

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAURÍLIO VAGETTI HADAS

ANÁLISE ESTRATÉGICA DA ROTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA ELETRÓLISE ALIMENTADA
POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEU USO EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.

CURITIBA

2023

MAURILÍO VAGETTI HADAS

ANÁLISE ESTRATÉGICA DA ROTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA ELETRÓLISE ALIMENTADA
POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEU USO EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.

Artigo apresentado como requisito parcial à
conclusão do curso de MBA em Gestão
Estratégica em Energias Naturais Renováveis,
Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal
do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Romani

CURITIBA

2023

Análise estratégica da rota de produção de hidrogênio via eletrólise alimentada por energia solar fotovoltaica e seu uso em células a combustível.

Maurílio Vagetti Hadas

RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo analisar estrategicamente a aplicação no cenário brasileiro de uma rota de produção de hidrogênio renovável e de baixo carbono bastante visada até sua aplicação final. Trata-se da produção de hidrogênio através da eletrólise alimentada eletricamente por fonte de geração solar fotovoltaica, com armazenamento local, e posterior geração de energia elétrica via células a combustível conectadas a rede elétrica. A fim de embasar a análise estratégica desta rota, foram levantados dados de eficiências inerentes de cada etapa do processo, bem como os principais custos envolvidos. Como resultado, foi possível apontar que a rota avaliada, apesar de promissora, ainda não é economicamente viável para aplicação no Brasil, principalmente devido aos altos custos de implantação e às perdas elevadas inerentes aos principais equipamentos de conversão envolvidos: os eletrolisadores e as células a combustível. Apesar do resultado obtido, é possível afirmar que esta rota atende tecnologicamente modelos de negócios baseados em sustentabilidade, onde o hidrogênio renovável e de baixo carbono figura como elemento-chave para a descarbonização do consumo energético industrial, seja ele utilizado para geração de energia elétrica ou para outros fins, tendo em vista o grande mercado interno já consolidado deste insumo, atualmente obtido principalmente de origem não-renovável (gás natural). Assim, com o crescimento exponencial de rotas do hidrogênio voltadas para a exportação aliado a perspectiva de consequente crescimento do mercado interno brasileiro, espera-se que a maturidade tecnológica e eficiência dos equipamentos de conversão também acompanhem uma rápida ascensão. Além disso, esta é uma rota alternativa para incremento da despachabilidade de fontes renováveis, tanto em nível de geração centralizada quanto geração distribuída.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde, Eletrolisadores, Energia Renovável, Solar Fotovoltaica, Setor Elétrico Brasileiro

ABSTRACT

This work aimed to strategically analyze the application in the Brazilian scenario of a route of production of renewable and low-carbon hydrogen that is very much targeted until its final application. It is the production of hydrogen through electrolysis electrically fed by a solar photovoltaic generation source, with local storage, and subsequent generation of electric energy via fuel cells connected to the electric grid. In order to support the strategic analysis of this route, data on the inherent efficiencies of each stage of the process were collected, as well as the main costs involved. As a result, it was possible to point out that the route evaluated, although promising, is not yet economically feasible for application in Brazil, mainly due to the high implementation costs and high losses inherent in the main conversion equipment involved: the

electrolyzers and fuel cells. Despite the result obtained, it is possible to affirm that this route technologically meets business models based on sustainability, where renewable and low-carbon hydrogen appears as a key element for the decarbonization of industrial energy consumption, whether used for electricity generation or for other purposes, considering the large domestic market already consolidated for this input, currently obtained mainly from non-renewable sources (natural gas). Therefore, with the exponential growth of hydrogen routes for export together with the perspective of a consequent growth of the Brazilian internal market, it is expected that the technological maturity and efficiency of the conversion equipment will also follow a fast ascension. Furthermore, this is an alternative route for increasing the dispatchability of renewable sources, both in centralized and distributed generation.

Keywords: Green Hydrogen, Electrolyzers, Renewable Energy, Solar Photovoltaic, Brazilian Electric Sector

1 INTRODUÇÃO

Atualmente as energias renováveis das fontes solar e eólica são vistas como importantes alternativas para reduzir a dependência de fontes de energia fósseis e mitigar os impactos ambientais. Entretanto, tais fontes apresentam alguns desafios técnicos em sua aplicação, dentre eles o fato delas, seu baixo índice de despachabilidade. Isso significa que a geração de energia a partir dessas fontes é fortemente dependente das condições climáticas e, portanto, não compõem a parcela de energia firme para o sistema elétrico como a geração de energia a partir de fontes convencionais, como termelétricas e hidrelétricas.

Essa variação pode criar desafios para a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico, especialmente em sistemas com alta participação de energias renováveis não despacháveis. Em momentos de baixa geração de energia solar ou eólica, pode ser necessário recorrer a outras fontes de energia para atender à demanda de eletricidade, impactando tanto no custo de operação do sistema e como nas taxas de emissões de gases de efeito estufa.

Uma possível solução para esse problema pode estar na utilização do Hidrogênio como elemento armazenamento de energia primária para posterior utilização na geração de energia elétrica (via células a combustível, por exemplo), em momentos de baixa disponibilidade das fontes renováveis não despacháveis. Desta forma, este elemento poderia atuar como uma bateria de alta capacidade para o sistema elétrico, podendo ser produzido também via rota elétrica, através de equipamentos conhecidos como eletrolisadores.

Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo explorar e discutir o potencial da rota de produção de hidrogênio renovável e de baixo carbono via eletrólise alimentada por energia solar fotovoltaica e sua viabilidade para posterior utilização nos momentos de alta demanda do sistema elétrico via células a combustível.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PLANO NACIONAL DO HIDROGÊNIO

A fim de construir uma estratégia nacional para o crescimento da cadeia de produção de hidrogênio brasileiro, o Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2) foi introduzido em 2020. O plano foi desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia com a contribuição de numerosas organizações governamentais e não governamentais, bem como de empresas do setor. O principal objetivo do plano é estabelecer o Brasil como líder na produção e utilização de hidrogênio advindo de fontes de energia renováveis como o sol, vento, biomassa, entre outras. Para tal, o plano traça uma série de objetivos e medidas que devem ser completados até ao ano 2030, incluindo o desenvolvimento de um mercado doméstico de hidrogênio, o crescimento da infraestrutura para a produção e distribuição.

O Plano Nacional do Hidrogênio Brasileiro visa promover o desenvolvimento tecnológico e econômico do país, bem como a redução das emissões de gases de efeito de estufa e a transição para uma economia de baixo teor de carbono. Em várias indústrias a utilização do hidrogênio renovável como vetor energético pode substituir os combustíveis fósseis (BRASIL, 2021). Existe uma vertente também na exportação de hidrogênio renovável para outras nações de colaboração internacional. Em linha com a tendência geral da transição energética, o Plano Nacional do Hidrogênio brasileiro posiciona-se assim como uma iniciativa significativa para o desenvolvimento de uma economia mais sustentável e competitiva.

2.2 ROTAS DO HIDROGÊNIO

As rotas do Hidrogênio referem-se aos vários métodos e processos tecnológicos que permitem a produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogênio como combustível ou fonte de energia. Existem diferentes vias para a

produção de hidrogênio (TABELA 1), tais como a reforma do gás natural, a eletrólise da água, a gaseificação da biomassa e separação termoquímica, as quais fazem uso de diferentes fontes de energia primária, como hidroelétricas, eólica, solar, nuclear, biomassa entre outras.

Cada rota apresenta diferentes características e valores diferentes em termos de eficiência, custo e impacto ambiental, sendo que a melhor rota a ser escolhida depende de uma série de fatores, incluindo a disponibilidade de matérias-primas, as infraestruturas existentes e políticas locais de incentivo.

TABELA 1 - Diferentes Processos na produção de Hidrogênio

Fontes Primárias	Fonte	Processo de Produção	Resultado
Hidroelétricas	Energia Elétrica	Eletrólise da Água	Hidrogênio (H ₂)
Pequenas Centrais Hidrelétricas	Energia Elétrica	Eletrólise da Água	
Eólica	Energia Elétrica	Eletrólise da Água	
Solar Fotovoltaica (Solar PV)	Energia Elétrica	Eletrólise da Água	
Nuclear	Energia Elétrica	Eletrólise da Água	
Solar Térmico	Calor	Separação Termoquímica	
Nuclear	Calor	Separação Termoquímica	
Biomassa (Líquidos/Gases)		Reforma a Vapor	
Fósseis (Líquidos/Gases)		Reforma a Vapor	
Biomassa (Sólidos)		Gaseificação	
Fósseis (Sólidos)		Gaseificação	

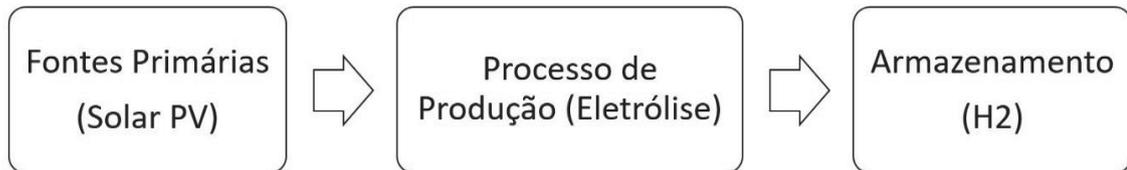
FONTE: O autor (2023).

Além dos desafios técnicos na produção do hidrogênio em larga escala, outro grande desafio de qualquer rota do Hidrogênio é o seu transporte, que implica em custos elevados devido a questões relacionadas ao alto volume e pressões utilizadas, necessitando de processos intermediários que aumentam significativamente o custo quando comparado a combustíveis convencionais (BADWAL, 2016). Embora os avanços em tecnologia e infraestrutura estão contribuindo para redução no custo do transporte do Hidrogênio, essa etapa continua sendo uma barreira significativa para a adoção generalizada do hidrogênio como vetor energético.

Para evitar as distâncias longas de transporte, e consequentes custos adicionais, o hidrogênio pode ser produzido de forma local, sendo utilizado de forma análoga a uma bateria quando aplicado a equipamentos para geração de energia elétrica, servindo assim de combustível armazenável para posterior produção de eletricidade. Para que seja considerado renovável, seu processo de produção deve utilizar energia de fontes sustentáveis. No caso específico de fontes elétricas, o

processo de eletrólise para produção do hidrogênio deve ser proveniente de fontes renováveis, como a energia solar, rota esta exemplificada junto a FIGURA 1.

FIGURA 1 - ROTA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO



FONTE: O autor (2023).

O uso do hidrogênio como bateria fornece uma solução alternativa para o armazenamento de energia de fontes de energia renováveis intermitentes, tais como energia solar e eólica.

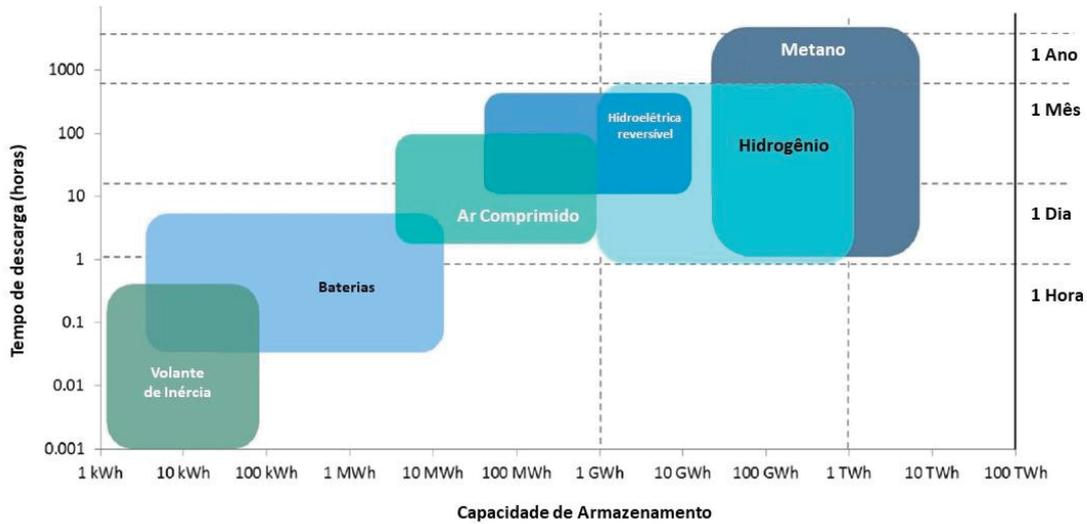
Ao utilizar o excesso de energia gerada durante períodos de alta produção e baixa demanda, o hidrogênio utilizado como “bateria” pode fornecer uma fonte confiável de eletricidade durante períodos de baixa produção e alta demanda de energia no sistema elétrico.

2.3 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Mesmo com o desenvolvimento de novas tecnologias para baterias, o armazenamento de energia ainda é um grande desafio. No período compreendido entre 2014 e 2016, houve um incremento de mais de 300% na capacidade instalada global de baterias. Estima-se que até o ano de 2030, seja alcançada uma capacidade instalada de aproximadamente 14 GW, representando um aumento de 14 vezes em relação ao valor existente em 2016. (IRENA, 2015).

Como pode ser observado na FIGURA 2, existem diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia. As baterias, amplamente utilizadas na atualidade, ainda apresentam limitações em termos de capacidade de armazenamento e tempo de descarga, o que dificulta sua aplicação em sistemas de armazenamento de energia de grande porte. Por outro lado, os sistemas baseados em armazenamento de gases como metano e hidrogênio são mais flexíveis, alcançando tempos de armazenamento de quase 1 ano e capacidades de armazenamento significativamente maiores em comparação com outros métodos apresentados na FIGURA 2.

FIGURA 2 - TEMPO DE DESCARGA X CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO



FONTE: CALIFORNIA HYDROGEN BUSINESS COUNCIL (2015) - Modificado.

Na busca de soluções alternativas de armazenamento que possam suprimir de maneira flexível a capacidade e o tempo de descarga no sistema, o hidrogênio se mostra uma solução promissora (MOORE, 2016), alinhado a necessidade global de soluções renováveis e sem emissão de poluentes.

A oferta interna de energia elétrica brasileira é referência mundial em energias renováveis, principalmente hidráulica. Com o crescimento do consumo de eletricidade, cresceu também recentemente a preocupação com a alta pegada de carbono do setor elétrico. Neste sentido, para suprir essa demanda, a energia solar e eólica vem cumprindo um importante papel. Além disso, o Brasil vem investindo também em diretrizes que fomentam a descentralização da produção de energia elétrica. As energias solar e eólica são por característica primordial recursos energéticos distribuídos (REDs) que apresentam como contrapartida desafios, como por exemplo, a intermitência de fornecimento de energia para o sistema elétrico.

3 OBJETIVOS

Tendo em vista a problemática apresentada, esse trabalho tem por objetivo analisar o potencial de produção e uso do hidrogênio renovável de baixo carbono para geração de energia elétrica. De forma mais específica, a metodologia trata primeiramente do entendimento da eficiência atrelada aos processos de produção do hidrogênio obtido da energia solar via eletrólise para posterior geração de energia

elétrica através de células a combustível. Analisando uma rota específica espera-se avaliar estrategicamente se é possível utilizar a energia elétrica durante períodos de alta disponibilidade de fonte solar e a geração de energia elétrica pelo hidrogênio nos períodos de alta demanda, auxiliando no gerenciamento da curva de carga pelo lado da demanda, contribuindo para uma melhor estabilidade do sistema elétrico como um todo, e mitigando localmente a volatilidade conhecida das energias renováveis.

O viés econômico também será analisado de forma simplificada, analisando principalmente a viabilidade em se utilizar a energia elétrica para produção de hidrogênio em horários fora de ponta, onde as tarifas têm menor custo, para a posterior geração de energia elétrica em horários de ponta, onde a demanda de energia é elevada e, conseqüentemente, as tarifas são mais elevadas.

4 METODOLOGIA

A rota escolhida foi baseada nas tecnologias disponíveis no mercado, levando em consideração sua disponibilidade e eficiência. Na FIGURA 1 é possível entender as principais etapas desse processo. Para desenvolvimento desse trabalho foi considerado a geração solar fotovoltaica, uma vez que esse tipo de ativo pode ser utilizado em pequena e larga escala. Como propõe-se entender a eficiência do processo completo, foram consideradas as etapas de armazenamento em pequena escala e posterior produção de energia através de Célula a Combustível. A etapa de transporte foi desconsiderada uma vez que nesse estudo considerou-se que a energia elétrica é gerada no mesmo local onde o hidrogênio é produzido e fica disponível.

4.1 ELETROLISADORES

A eletrólise é um processo que envolve a divisão de moléculas de água em hidrogênio e oxigênio usando corrente elétrica. Este processo envolve o uso de uma célula eletroquímica constituída de dois eletrodos separados por uma solução eletrolítica ou por uma membrana. Quando uma corrente elétrica é aplicada, as moléculas de água são divididas no cátodo, produzindo gás hidrogênio, enquanto no ânodo ocorre a produção de gás oxigênio.

O custo do processo de eletrólise para a produção de hidrogênio depende de vários fatores, tais como o tipo de tecnologia de eletrólise utilizada, o custo da

eletricidade, o custo da matéria-prima e a escala de produção. Atualmente existem diferentes tipos de eletrolisadores, sendo os dois principais o alcalino e o membrana de troca de prótons (PEM, sigla do inglês para *proton exchange membrane*). Com a evolução das tecnologias dos eletrolisadores e aumento da disponibilidade de energia renovável necessária para a eletrólise, existe uma tendência da redução do custo de produção de hidrogênio ao longo do tempo.

4.1.1 Eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM)

Os eletrolisadores do tipo PEM tem características específicas podendo produzir gás hidrogênio de alta pureza com alta eficiência e emissões mínimas de gases de efeito estufa. Esse modelo de eletrolisador é especialmente atraente quando existe a necessidade da produção de hidrogênio de alta pureza, tais como células combustíveis. Eles operam em pressões e temperatura normalmente menores que os demais modelos disponíveis no mercado o que reduz a necessidade de energia no processo, tornando esse processo mais atraente financeiramente. Embora os eletrolisadores PEM ainda tenham preço elevado no mercado, suas características o tornam aplicáveis para produção de energia.

Os eletrolisadores PEM já atingiram eficiências da ordem de 80% na conversão de energia elétrica para hidrogênio e alguns estudos apontam que esse processo deva atingir entre 82 e 86% antes de 2030 (GLENK, 2019).

4.1.2 Eletrolisadores Alcalinos

Os eletrolisadores alcalinos tem o mesmo princípio de funcionamento do eletrolisador PEM, entretanto utilizando uma solução eletrolítica como meio de transporte de íons. O processo funciona passando uma corrente elétrica através do eletrólito, que faz com que as moléculas de água se dividam em hidrogênio e gás oxigênio. O gás hidrogênio é então coletado no cátodo, enquanto o gás oxigênio é liberado no ânodo.

A eletrólise alcalina também opera com bons níveis de eficiência, normalmente em torno de 70-80%, tendo um custo reduzido de operação. Contudo, apesar desses benefícios, uma grande desvantagem desta tecnologia é a produção de resíduos o que dificulta a utilização em células combustível e acabam gerando um

custo de processamento maior e menor vida útil dos equipamentos, gerando maior manutenção em longo prazo. Esse tipo de operação é amplamente utilizado na produção de hidrogênio quando o foco é utilizar em subprodutos e não diretamente na produção de energia.

4.2 ARMAZENAMENTO

O hidrogênio é uma ótima solução para armazenamento de energia em larga escala, uma vez que é possível armazenar grandes quantidades por um longo período de tempo, conforme apresentado na FIGURA 2, o que flexibiliza sua utilização nos momentos de maior necessidade. Por ter a possibilidade de ser produzido através de energias renováveis se mostra uma ótima solução para enfrentar as mudanças climáticas.

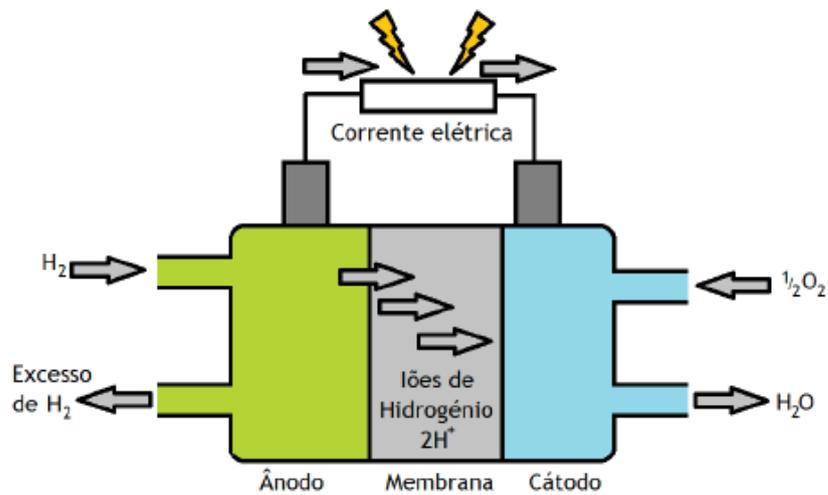
Um dos grandes desafios do processo de armazenamento são os custos elevados e a eficiência, porém com o desenvolvimento de novas tecnologias esse processo vem sofrendo redução significativa de custos. Armazenar energia através do hidrogênio se mostra viável quando comparado com baterias uma vez que os custos de produção das baterias são elevados e não possibilitam armazenamento de grandes quantidades. Atualmente as baterias de lítio conseguem atingir uma eficiência de 83% em todo o ciclo, da entrada até a saída da energia, que são menores se comparado a valores de eficiência atingidos no armazenamento de energia pelo hidrogênio que são de aproximadamente 90% (PELLOW et al., 2015).

4.3 CÉLULAS COMBUSTÍVEL

As células a combustível são dispositivos que produzem energia e calor, através de um processo eletroquímico sem a necessidade de combustão. Essa tecnologia é considerada umas das mais promissoras na descarbonização de operações, já que podem ser utilizadas em diferentes setores como transportes e geração de energia estacionária.

As células combustíveis tem um princípio de funcionamento simples, como pode ser visto na FIGURA 3, o hidrogênio que é injetado no equipamento passa por uma membrana onde é combinado com o oxigênio, e através da troca de elétrons dessa reação química é produzida uma corrente elétrica.

FIGURA 3 - Esquema simplificado de uma célula combustível.



FONTE: LEANDRO, 2022.

4.3.1 Célula a Combustível PEM

As células a combustível PEM oferecem várias vantagens se comparadas a outros modelos, incluindo alta eficiência, vida útil e baixa emissões, o que as fazem especialmente vantajosas em soluções onde a massa e a mobilidade são importantes, como o setor de transportes. Elas atuam em temperaturas reduzidas o que reduz a necessidade de isolamentos especiais e resfriamento. Contudo elas também têm algumas desvantagens como alta sensibilidade a impurezas e alto custo de alguns componentes. Apesar dos desafios a tecnologia vem avançando rapidamente e já é possível ver uma previsão da redução desses custos em um futuro breve.

Com avanço da tecnologia a célula a combustível vem atingindo valores cada vez maiores de eficiência, como potencial melhora nos próximos anos, se tornando ainda mais atrativas. Como referência para próximas etapas esse trabalho irá utilizar 47% de eficiência para esse tipo de célula combustível (PELLOW et al., 2015).

4.4 ANÁLISE DE MERCADO

Como referência para esse estudo será utilizado um local situado no estado do Paraná. O mercado de energia elétrica paranaense é regulamentado pela

Companhia Paranaense de Energia (COPEL), atuando na transmissão, geração e distribuição.

Na COPEL, assim como nas demais concessionárias de energia elétrica, os consumidores são classificados em diferentes categorias, dependendo do tipo de consumo (residencial, industrial, comercial ou rural) e de acordo com o nível de tensão e volume de energia consumido. O estudo de caso desse trabalho está classificado na categoria “A4” que é composto por consumidores com tensão acima de 2.3kV e inferior a 25kV.

Os consumidores do grupo A4 podem optar por diferentes modalidades tarifárias dentro do Ambiente de Contratação Regulado, por exemplo a modalidade azul, onde o valor da tarifa de demanda e de energia difere entre os horários de ponta e fora de ponta. É dentro deste escopo que as avaliações do presente trabalho foram delimitadas.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados nesse trabalho têm como base as referências apresentadas nos capítulos anteriores, com as devidas adaptações para o mercado de energia do Estado do Paraná. É importante ressaltar que na produção do hidrogênio as variações do valor da energia e o custo de investimento dos equipamentos tem valor significativo e estão diretamente ligados a viabilidade ou não da rota proposta.

No que tange a eficiência do processo apresentado na FIGURA 1, que é a produção de hidrogênio renovável de baixo carbono, seu armazenamento e sua posterior utilização na produção de energia elétrica novamente. As eficiências apresentadas anteriormente podem ser encontradas resumidamente na TABELA 2.

TABELA 2 – Eficiências dos processos apresentados, e suas referências.

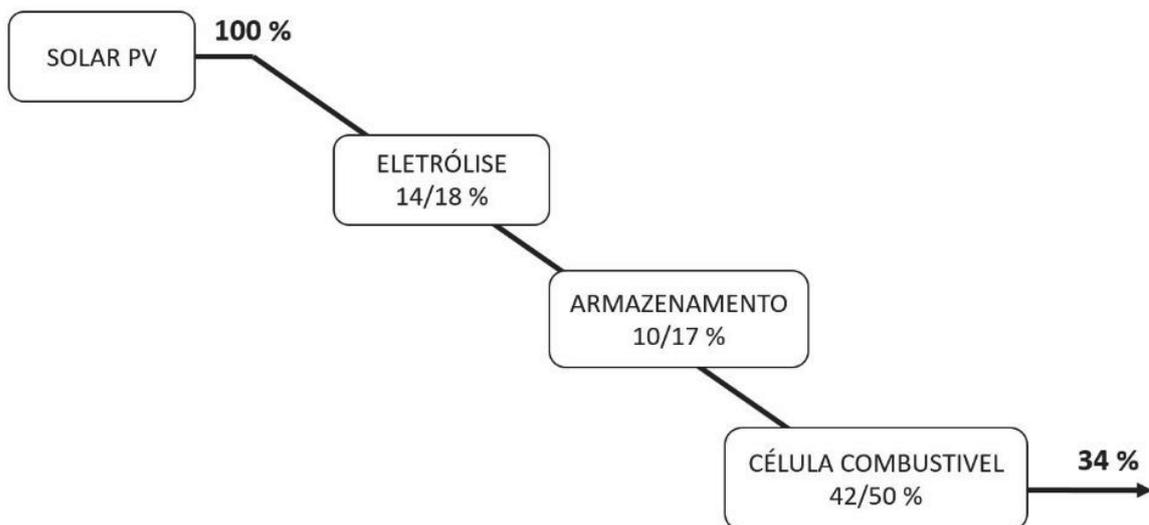
Processo	Eficiência	Referência
Eletrólise (PEM)	82 até 86 %	GLENK, 2019
Armazenamento	90%	PELLOW et al., 2015
Célula combustível (PEM)	47%	PELLOW et al., 2015

FONTE: O autor (2023).

É importante ressaltar que a eficiência dos processos envolvidos na rota escolhida pode variar, já que novas tecnologias são lançadas constantemente e as condições específicas de cada local, como por exemplo a incidência de irradiação solar média, não são as mesmas.

A FIGURA 4 foi construída demonstrando os intervalos e as perdas de eficiência envolvidas em cada etapa do processo. Através da soma das eficiências médias perdidas em cada etapa do processo, foi encontrada uma eficiência média global para esta rota de 34%, isso significa que de toda energia elétrica injetada no eletrolisador no início do processo pela fonte solar fotovoltaica (desconsideradas as perdas do próprio processo de conversão do sistema fotovoltaico), apenas 34% retorna como energia elétrica novamente após armazenamento na forma de hidrogênio e reconversão via células a combustível. Já existem alguns casos onde a eficiência para processos similares, porém utilizando alguns equipamentos diferentes, foram atingidas perdas de 60%, sendo assim um retorno de 40% em forma de energia no final do processo (SABRINA, 2022).

FIGURA 4 - Perda de eficiência nas etapas da rota em estudo.



FONTE: O autor (2023).

Mesmo analisando o melhor cenário possível, ainda existe uma diferença grande no armazenamento de energia através do hidrogênio se comparado a outros

processos já aplicados em escala global como baterias, ar comprimido e bombeamento com diferença de nível (MOORE, 2016).

Como já apresentado anteriormente a produção de hidrogênio renovável de baixo carbono é mais cara do que o proveniente de fontes não renováveis (GUNTHER e STEFAN, 2019). Os maiores custos são: custo da eletricidade, eficiência global relativamente baixa do processo e, principalmente alto investimento de capital, sendo os custos dos eletrolisadores e as células a combustível ainda bastante elevados no mercado.

De acordo com Sabrina e Drielli (2022) que analisaram uma rota similar a proposta por esse trabalho, onde somente é produzido hidrogênio durante períodos de baixa demanda de energia, as plantas de produção de hidrogênio verde com capacidade de produção de 13 até 95 MW levam na média 16 anos para se pagarem, quando o mesmo é vendido como produto final.

Quando analisada a mesma planta e adicionados os custos de capital e manutenção dos equipamentos necessários para produção de energia, conforme a rota proposta por esse trabalho, as taxas de retorno se tornam negativas, uma vez que os equipamentos atingem a vida útil antes de se pagarem.

Já quando a mesma planta é utilizada durante todo seu período para produção de hidrogênio, independente dos períodos de alta ou baixa demanda do sistema elétrico, o período de retorno investimento é de no máximo 5 anos para mesmo caso analisado anteriormente.

Para entender o comportamento do sistema proposto em uma planta de geração distribuída, onde conseqüentemente se utilizam componentes menores e mais acessíveis, foi utilizada a ferramenta HYJACK, que consiste em um banco de dados online com diversos componentes para produção de hidrogênio.

O sistema analisado consiste em uma planta fotovoltaica de pequeno porte localizada no estado do Paraná com as seguintes características: Capacidade instalada de 1000KWp, tempo médio de geração de energia e de hidrogênio de 6 horas e célula de combustível em operação durante 3 horas para geração de energia novamente, durante período de maior tarifa na operadora local. Foram considerados os mesmos tempos de vida útil dos equipamentos e custos de operação (OPEX) que o estudo realizado por Sabrina e Drielli (2022), tendo dessa forma um comparativo de mesma igualdade, sendo esses valores de 20 anos e de 2% do custo de despesas de capital (CAPEX) por mês para manutenção.

A rota proposta por esse trabalho, e simulada na ferramenta HYJACK foi planejada para operar dedicada para produção de hidrogênio e posterior produção de energia nas horas de maior demanda do sistema. Considerando à receita anual e o investimento de capital somados com os custos de operação e manutenção o sistema proposto teria uma previsão de retorno mais longa que a vida útil dos equipamentos, inviabilizando nesse momento à rota proposta, isso se deve principalmente ao alto valor do eletrolisado e da célula combustível, que somados representam aproximadamente 80% do CAPEX e ao fato dos equipamentos terem maior custo por MW instalado em projetos de pequeno porte.

Importante ressaltar que o retorno da rota proposta está diretamente relacionado com o valor da comercialização da energia, o mesmo caso pode ter retornos significativamente diferentes estados e ainda mais significativa em outros países onde as variações e valor médio do preço da energia são maiores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando resultados apresentados é possível concluir que a utilização do hidrogênio de baixo carbono como bateria não é viável atualmente no Brasil, isso se dá principalmente ao custo alto de capital dos eletrolisadores e das células combustíveis, esses fatores em conjunto com a baixa eficiência dos equipamentos acabam elevando o tempo de retorno do investimento. De toda forma o Brasil se mostra extremamente competitivo quando o assunto é a produção do hidrogênio de baixo carbono, uma vez que o mercado, cada vez mais focado na descarbonização das operações, tem alto interesse nesse produto.

Mesmo com valor elevado de produção o hidrogênio de baixo carbono tem se destacado como uma alternativa promissora para a transição energética, uma vez que o produto proveniente de energia renovável é uma solução viável para substituir o de origem não-renovável (gás natural). Por poder ser armazenado e transportado o mesmo tem aplicações em diversos setores como transporte e indústria, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação das mudanças climáticas.

No mesmo caminho é possível concluir que o rota apresentada está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações

Unidas, agindo contra a mudança global do clima, promovendo energia limpa e com foco no crescimento sustentável da indústria.

O hidrogênio também é de grande importância para o fortalecimento da economia brasileira, o alto valor agregado do hidrogênio renovável de baixo carbono para a indústria mundial, vem atraindo diversos investimentos para o Brasil. Com o aumento dos investimentos em tecnologia e inovação, espera-se que a maturidade tecnológica e eficiência dos equipamentos de conversão cresçam no mesmo ritmo, dessa forma pode ser possível que a rota estudada se torne viável com o passar dos anos, o que reafirma a vantagem estratégica em soluções voltadas para o hidrogênio.

Por fim, mas não menos importante, mesmo com valores elevados a utilização do hidrogênio com forma de incremento da despachabilidade das energias renováveis, reduzindo gastos indiretos como superdimensionamento de redes de transmissão e a necessidade da utilização de fontes de produção de energia poluentes durante horários de pico dentro no Sistema Integrado Nacional, aproveitando a energia que muitas vezes é descartada durante certos períodos para gerar um produto com tamanha importância na atualidade.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio 2021**. Programa Nacional do Hidrogênio – Propostas e Diretrizes. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

BADWAL, S.P.S., GIDDEY, S. & CIACCHI, F.T. **Hydrogen and oxygen generation with polymer electrolyte membrane (PEM)-based electrolytic technology 2016**. Ionics 12, 7–14 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11581-006-0002-x>

CALIFORNIA HYDROGEN BUSINESS COUNCIL. **Power-to-Gas: The Case for Hydrogen White Paper 2015**. Disponível em: <https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/2018/01/CHBC-Hydrogen-Energy-Storage-White-Paper-FINAL.pdf>. Acesso: 01/04/2023.

IRENA, **Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook**; International Renewable Energy Agency (IRENA): Abu Dhabi, UAE, 2015.

MOORE, Jason. SHABANI Bahman. **A Critical Study of Stationary Energy Storage Policies in Australia in an International Context: The Role of Hydrogen and Battery Technologies 2016**.

GLENK, Gunther. REICHELSTEIN, Stefan. **Economics of converting renewable power to hydrogen 2019**. Nature Energy Vol 4 March 2019 216-222.

PELLOW, M.A. EMMOTT, C.J.M. BARNHART, C.J. BENSON, S.M. **Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis 2015**. Energy & Environmental Science.

VEIGA, E. T. Leandro. **Hidrogénio Verde e sua Implementação no Sistema Elétrico Nacional 2022**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Major Energia.

GLENK, Gunther. REICHELSTEIN, Stefan. **Economics of converting renewable power to hydrogen. Nat Energy 4, 216–222 (2019)**. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>

MACEDO, F. Sabrina. PEYERL, Drielli. **Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector 2022**. International Journal of Hydrogen Energy 47 (2022) 10460-10473.