present facts about the energy potential of the Brazilian Northeast for the generation of green hydrogen, through gasification routes, methane vapor, biomass and electrolysis, the latter being the main one, using as raw material in electrical generation the wind and solar photovoltaic sources.

Keywords: Hydrogen, wind, solar photovoltaic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 - ELETROLISADOR PEM	16
FIGURA 02 - CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PEMFC	19
FIGURA 03 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO ELETROLISADOR PEM	22
FIGURA 04 - EXPANSÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM ABRIL/2023	30
FIGURA 05 - POTENCIAL EÓLICO DO BRASIL	32
FIGURA 06 - POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA NOS ESTADOS BRASILEIROS EM 31/03/2019	32

SUMÁRIO

1 Introdução.....	9
1.1 Objetivo Geral.....	10
1.2 Objetivo Específico	10
2 Referencial Teórico	10
2.1 Sustentabilidade.....	10
2.2 Hidrogênio	11
2.3 Produção de Hidrogênio Via Gaseificação	12
2.4 Produção de Hidrogênio Via Reforma a Vapor do Metano	13
2.5 Produção de Hidrogênio Via Biomassa.....	14
2.6 Produção de Hidrogênio por Eletrólise	15
2.6.1 Tipos de Eletrolisadores	16
2.6.1.1 Eletrolisador por Membrana de Troca Protônica (Pem)	16
2.6.1.2 Eletrolisador Alcalino	17
2.6.2 Células de Combustível De Membrana Trocadora de Prótons (Pemfc) ..	18
2.7 Vantagens e Desvantagens de Eletrolisadores para Geração de Hidrogênio Verde	19
3 METODOLOGIA DO TRABALHO	21
4 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	22
5 IMPORTÂNCIA DO HIDROGÊNIO NO CONTEXTO ATUAL	24
6 POTENCIAL ELÉTRICO RENOVÁVEL BRASILEIRO	29
6.1 Potencial Solar Fotovoltaico do Nordeste Brasileiro	30
6.2 Potencial Eólico do Nordeste Brasileiro	31
7 CONCLUSÃO	33
8 REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Miguez (2000) as ações decorrentes das atividades econômicas e industriais têm provocado alterações na biosfera, resultando na quase duplicação da concentração de gases de efeito estufa (GEE). Visando conter o aquecimento global e, dessa forma, viabilizar um futuro sustentável para o planeta, é necessário diminuir as emissões de GEE, particularmente o CO₂, de forma expressiva. Para tanto, faz-se necessário substituir os combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia. Um dos caminhos para viabilizar essa transição energética, com o intuito de alcançar uma economia de baixo carbono, é através do uso do hidrogênio (H₂) em processos industriais e como combustível alternativo aos derivados de fontes fósseis (Diniz Bezerra, 2024).

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante na Terra e só pode existir em combinação com outros elementos como a água e o oxigênio, além de se combinar com o carbono para formar hidrocarbonetos, como o gás natural, o carvão e o petróleo. Para que ele possa ser usado como combustível, precisa ser separado de outras moléculas (Forte *et al*, 2023; Bonacin, 2022). Apesar de abundante, 93% dos átomos do universo, o hidrogênio é muito raramente encontrado na natureza em sua forma pura (Forte *et al*, 2023; Lameiras, 2019). Seu uso como combustível é interessante por alguns motivos; sua combustão, que é essencialmente uma reação química entre hidrogênio gasoso e oxigênio, gera apenas água no processo que também, pode ser “quebrada” em hidrogênio e oxigênio. Dessa forma, é um combustível que pode ser gerado de elementos abundantes (água e oxigênio) (Forte *et al*, 2023; Freitas, 2022) e é considerado um combustível limpo e pode ser produzido pelos processos de gaseificação, reforma a vapor do metano, biomassa e pela eletrólise da água. O gás hidrogênio pode ser empregado em diversas cadeias industriais, como no refino do petróleo, na produção de aço e fertilizantes, processamento de alimentos e nos transportes (Capurso *et al*, 2020; Zuben *et al*, 2022). A produção de hidrogênio através da eletrólise da água (onde ocorre quebra da molécula de água sob uma corrente elétrica), é uma rota ambientalmente atraente principalmente quando está integrada as energias renováveis (Sasikumar *et al.*, 2008; Caravaca *et al.*, 2012). Desse modo, essa indústria constituirá uma janela de oportunidades que se abre. Exemplificando esse crescimento brasileiro, tem-se o anúncio do

projeto-piloto para a implementação da primeira usina de hidrogênio verde do país, divulgado em 2021 e que terá suas instalações no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no estado do Ceará. Sendo assim, os países e estados que têm baixos custos de produção de energias renováveis possuem vantagens competitivas que podem viabilizar suas especializações na produção e exportação de hidrogênio (Forte *et al*, 2023; Góes, 2021).

1.1 Objetivo Geral

Portanto, o potencial para geração de hidrogênio verde através de fontes renováveis, fotovoltaico e eólico através da eletrólise da água.

1.2 Objetivo Específico

Produção de Hidrogênio Verde através do eletrolisador por membrana de troca protônica (PEM).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sustentabilidade

O termo desenvolvimento sustentável foi apresentado no relatório Nosso Futuro Comum de 1987, tendo como diretriz a ideia de um desenvolvimento que atenda às necessidades das gerações presentes, sem comprometer a habilidade das gerações futuras de suprir as suas próprias necessidades. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), o termo sustentabilidade é o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro, essa definição visa discutir e propor meios de harmonizar dois objetivos: o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental. O fator econômico ganha bastante destaque, em virtude de ser o que rege as nações, sendo assim, o elemento decisivo quando alguma medida precisa ser tomada (Almeida, 2021).

Um dos indicadores de desenvolvimento econômico das nações ocorre através do consumo de energia per capita, em outros termos, a partir dos recursos energéticos tem-se a noção do desenvolvimento e estabilidade econômica de um país (Araújo *et al.*, 2020), o indicador também refere-se

mediante a critérios no qual o desenvolvimento econômico, industrial e produto interno bruto (PIB) é critério preponderante na classificação sendo assim denominado Índice de Desenvolvimento Humano (IDH).

Com a criação de um conceito global acerca da sustentabilidade, os países desenvolvidos principais causadores de danos ao meio ambiente e defensores do capitalismo, pressionados por ONGs em defesa ao meio ambiente, passaram a desenvolver acordos como ECO 92 (Rio de Janeiro 1992), Protocolo de Kyoto (Japão 1997) dentre outros, com o objetivo de controlar as expectativas globais. O que se percebe é que embora, assumindo maiores compromissos, os países ricos e industrializados, oferecem resistência no cumprimento dos acordos. Em prova disso, no ano de 2005 apenas os países ricos não tinham atingido as metas previstas pelos acordos (Carvalho *et al.*, 2015; Prahalad, 2005)

Além disso, a sociedade moderna utiliza a energia para atender às suas necessidades básicas como calor para cozinhar, eletricidade para iluminar suas casas ou manter suas refeições refrigeradas, bem como as produções industriais que auxiliam a suprir suas indisponibilidades. A questão mais complicada é aplicar uma fonte energética que consiga atender a demanda global sem afetar o meio ambiente, ou pelo menos, cause menos danos e seja viável economicamente (Negro *et al.*, 2021). Daí, pode-se entender o porquê da demora da transição energética para fontes renováveis, já que a energia oriunda de fontes fósseis já possui processos bem estruturados de produção e relativamente baratos, além de atender a alta demanda de consumo humano (Mesquita, 2022).

2.2 Hidrogênio

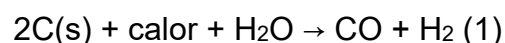
O hidrogênio (do grego hidro e genes, 'gerador de água') é o elemento mais abundante do universo, representando 93% da massa de toda matéria. Um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável, sob condições normais. Presente majoritariamente na terra na sua forma molecular (como hidrocarbonetos, água e outros), é caracterizado por possuir a maior quantidade de energia por unidade de massa (120,7 KJ/g) se comparado a outros combustíveis (cerca de 3x a energia da gasolina). O hidrogênio pode ser usado como matéria-prima em diversos processos industriais (química, alimentícia, refino e outros), em

sistemas de células de combustível e espera-se nas próximas décadas o seu emprego na geração de eletricidade e transporte. Diante da dependência de fontes primárias de energia, oriundos dos combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, a capacidade energética do hidrogênio vem atraindo bastante atenção na comunidade científica. O hidrogênio possui a possibilidade de desempenhar um papel importante na transição energética, alcançando um futuro com zero emissões de gases poluentes devido a sua ampla aplicação industrial e atuando como meio para armazenamento de energia (Paiva, 2022; Miranda, 2019; Liu; Song; Subramani, 2009).

O hidrogênio pode ser produzido por diferentes rotas, através de combustíveis fósseis (carvão e gás natural) sem ou com captura de carbono, e pelo processo de eletrólise (integrado a energias renováveis como solar e/ou eólica), sendo classificado como sua forma de obtenção e de seus níveis de produção de CO₂, ele pode ser classificado por cores como hidrogênio cinza, azul e verde, respectivamente (Paiva, 2022). Como mencionado, a forma para obtenção de hidrogênio verde é de forma “limpa”, sendo proveniente de energia renovável. Logo, o termo ‘verde’ significa que o hidrogênio é produzido por zero emissão ou baixa emissão de carbono” (Dewan, 2019).

2.3 Produção De Hidrogênio Via Gaseificação

A gaseificação é um processo de conversão (eq.1) em elevadas temperaturas do carvão na presença de ar, vapor d’água ou gás oxigênio, produzindo gás hidrogênio, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e outros.

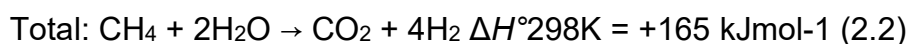
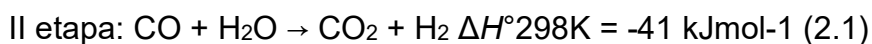
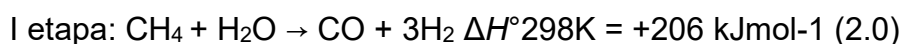


Dentre os tipos de carvão geralmente empregados temos a linhita, o carvão betuminoso e a antracite que são gaseificados em temperaturas superiores a 900°C. Devido a formação de diversos produtos, para obter o composto desejado e evitar a diminuição do seu poder calorífico por contaminantes (como partículas e alcatrão), faz necessário uma etapa de purificação, onde ocorre a separação dos gases úteis (CO, H₂ e CH₄) das partículas presentes no meio (Paiva, 2022; Midilli *et al.*, 2021; Singla *et al.*, 2022). Apesar do baixo custo unitário de matéria-prima, o carvão possui um elevado teor de carbono,

resultando em uma maior produção de dióxido de carbono em comparação a outras fontes de hidrogênio (Paiva, 2022; Dincer; Acar; 2014).

2.4 Produção de Hidrogênio Via Reforma a Vapor do Metano

A produção de hidrogênio via reforma a vapor (eq. 2.0-2.2) é caracterizada como uma reação endotérmica, necessitando de uma elevada quantidade de energia, por isso geralmente é aplicada a temperaturas entre 800 e 1000°C, sob uma faixa de pressão de 3-25 bar. Essa reação possui como reagentes uma mistura de vapor e hidrocarbonetos como o gás natural, sendo também empregado a nafta e o gás liquefeito de petróleo. Na primeira etapa da reação é formado o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio, em seguida o CO(g) é convertido em dióxido de carbono (CO₂(g)) na presença de água, apresentado nas equações abaixo.



Dentre algumas desvantagens da reforma a vapor, temos o uso de elevadas temperaturas para a realização do processo, o que torna necessário o emprego de materiais resistentes a essas condições operacionais, gerando um maior custo para a produção do gás hidrogênio. Ao final do processo, é aplicado uma etapa de purificação para evitar a contaminação do gás hidrogênio com o metano e o dióxido de carbono que não reagiram, essa etapa é importante para obter o gás hidrogênio puro, entretanto, é um custo adicional. Além disso, deve-se considerar a formação de coque como outra desvantagem desse processo, o

que pode resultar no entupimento do leito catalítico presente no reator (Paiva, 2022; Megía, *et al.*, 2021; Martino *et al.*, 2021).

2.5 Produção de Hidrogênio Via Biomassa

Em termos energéticos, biomassa é toda matéria orgânica, de origem animal e vegetal, que pode ser utilizada para obtenção de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, biomassa vegetal é uma forma indireta de energia solar, sendo convertida em energia química através da fotossíntese, base da maioria dos processos biológicos existentes. Os constituintes da biomassa podem ser agrupados em duas classes principais: materiais lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina) e materiais orgânicos de baixa estabilidade, tais como lipídeos, proteínas, polissacarídeos simples, amido, hidrocarbonetos, dentre outros (Barros *et al.*, 2022) apud (Demirbas, 2009a, 2009b; Heikkinen *et al.*, 2004).

A biomassa pode ser classificada da seguinte forma:

- i. Madeira e derivados;
- ii. Resíduos agrícolas (colheitas, produção de alimentos e animais);
- iii. Plantas aquáticas;
- iv. Resíduos sólidos municipais e industriais.

A produção de hidrogênio a partir da biomassa, que inclui resíduos de culturas agrícolas e florestais, além de outros resíduos sólidos e de animais, pode ser empregada de forma termoquímica e biológica. A rota termoquímica engloba os processos conhecidos como pirólise, gaseificação, reforma a vapor, ciclo termoquímico e oxidação parcial. Enquanto isso, a rota biológica é subdividida em fermentação, microbiana, biofotólise e eletrólise enzimática.

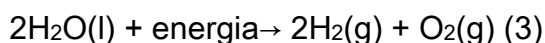
A biomassa (biomassa lignocelulósica) é descrita como um material com elementos bastante complexos, sendo formada principalmente por celulose, lignina e hemicelulose, outros constituintes como minerais e diversos extrativos também estão presentes, o que levam a uma diminuição do rendimento.

Inicialmente, a biomassa bruta precisa passar por uma etapa de redução da umidade, devido ao seu alto teor que pode alcançar 70% em peso em base úmida, dessa forma, após esse pré-tratamento são reduzidos os problemas relacionados aos processos de conversão. Dentre suas desvantagens, estão o elevado custo no tratamento, dependência da disponibilidade sazonal e a geração de subprodutos como o alcatrão e carvão (Paiva, 2022; Aziz; Darmawan; Juangsa, 2021).

2.6 Produção de Hidrogênio por Eletrólise

Para a produção de hidrogênio eletrolítico, dois insumos são essenciais: a água e a eletricidade. Em razão de o custo da eletricidade afetar diretamente o custo de produção de hidrogênio, a utilização da demanda excedente e que não puder ser redistribuída – proveniente da geração eólica, solar e hidrelétrica – torna-se um nicho de aplicação de grande potencial, pois se considera o custo da eletricidade como zero (Viola, L.2015; Sørensen, 2005), já que a energia se dissiparia na rede.

Essa técnica de produção de hidrogênio remete ao processo mais antigo da produção do gás, que tem como base a quebra da molécula de água, que está inserida em um sistema contendo dois eletrodos conectados a uma fonte de energia elétrica DC. A eficiência desse processo pode ser aumentada com a adição de eletrólitos na solução, como um ácido, base ou sal. Dessa forma, a eletrólise da água consegue produzir gás hidrogênio com elevada pureza e por uma rota ecologicamente correta, sem liberação de gases do efeito estufa (dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano e outros), pois é obtido como subproduto o gás oxigênio, apresentado na equação 3 (Paiva, 2022; Vidas; Castro, 2021).



Em geral, para pequenas taxas de produção, utilizam-se painéis solares ou turbinas eólicas individuais de média capacidade e eletrolisadores de membrana de troca protônica. No caso de médias e grandes capacidades, os arranjos mais eficientes são a combinação de um parque eólico ou uma

hidrelétrica com um eletrolisador alcalino (Viola, L.2015; Dincer; Zamfirescu, 2012).

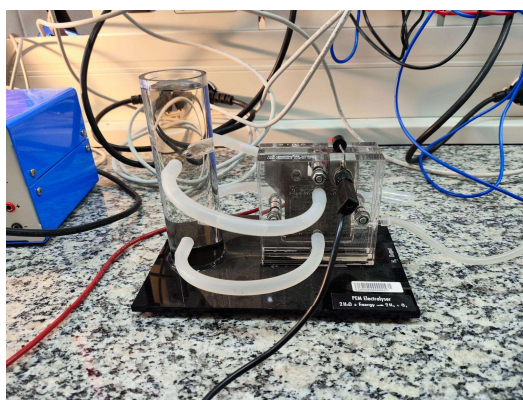
2.6.1 Tipos de Eletrolisadores

O hidrogénio pode ser obtido de diferentes fontes de matérias-primas sendo uma das principais a água, através do uso de eletrolisadores de hidrogénio que efetuam a eletrólise. Apesar dos eletrolisadores serem conhecidos há mais de dois séculos, as atuais tendências tecnológicas têm influenciado o seu desenvolvimento e as suas aplicações na indústria. O princípio da eletrólise da água é simples, no entanto, as diferenças no eletrólito e temperatura de funcionamento orientam a construção de diferentes tecnologias que, por sua vez, conduzem à seleção de diferentes componentes e métodos de produção de H_2 (Souto, H. J. da C, 2022).

2.6.1.1 Eletrolisador por Membrana de Troca Protônica (Pem)

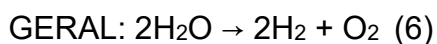
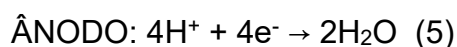
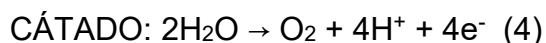
A estrutura e o princípio de operação de um eletrolisador PEM consiste numa membrana de polímeros que apenas permite a passagem dos prótons, levando a que no ânodo, através de reações eletroquímicas, a água seja decomposta e forme oxigênio e no cátodo seja formado hidrogênio. De uma forma mais pormenorizada, a água em estado puro ao entrar dentro da célula do eletrolisador e a ficar em contato com o ânodo irá desassociar o hidrogênio (H^+ , Próton) e o oxigênio na camada catalisadora do ânodo. Deste modo, o oxigênio ficará na parte exterior do ânodo, enquanto o hidrogênio(H^+) ao atravessar a membrana de polímeros e ao entrar em contato com a camada catalisadora do cátodo receberá elétrons convertendo-se em hidrogênio em estado gasoso.

Figura 01 – Eletrolisador PEM



Fonte: foto retirada do laboratório de Energias Renováveis

A reação química decorrente deste processo pode ser descrita pelas equações (4)-(6):



(Souto, H. J. da C, 2022) apud (A. Keçebas, 2019)

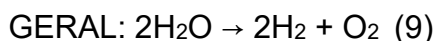
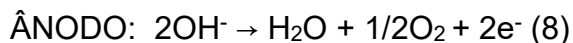
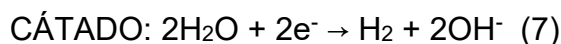
2.6.1.2 Eletrolisador Alcalino

Atualmente o eletrolisador alcalino é a tecnologia mais utilizada em termos industriais para a obtenção de hidrogênio. O eletrólito presente nos eletrolisadores alcalinos é uma solução aquosa de potássio ou hidróxido de sódio. Esta solução aquosa pode variar consoante as temperaturas que se encontram em jogo, normalmente entre 20% a 30% para um domínio de temperaturas entre os 30°C e os 80°C e uma variação de pressão entre 1 bar e 30 bar (Souto, H. J. da C, 2022; S.Shiva Kumar, 2019).

Os dois eletrólitos que se encontram a operar nesta solução aquosa (ânodo e cátodo) encontram-se separados por um diafragma onde ocorre a passagem de íons de hidróxido (OH⁻). Assim, este processo inicia-se no lado da redução eletroquímica (cátodo) onde duas moléculas da solução alcalina do eletrólito são reduzidas em hidrogênio e assim dois íons de hidróxido (OH⁻) são formados. O hidrogênio produzido nesta fase é difundido da superfície do cátodo em forma gasosa, enquanto os íons de hidróxido são transferidos através dos poros do diafragma no sentido do cátodo para o ânodo devido à influência do potencial elétrico. Assim, duas moléculas de água serão oxidadas formando uma molécula di-atômica de oxigênio (O₂) e quatro átomos de hidrogênio (Souto, H. J. da C, 2022; L. Vidas and R. Castro, 2021).

Neste tipo de processos o diagrama é normalmente constituído por amianto e os eletrodos são de níquel. A existência deste mesmo diafragma no meio da célula permite a separação do cátodo ao ânodo evitando assim a mistura dos gases produzidos pelos respetivos eletrodos (Souto, H. J. da C, 2022; S. Trasatti, 1999).

A reação química decorrente deste processo pode ser descrita nas equações (7)-(9):



2.6.2 Células a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC)

As células a combustível (FC, do inglês Fuel Cell) consistem em uma célula eletroquímica capaz de converter energia química de um combustível em energia elétrica por meio de reações eletroquímicas (Wiley, 2010). De maneira geral, as células a combustível são compostas por um núcleo de célula constituída de eletrólito em contato com o ânodo (eletrodo negativo) e cátodo (eletrodo positivo) (Gamba, 2024).

Segundo Javaid Zaidi, Takeshi Matsuura em “Polymer Membranes for Fuel Cells” As FC são classificadas conforme o eletrólito, existem várias reportadas, cada qual com sua aplicação, condições operacionais e características distintas. As mais difundidas são: 1) membrana trocadora de prótons (PEMFC, do inglês Proton Exchange Membrane Fuel Cell); 2) óxido sólido (SOFC, do inglês solid oxid fuel cell); 3) alcalinas (AFC do inglês, alkaline fuel cell); 4) ácido fosfórico (PAFC do inglês, phosphoric acid fuel cell); 5) carbonato fundido (MCFC, do inglês Molten Carbonate Fuel Cell).

As células a combustível de membrana trocadora de prótons (PEMFC) são as mais propagadas, operando em batelada ou continuamente (Bhogilla, 2024), (Chang, 2024). A temperatura operacional de máxima eficiência é 80 °C, porém é capaz de operar em menores temperaturas (Wilberforce *et al.*, 2016) (Peighambardoust *et al.*, 2010). Seu eletrólito característico é uma membrana polimérica, em que a Nafion® é a mais empregada comercialmente (Peighambardoust *et al.*, 2010). Os eletrodos (ânodo e cátodo) são constituídos de eletrocatalisadores, onde o mais empregado é a platina (Alaswad *et al.*, 2020). Inúmeras pesquisas visam o desenvolvimento de

eletrocatalisadores mais eficientes (Wang *et al.*, 2020) (Van Der Linden *et al.*, 2023).

Figura 02 – Célula Combustível PEMFC



Fonte: foto retirada do laboratório de Energias Renováveis

2.7 Vantagens e Desvantagens no Uso de Eletrólise para Geração de Hidrogênio Verde

A eletrólise de água é a reação química de oxirredução provocada pela passagem de corrente elétrica contínua, correspondente à dissociação da molécula de água nos seus constituintes, a saber, o hidrogênio e o oxigênio, na presença de um eletrólito (Gomes, 2022). Contudo, o processo é controlado cineticamente e existem resistências devidas à energia de ativação, difusão e mobilidade dos íons, resistência dos condutores, fenômenos de superfície que resultam na formação de bolhas e entropia, o que faz com que o potencial necessário para vencer esses fatores tenha que ser superior, o que se denomina por sobrepotencial. No que diz respeito, prefere-se, geralmente, a eletrólise em meio alcalino por ser mais eficiente do que a eletrólise em meio ácido (Schalenbach *et al.*, 2016), utilizando soda cáustica, sendo os eletrodos separados por um diafragma, o que permite a separação dos dois gases obtidos, sendo ainda possível utilizar catalisadores para melhorar a eficiência (Gomes, 2022).

As células PEM, introduzidas pela General Electric, em 1960, equipadas com um eletrodo sólido polimérico responsável pela condução de prótons, separação dos produtos gasosos e isolamento elétrico dos eletrodos, permitem operar com altas densidades de corrente, reduzindo os custos de operação, principalmente em sistemas acoplados a energia eólica ou solar. A sua eficiência

atual é de cerca de 80%, esperando-se vir a poder atingir 82-86% antes do ano 2030 (Bernholz, 2018). A maior potência atual para unidades PEM é, em 2021, de 20 MW (Collins, 2021). Contudo, há que notar que a eletrólise alcalina apresenta ainda algumas vantagens em relação à eletrólise PEM, nomeadamente, a utilização de catalisadores mais baratos em relação aos catalisadores usados nos sistemas PEM que são metais do grupo da platina; maior durabilidade devido à possibilidade de renovar o eletrodo e havendo uma menor dissolução do catalisador anódico, além de uma maior pureza do gás obtido, devido à baixa difusividade do gás no eletrólito alcalino (Gomes, 2022).

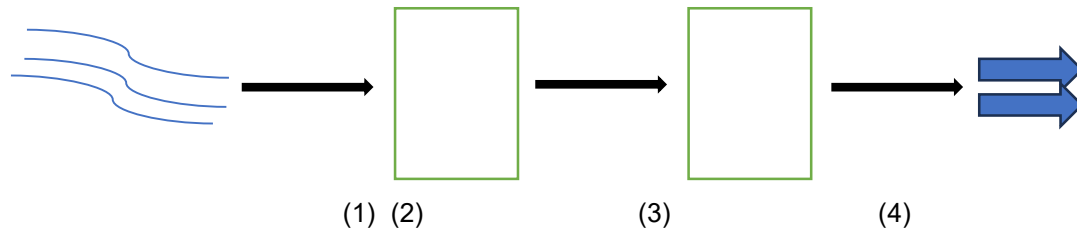
3 METODOLOGIA DO TRABALHO

Para a fundamentação teórica deste trabalho de conclusão de curso, foi utilizada a revisão bibliográfica por meio da consulta de artigos científicos, dissertações e teses. De acordo com o tema exposto, foram delimitados alguns critérios para a pesquisa, como: aspectos fundamentais, destaque nacional e o cenário atual e perspectivas de futuro do emprego do hidrogênio verde no Brasil.

4 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

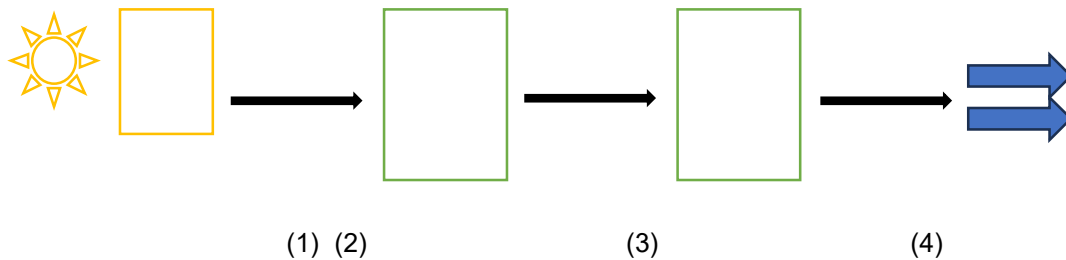
De maneira geral, o processo de produção de hidrogênio com energia proveniente de fontes renováveis se resume em três etapas: a obtenção da energia elétrica, a adequação e compatibilização da eletricidade a ser fornecida ao eletrolisador e a produção propriamente dita. (Viola, L.2015)

Figura 03 – Diagrama esquemático da produção de hidrogênio eletrolítico.



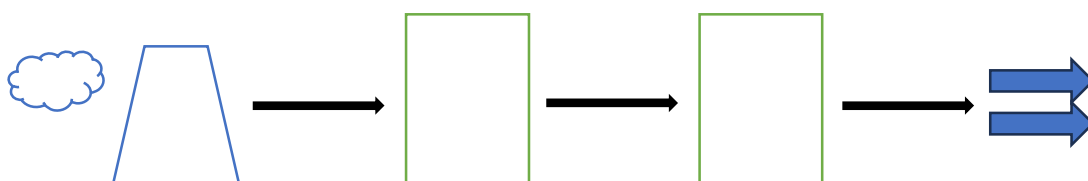
Legenda:

- (1) Fonte primária Aerogerador
- (2) Conversor CC/CA
- (3) Eletrolizador
- (4) Produto final Hidrogênio e Oxigênio



Legenda:

- (1) Fonte primária módulo fotovoltaico
- (2) Conversor CC/CC
- (3) Eletrolizador
- (4) Produto final Hidrogênio e Oxigênio



(1)

(2)

(3)

(4)

Legenda:

- (1) Fonte primária barragem/turbina/gerador
- (2) Conversor CC/CA
- (3) Eletrolizador
- (4) Produto final Hidrogênio e Oxigênio

Fonte: Elaboração própria (2024)

5 IMPORTÂNCIA DO HIDROGÊNIO NO CONTEXTO ATUAL

De acordo com o Caderno Setorial ETENE (2021), em dezembro de 2020, o Chile deu a largada na América Latina e anunciou a meta de, em duas décadas, figurar entre os três maiores exportadores de hidrogênio verde do planeta, com o produto mais barato entre seus competidores. A Colômbia também quer desenvolver uma indústria do gás, e busca potenciais mercados de exportação. O Brasil entra nessa onda com a vantagem de ter uma costa privilegiada, incidência de sol durante o ano todo e vento em abundância. O país tem um dos menores custos marginais para geração de energias renováveis, e isso é fundamental para o barateamento do processo de eletrólise. Os investimentos anunciados para construção de usinas produtoras de hidrogênio verde no Brasil já somam mais de US\$ 22 bilhões, todos concentrados em portos – Pecém, no Ceará; Suape, em Pernambuco; e Açu, Rio de Janeiro.

Dentre as iniciativas em prol do desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil, cabe destacar a criação pelo Governo do Estado do Ceará do primeiro HUB de Hidrogênio Verde do país, em 19 de fevereiro de 2021. Essa iniciativa foi seguida pelos estados de Pernambuco, Rio de Janeiro, Bahia e Minas Gerais, que também anunciaram a criação de HUBs de hidrogênio verde, dando visibilidade às potencialidades desses estados, possibilitando a atração de investimentos.

Particularmente para o Ceará, pioneiro nas ações para consolidação de um HUB de hidrogênio verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), conforme já referido, já foram assinados diversos protocolos de intenção entre o Governo do Estado e players internacionais e nacionais interessados em investir na cadeia produtiva do hidrogênio. Conforme destaca Jurandir Picanço (2021) em apresentação em outubro de 2021 para o Banco do Nordeste, já foram anunciados nesse estado os seguintes projetos:

White Martins/Linde :

- Aproveita a sinergia da planta de gases da White Martins já existente na Zona de Processamento de Exportação (ZPE).

- Objetiva desenvolver projeto da cadeia produtiva do hidrogênio verde, incluindo a intenção de participação em pool de armazenamento de amônia e de utilidades.

Fortescue

- Projeto Brasil 2025: 2GW: 300.000 ton/ano de eletrólise de hidrogênio verde.
- Investimento total de USD 6 bilhões.

Qair Brasil

- Projeto Liberdade: 2,24GW: 296.000 ton/ano de eletrólise de hidrogênio verde.
- Complexo Eólico Offshore Dragão do Mar: 1,22GW.
- Investimentos de US\$ 3,95 bilhões em H2V e de US\$ 3 bilhões na eólica offshore.

EDP Energias do Brasil

- Projeto Piloto da 1ª usina hidrogênio do Brasil (Operação em 2022).
- Capacidade: 3 MW usina solar; 250 Nm³/h de produção de H2V.
- Investimento de R\$ 41,9 milhões.

Diferencial Energia

- Opera no setor elétrico brasileiro na comercialização de energia, projetos de geração e consultoria.
- Intenção de participação em pool de armazenamento de amônia e de utilidades a ser desenvolvido e implantado no HUB do Pecém.

H2Helium

- Desenvolvedores de projetos de Blue/Green H2/NH3.
- Objetiva desenvolver projeto da cadeia produtiva do hidrogênio verde, incluindo a possibilidade de estudar a participação em pool de armazenamento de amônia e de utilidades.

Hytron

- Comercializa e projeta soluções inovadoras para produção de hidrogênio.
- Objetiva desenvolver e buscar a viabilidade de um Projeto Piloto para produção de Hidrogênio Verde de até 5 MW, que será localizado no Porto do Pecém.

Eneva

- A maior operadora privada de gás natural do país. Tem parque térmico de 2,8 GW de capacidade contratada.
- Objetiva desenvolver projeto da cadeia produtiva do hidrogênio verde, incluindo a intenção de participação em pool de armazenamento de amônia e de utilidades.

De acordo com o Portal Hidrogênio Verde Brasil, quanto mais barata for a energia usada para gerar o hidrogênio verde, mais viável será expandir a cadeia produtiva. Investimentos em aumento de escala e de eficiência na produção de energias eólica e solar estão sendo direcionados para as regiões do planeta com maior potencial.

há desafios relacionados a preço, transportes, distribuição e armazenamento, que ainda precisam ser superados para a aplicação da tecnologia do H2 Verde, dentre os quais podem ser destacados:

- Atualmente, o hidrogênio verde é de duas a três vezes mais caro do que o hidrogênio azul. Estima-se que os custos de produção do hidrogênio verde podem cair 62% até 2030, para algo próximo de um patamar entre US\$ 1,4 e US\$ 2,3 por quilo. Se isso ocorrer, a paridade entre o custo do hidrogênio verde e do hidrogênio cinza pode ocorrer entre 2028 e 2034 – com projeções abaixo de US\$ 1 por quilo em 2040.
- Desafios relacionados à distribuição e ao armazenamento do hidrogênio em tanques devido à sua alta volatilidade e inflamabilidade, mas há também opções mais seguras para mantê-lo guardado, como liquefazê-lo, diluí-lo em gás natural ou até

agregá-lo à amônia – nesse caso, ele pode ser extraído da amônia no destino. Tubulações de gás natural já instaladas podem transmitir o hidrogênio diluído (20% de H₂ e o restante de gás natural) por distâncias que podem superar 5 mil km. O potencial de transmissão energética nessas tubulações é dez vezes maior do que o de uma linha elétrica e a um oitavo do custo.

- Desafios relacionados aos transportes pois gera 24% das emissões globais de CO₂ por causa da queima de combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel. Desse montante, 3/4 são emitidos por carros, caminhões, ônibus e motocicletas. No transporte naval, a amônia verde, sintetizada a partir do hidrogênio verde, pode impulsionar navios de carga, sendo o melhor custo-benefício para a descarbonização do tráfego de contêineres até 2030. Para o setor de aviação, o desafio é desenvolver tecnologia capaz de impulsionar aeronaves de pequeno a grande porte com hidrogênio líquido. Outra opção é substituir querosene de aviação por combustíveis sintéticos, à base de hidrogênio verde, que emitem menos carbono.
- Desafios relacionados à adequação do marco regulatório no contexto de descarbonização do sistema de produção e consumo de energia, o hidrogênio poderá ter valor de mercado diferenciado, a depender da sua origem de produção, apesar de nada influenciar tecnicamente na forma de sua utilização. Assim como é realizada no Brasil a distinção regulatória entre energia convencional (proveniente de termelétricas a carvão ou a gás, nuclear e de hidrelétricas de grande porte) e energia incentivada (oriunda de fontes solar, eólica, biomassa e hidrelétricas de menor porte), o mercado deverá caminhar para o incentivo da produção do hidrogênio verde por conter atributos ambientais que possibilitarão o atingimento de metas de sustentabilidade com o consequente pagamento de um preço “prêmio”, de acordo com a origem de produção do hidrogênio. Nesse cenário, o Brasil aparece em

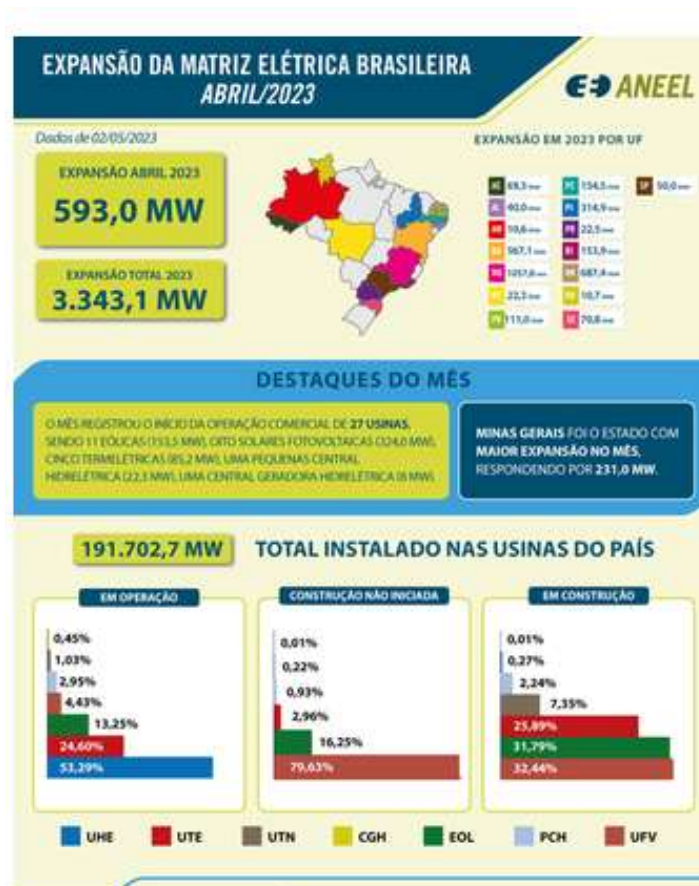
destaque no plano mundial, pois um dos desafios da produção em larga escala do hidrogênio verde está em seu custo de produção, que é substancialmente superior se comparado a outros “tipos” de hidrogênio. Portanto, a predominância das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, em especial, solar, eólica, biomassa e hidrelétrica, associada a seus custos decrescentes e uma localização privilegiada do ponto de vista de logística para exportação, faz com que o Brasil tenha um potencial competitivo considerável face a outros players. A tendência é a utilização pelos governos de políticas públicas de subsídios e incentivos à produção e consumo de hidrogênio verde pelas empresas, como a concessão de benefícios fiscais, reserva temporária de mercado, financiamentos mais favoráveis, entre outros (OLIVA JÚNIOR, 2021);

6 POTENCIAL ELÉTRICO RENOVÁVEL BRASILEIRO

De acordo com Ministério de Minas e Energias (MME) em relatório divulgado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as fontes renováveis foram responsáveis por um crescimento de 3,3 gigawatts (GW) da matriz elétrica brasileira até abril de 2023. Desse total, 49,15% vieram de usinas eólicas, responsáveis por 1.643 MW, e 37,19%, de solares fotovoltaicos, responsáveis por 1.243,4 MW. De acordo com o levantamento da Aneel, apenas no mês de abril o crescimento da matriz elétrica brasileira foi de 593,0 MW concentrados em 26 usinas: 11 eólicas (153,5 MW), oito solares fotovoltaicas (324,0 MW), cinco termelétricas (85,2 MW), uma pequena central hidrelétrica (22,3 MW), uma central geradora hidrelétrica (8 MW). O estado que apresentou maior expansão no mês de abril foi Minas Gerais, respondendo por 231,0 MW.

Minas também foi o estado que apresentou os maiores resultados no acumulado dos quatro meses, responsável pela geração de 1.057,8 MW. Em seguida, vem o Rio Grande do Norte, com 687,4 MW, Bahia com 567,1 MW, e Piauí, com 314,9 MW. Ao todo, 104 usinas iniciaram a operação comercial em 2023, em 15 estados, permitindo a expansão registrada.

Figura 04 – Expansão da matriz elétrica brasileira em abril/2023



Fonte: (MME, 2023)

6.1 Potencial Solar Fotovoltaico do Nordeste Brasileiro

A energia solar fotovoltaica é obtida através do efeito fotovoltaico, que consiste na conversão direta da irradiância solar em energia elétrica, sendo considerada uma alternativa promissora para expansão da oferta de energia elétrica com baixo impacto ambiental (Gasparin *et al.*, 2021).

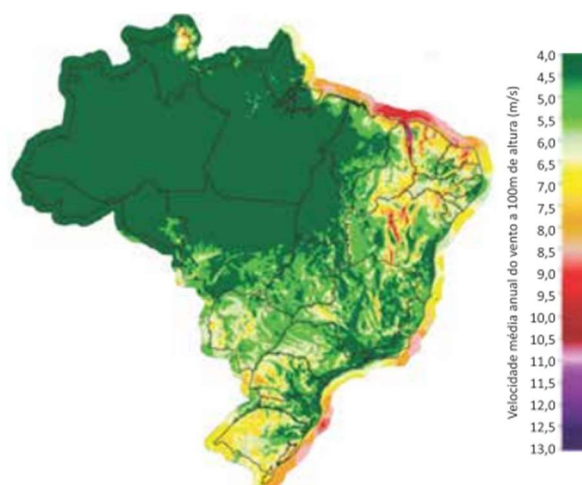
A região já ocupa um lugar de destaque no cenário de produção de energia limpa, graças ao seu potencial de geração de energia através de sistemas de geração eólica de energia, ainda assim, a região é responsável por apresentar o maior potencial para produção de energia proveniente da radiação solar do país, pois isso é resultante da sua localização mediante a linha do equador. O que faz com que os raios solares atinjam a superfície sob um ângulo de 90°, além do que a pouca variação no fotoperíodo torna a geração de energia constante ao longo do ano, o que a torna a região mais favorecida do país para utilização de sistemas fotovoltaicos (Araújo, 2019).

De acordo com dados da ANEEL (2021) e Silva (2023), o Nordeste possui a maior capacidade instalada de geração solar fotovoltaica no Brasil, com 38,13%, equivalente a 3.338,81 MW de potência. Em segundo lugar está o Sudeste com 33,15%, equivalente a 2.945,62 MW. A região com menor capacidade é o Norte, com apenas 3,53%, proporcional a 314,13 MW. Dentre os estados do Nordeste, dados da ANEEL(2021) mostram que o Piauí possui maior capacidade de geração centralizada e segundo lugar em geração distribuída, totalizando 1.146,39 MW, o que equivale a 33,82% do total do Nordeste e 12,90% do total do Brasil. Em segundo lugar está a Bahia com total de 971,25 MW, 28,65% do total nordestino e 10,93% do total brasileiro. Os estados nordestinos com menor capacidade são Sergipe com apenas 32,94 MW, seguido de Alagoas com 35,81 MW.

6.2 Potencial Eólico do Nordeste Brasileiro

De acordo com o artigo Um estudo sobre a energia eólica no Brasil, a energia eólica é produzida a partir da força dos ventos - é abundante, renovável, limpa e disponível em muitos lugares. Essa energia é gerada por meio de aerogerador, nas quais a força do vento é captada por hélices ligadas a uma turbina que aciona um gerador elétrico. A quantidade de energia transferida é função da densidade do ar, da área coberta pela rotação das pás (hélices) e da velocidade do vento. Segundo Bezerra (2019) no caderno setorial ETENE , o Brasil se destaca por ter sua matriz de geração de energia elétrica fortemente baseada em fontes renováveis, com preponderância da hidroeletricidade e da biomassa proveniente da cana-de-açúcar. Além dessas, outras fontes renováveis ganham destaque na matriz de geração elétrica do País, a exemplo da energia eólica, inserida mais recentemente. Considerando as atuais tecnologias para produção de energia a partir do vento e, principalmente, a utilização de aerogeradores posicionados a 100 metros de altura, o potencial eólico brasileiro onshore (em terra) pode chegar a 880,5 GW, sendo que 522 GW são considerados tecnicamente viáveis (Figura 3). Além disso, o potencial eólico brasileiro offshore (no mar) também é gigantesco, estimando-se alcançar 1,3 TW, tendo a região oceânica costeira do Nordeste as áreas mais favoráveis. Para a Região nordestina, as estimativas apontam potencial onshore de 309 GW (Bezerra, 2019; Pereira, 2016).

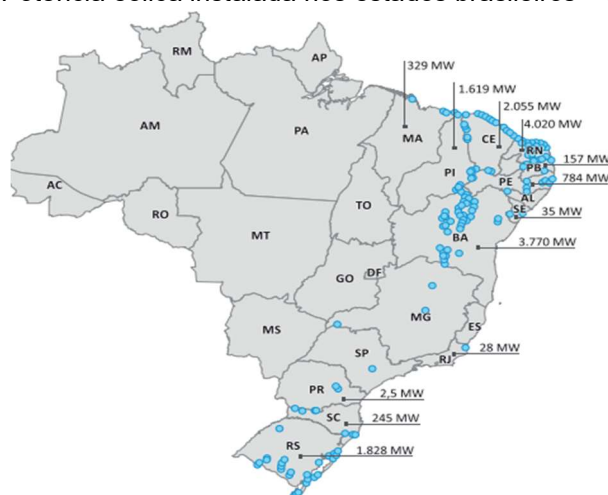
Figura 05 - Potencial eólico do Brasil



Fonte: Adaptado de Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (2017) por BNB/ETENE/Célula de Gestão de Informações Econômicas.

No Brasil, a maioria dos projetos eólicos está situada no Nordeste. Isto se deve ao fato de se localizarem na Região nordestina as “jazidas” de vento que apresentam as melhores condições de aproveitamento para fins de geração de energia elétrica (Figura 5).

Figura 06 - Potência eólica instalada nos estados brasileiros – Posição: 31/03/2019



Fonte: ANEEL (2019b). Elaboração: BNB/ETENE/Célula de Gestão de Informações Econômicas.

7 CONCLUSÃO

A principal desvantagem da eletricidade é que deve ser consumida imediatamente após sua geração, com opções limitadas de armazenamento em grande escala. Atualmente, as formas de armazenamento são restritas a métodos indiretos, como a acumulação de água em por sistemas de barragens, que transformam energia mecânica potencial em energia elétrica. Outra alternativa significativa é a conversão de energia elétrica de fontes renováveis, onde o Nordeste brasileiro possui potencial para a geração de hidrogênio verde por meio de fontes renováveis, especialmente considerando sua abundância em recursos solares e eólicos. Essa abordagem permite a acumulação de energia em forma química, possibilitando o uso do hidrogênio como fonte de energia térmica descarbonizada ou como matéria-prima na indústria química, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Assim, essas opções de armazenamento de energia elétrica são complementares para redes com alta geração de energia renovável, especialmente em períodos de saturação da rede, onde a energia gerada pode ter impactos financeiros negativos.

O dinamismo atual e as perspectivas promissoras abrem espaço para consolidação na região. Atualmente, são muitas as ações e mobilizações no sentido de fortalecer a indústria do hidrogênio verde, ações do Governo do Estado do Ceará, em 10 de maio de 2023, e ações do Governo Federal foram tomadas a fim de tornar o Brasil uma potência mundial na produção de Hidrogênio verde, o Ceará por sua vez firmou através de seu representante legal *“Parcerias estabelecem um corredor marítimo entre portos e cooperação bilateral para atração de investimentos e negócios”* Com a assinatura do acordo, o Complexo do Pecém e o Porto de Roterdã criam um corredor de ponta a ponta da cadeia de suprimentos para hidrogênio verde, incluindo produção no Pecém e recebimento e distribuição no Porto de Roterdã, para atender à demanda nos Países Baixos e em outros países da Europa. Assinaram a criação do corredor Complexo Industrial e Portuário do Pecém, AES Brasil, Casa dos Ventos, Nexway, Havenbedrijf Rotterdam, Fortescue e EDP.

8 REFERÊNCIAS

KEÇEBAS, A., KAYFECİ, M., BAYAT, M. Electro chemical hydrogen generation in solar hydrogen production, **Elsevier**, 2019, p. 299-317. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128148532000096> Acesso em: 31 out 2023

ACAR, C., BESKESE, A., TEMUR, G., T. Comparative fuel cell sustainability assessment with a novel approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 575-594, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.034>. Acesso em:

ALASWAD, A. et al. Technical and Commercial Challenges of Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells. **Energies**, v.14, p. 144, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/144> . Acesso em: 07 nov 2024

ALMEIDA, R. I. J. et al. Investimento em crédito de descarbonização - cbio. **Revista IberoAmericana de Humanidades, Ciências e Educação- Rease**. São Paulo, p. 1-2. 2021. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/964>. Acesso em: 15 out 2023

ANEEL. (2021). **Geração Distribuída**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/reaufsm/a/SJGGs8TnTrwvzqzr97W9jVJ/abstract/?lang=pt&format=html> . Acesso em: 15 mar. 2024

ARAÚJO, E. et al. **Sustentabilidade e descarbonização: desafios práticos: Territórios e comunidades**. Braga: Cecs – Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade Universidade do Minho Braga . Braga, 2020. 148 p. Disponível em: www.cecs.uminho.pt. Acesso em: 16 nov. 2022.

ARAÚJO, J. R. B. de. **Potencial para instalação de sistemas fotovoltaicos residenciais na região nordeste**. Rio Grande do Norte, 2019.. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/0a671790-bb12-447b-8878-822e5f3dd8f4/content> . Acesso em: 16 nov. 2022

Aziza, M., Darmawan, A., Juangsa, F., B. Hydrogen production from biomasses and wastes: A technological review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.46, p.33756-33781, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.189>. Acesso em: 16 nov. 2022

Barros, Thiago Vinicius *et al.* Gaseificação da biomassa em água supercrítica como tecnologia de produção de hidrogênio, **Research, Society and Development**, v. 11, n.9, e32511931296 2022(CC BY 4.0) Disponível em: DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i9.312961>. Acesso em: 31 out. 2023.

BERNHOLZ, J., RWE's former, current and possible future energy storage applications, VGB Kongress & IEKE Workshop. 2018. Disponível em: https://www.iere.jp/events/workshop/2018-munich/Abstract/Ab_S3-1.pdf. Acesso em: 31 out. 2023.

BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.212, dez. 2021. Disponível em: <https://bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1109> Acesso em: 31 out. 2023.

Bhogilla, S., Pandoh, A. & Singh, U. R. Cogeneration system combining reversible PEM fuel cell, and metal hydride hydrogen storage enabling renewable energy storage: **Thermodynamic performance assessment. Int. J. Hydrog. Energy**, v. 52, p.1147–1155, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923039800>. Acesso em : 04 jul. 2023

FORTE, Sérgio H. A. C.; GAZILLO, Anderson Montenegro. Hidrogênio verde como potencializador do comércio internacional no estado do Ceará. **Bioenergia em revista: diálogos**, v.13, n. 1, p. 62-87, jan./jun. 2023. Disponível em: <http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/480> . Acesso em 31 out. 2023.

BONACIN, Juliano Alves, MONTABONE, Paulo, GONÇALVES, Renato Vitalino. Hidrogênio verde: como o Brasil pode se tornar polo de produção do 'combustível do futuro' [Entrevista a Igor Savenhago]. **G1: O Portal de Notícias da Globo**,

2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/estacao-agro/noticia/2022/08/08/hidrogenioverde-como-o-brasil-pode-se-tornar-polo-de-producao-do-combustivel-do-futuro.ghtml>. Acesso em: 31 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energias. **Matriz elétrica brasileira cresce 3,3 GW até abril de 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/matriz-eletrica-brasileira-cresce-3-3-gw-ate-abril-de-2023#:~:text=Marca%20foi%20alcan%C3%A7ada%20gra%C3%A7as%20a,pa%C3%ADs%2C%20segundo%20levantamento%20da%20ANEEL.&text=As%20fontes%20renov%C3%A1veis%20foram%20respons%C3%A1veis,brasileira%20at%C3%A9%20abril%20de%202023>. Acesso em: 04 jul. 2023

Capurso, T., et al. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. **Energy Conversion and Management**, v. 251, p. 114898, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114898>. Acesso em: 05 jul. 2023

Caravaca, A., et al. Electrochemical reforming of ethanol/water solutions for pure H₂ production in a PEM electrolysis cell. *International journal of hydrogen energy*, 37, 9504- 9513, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.062>. Acesso em: 05 jul. 2023

CARVALHO, N. L.; KERSTING, C.; ROSA, G.; FRUET, L.; BARCELLOS, A. L. Desenvolvimento sustentável X desenvolvimento econômico. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 3, p. 109–117, 2015. DOI: 10.5902/2236130817768. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/17768>. Acesso em: 1 dez. 2023.

Chang, P.-C., Lai, J.-L., Huang, C.-H. & Kuan, Y.-D. Integration of the PEMFC with a hydrogen production device adopting sodium borohydride and metal cobalt catalyst. *Int. J. Hydrog. Energy*, v.52, 905–916, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923012843>. Acesso em: 1 dez. 2023.

CIÊNCIA ATUAL - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR DA FACULDADE SÃO JOSÉ, V. 5 N. 1 (2015), p.3. Disponível em: <https://revista.saojose.br/index.php/cafsj/article/view/100>. Acesso em 02 de abr. de 2024

Demirbas, A. (2009b). Thermochemical Conversion Processes. In Biofuels (pp. 261–304). https://doi.org/10.1007/978-1-84882-011-1_6 Demirbas, A. (2009a). **Pyrolysis Mechanisms of Biomass Materials. Energy Sources Part A Recovery Utilization And Environmental Effects**, v.31, n.13, p.1186–1193. <https://doi.org/10.1080/15567030801952268> Acesso em: 31 out. 2023.

DEWAN, A. Hidrogênio verde pode ser o combustível do futuro. Mas ainda não deve resolver todos os problemas. **CNN Brasil**, ago. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/o-hidrogenio-verde-pode-ser-o-combustivel-do-futuromas-ainda-nao-deve-resolver-todos-os-problemas/> Acesso em: 31 out. 2023.

DINCER, Ibrahim; ZAMFIRESCU, Calin. Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE. International Journal Of Hydrogen Energy, Amsterdam, v. 37, p.16266- 16286, 05 abr. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319912004971>. Acesso em: 29 out. 2023.

FREITAS, G. M. T. **Hidrogênio verde: estudo de caso sobre o potencial brasileiro como exportador para União Europeia utilizando programação linear**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2022. Acesso em: 31 out. 2023.

Gamba;. **Armazenamento e liberação de hidrogênio: hidrólise catalítica do borohidreto de sódio em condições brandas para aplicação estacionária em protótipo de PEMFC**. Florianópolis, 2024 Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/77317/browse?rpp=20&sort_by=1&type=title&offset=18&etal=-1&order=ASC. Acesso em: 01 out 2024

GASPARIN, F. B., LIMA, V. O. D.; MICHELETTI, D. H.; BURINA, E. L. K. **A Influência de Políticas Públicas para o Progresso da Geração Solar Fotovoltaica e Diversificação da Matriz Energética Brasileira**. Rev. Virtual Quim., p. 1-5, 2021. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4250> . Acesso em : 01 out 2024

GÓES, G. S. **A geopolítica da energia no século XXI**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2021. P. 392. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=W5o5EAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=G%C3%93ES,+G.+S.+A+geopol%C3%ADtica+da+energia+no+s%C3%A9culo+XXI.+1.+ed.+Rio+de+Janeiro:+Synergia,+2021.+P.+392&ots=QzDIJ8H2F&sig=r6Falu2luo5ZpFYvbiiBYq6Tjq4#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 31 out. 2023.

Gomes, J.(2022) Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio, **Rev. Ciência Elem.**, V10(02):025. Disponível em: doi.org/10.24927/rce2022.025. Acesso em: 31 out. 2023.

Heikkinen, J. ., Hordijk, J. ., de Jong, W., & Spliethoff, H. (2004). **Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 883–900. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.001>. Acesso em: 31 out. 2023.

HIDROGÊNIO VERDE: NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA. Caderno Setorial ETENE, Francisco Diniz Bezerra, Ano 6, Nº 212, dezembro 2021. Disponível em: https://cultura.bnb.gov.br/s482-space/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 15 jan 2024

L. Vidas and R. Castro, **Recent Developments on Hydrogen Production Technologies:** State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis Appl. Sci., vol. 11, no. 23, p. 11363, Dec. 2021. Disponível em: [doi:10.3390/app112311363](https://doi.org/10.3390/app112311363). Acesso em: 01 nov 2024

LAMEIRAS, F. L. **O hidrogênio como vetor de energia** / CMG (RM1-T). - Rio de Janeiro: ESG, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/lameiras-fortunato-lobo.pdf>. Acesso em: 31 out. 2023.

Liu, K., Song, C., Subramani, V. **Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies**, Eds., 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470561256>. Acesso em: 01 nov 2024

Martino, M., *et al.* **Main Hydrogen Production Processes: An Overview.** *Catalysts*, 11, 547, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal11050547>. Acesso: 15 mai 2024

Megía, P., J., *et al.* Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. **Energy Fuels**, 35, 16403–16415, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>. Acesso em: 20 jan 2024

MESQUITA, CAMILA LUCIANA SILVA de. **Hidrogênio verde, uma alternativa promissora em solos brasileiros: uma revisão bibliográfica**. João Pessoa, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/25046>. Acesso em: 20 ago 2023

Midilli, A., *et al.* A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. **International journal of hydrogen energy**, 46, 25385-25412, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>. Acesso em: 20 ago 2023

MIGUEZ, J.M. **O Brasil e o Protocolo de Quioto**. Cenbio Notícias, v.3, n.8, p.3, 2000. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.5935/1809-2667.20100020> Acesso em: 29 out. 2023.

Miranda, P. E. V., Editor, "**Science and Engineering of Hydrogen Based Energy Technologies**", 1st Edition, ELSEVIER, Academic Press, 438 p, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128142516/science-and-engineering-of-hydrogen-based-energy-technologies>. Acesso em: 16 nov. 2022.

NEGRO, M. L. M. et al. **A descarbonização pela eletroquímica e seu impacto para uma sociedade sustentável**: revista eletrônica de jornalismo científico. Revista eletrônica de jornalismo científico. 2021. Com ciência. Disponível em: <https://www.comciencia.br/adescarbonizacao-pela-eletoquimica-e-seu-impacto-para-uma-sociedade-sustentavel/>. Acesso em: 16 nov. 2022.

OLIVA JÚNIOR, José Roberto. **Hidrogênio Verde, Perspectivas e Regulamentação no Brasil**. Artigo.In: Revista BrasilAlemanha, edição outubro de 2021. Disponível em: <https://www.ahkbrasilien.com.br/publicacoes/revista-brasilalemanha>. Acesso em 06 jul. 2023.

Paiva, Suelya da Silva Mendonça - **PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL**. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de PósGraduação em Engenharia Química. Linha de Pesquisa:

Engenharia Ambiental, Natal – RN, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548>. Acesso em: 25 jul 2023.

Peighambardoust, S. J., Rowshanzamir, S. & Amjadi, M. **Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications**. Int. J. Hydrog. Energy 35, 9349–9384 (2010). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319910009523>. Acesso em: 06 jul. 2023.

PEREIRA, E. B. Segurança energética: perspectivas no enfrentamento às mudanças climáticas globais. In: **Conferência Internacional do INCT para Mudanças Climáticas**. São Paulo, 28 a 30 de setembro de 2016. Disponível em: <https://fapesp.br/eventos/2016/09/inct/ENIO.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

PORTAL DO HIDROGÊNIO VERDE. Site. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/desafios-do-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 06 jul. 2023.

PRAHALAD, C. K. **A Riqueza na base da pirâmide: como erradicar a pobreza com o lucro**. Porto Alegre: Bookman, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Stuart-Hart/publication/228630306_A_riqueza_na_base_da_piramide/links/0a85e5320a80001a92000000/A-riqueza-na-base-da-piramide.pdf. Acesso em: 01 Dez. 2023.

S. M. Javaid Zaidi, Takeshi Matsuura. **Polymer Membranes for Fuel Cells**. (Springer US, Boston, MA, 2009). Disponível em: doi:10.1007/978-0-387-73532-0. Acesso em: 01 Dez. 2023.

S. Trasatti, **Water electrolysis: who first?** J. Electroanal. Chem., vol. 476, no. 1, pp. 9091, Oct.1999. Disponível em: doi:10.1016/S0022-0728(99)00364-2. Acesso em: 01 Dez. 2023.

S.Shiva Kumar and V. Himabindu, **Hydrogen production by PEM water electrolysis A review** Mater. Sci. Energy Technol., vol.2,no.3, pp. 442454,Dec.2019,doi:10.1016/j.mset.2019.03.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>. Acesso em: 01 Dez. 2023.

Sasikumar, G., et al. **Aqueous methanol eletrolysis using proton conducting membrane for hydrogen production.** *International journal of hydrogen energy*, 33, 5905 – 5910. Disponível em: <https://doi.org/110.1016/j.ijhydene.2008.07.013>. Acesso em: 01 Dez. 2023.

SCHALENBACH, M. et al., **Acidic or Alkaline? Towards a New Perspective on the Efficiency of Water Electrolysis,** *Journal of the Electrochemical Society*, 163, 11. 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0271611jes/meta>. Acesso em: 01 Dez. 2023.

Silva, B. A. O. (2023). **Aproveitamento e potencial da energia solar no nordeste brasileiro. Meio Ambiente (Brasil)**, v.5, n.1, p.55-66. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/announcement/view/55>. Acesso em: 01 Dez. 2023.

Singla, S., *et al.* Hydrogen production technologies - Membrane based separation, storage and challenges. **Journal of Environmental Management**, 302, 113963, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113963>. Acesso em: 01 Dez. 2023.

SØRENSEN, B. **Hydrogen and Fuel Cell: emerging technologies and applications.** Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press, 2005. 450 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Jfb9_P9CfqoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=S%C3%98RENSEN,+B.+Hydrogen+and+Fuel+Cell:+emerging+technologies+and+applications.+Amsterdam,+Boston:+Elsevier+Academic+Press,+2005.+450+p.&ots=kzqBYo8bAd&sig=jUTMR_3LA6FD8vTk1rU8iDsPTI#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 01 Dez. 2023.

SOUTO, H. J. da C.; NOGUEIRA, T. A. F. M. P. . O Hidrogénio Como Vetor Energético do Futuro. **Neutro à Terra**, [S. l.], n. 28, p. 47–53, 2022. DOI: 10.34630/neutroaterra.vi28.4494. Disponível em: <https://parc.ipp.pt/index.php/neutroaterra/article/view/4494>. Acesso em: 29 jun. 2023.

Van Der Linden, F., Pahon, E., Morando, S. & Bouquain, D. **A review on the Proton-Exchange Membrane Fuel Cell break-in physical principles, activation procedures, and characterization methods.** *J. Power Sources* 575,

233168 (2023). Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775323005438>.

Acesso em: 15 set 2024

Vidas, L.; Castro, R. **Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with Focus on Green-Electrolysis. Appl. Sci.**, v. 11, p. 11363, 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.3390/app112311363>. Acesso em: 14 jul 2023

VIOLA, L. **Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica**. 2015. 68 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em:
<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/09dd6473-f808-4a7d-a83a-0484dde42f7a/content>. Acesso em: 14 jul 2023

Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z. & Adroher, X. C. **Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. Mater. Today** 32, 178–203 (2020). Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369702119304948>.

Acesso em: 14 jul 2023

Wilberforce, T., Alaswad, A., Palumbo, A., Dassisti, M. & Olabi, A. G. **Advances in stationary and portable fuel cell applications. Int. J. Hydrog. Energy** 41, 16509–16522 (2016). Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915315822>.

Acesso em: 14 jul 2023