

# Potencial de oferta do hidrogênio como vetor energético no Brasil com base na análise da técnica de dinâmica de sistemas

Hilquias Silva Epalanga Chiquete  
 Centro de Excelência em Energia e  
 Sistemas de Potência-(CEESP)  
 Universidade Federal de Santa Maria  
 Santa Maria, Brasil  
 hilquias1.hds@gmail.com

Wilson Omar Ramos Parqui  
 Centro de Excelência em Energia e  
 Sistemas de Potência-(CEESP)  
 Universidade Federal de Santa Maria  
 Santa Maria, Brasil  
 wilson.rp.27@gmail.com

Diego Dorneles Goulart  
 Centro de Excelência em Energia e  
 Sistemas de Potência-(CEESP)  
 Universidade Federal de Santa Maria  
 Santa Maria, Brasil  
 diego.goulart@prof.santamaria.rs.gov.br

Mauricio Sperandio  
 Centro de Excelência em Energia e  
 Sistemas de Potência-(CEESP)  
 Universidade Federal de Santa Maria  
 Santa Maria, Brasil  
 mauricio.sperandio@ufsm.br

**Abstract** — In this work, the projection of hydrogen supply as an energy vector for integration into electrical systems is explored. The Bass model with variable innovation coefficients is used to design different green hydrogen (H<sub>2</sub>V) production curves in Brazil. And the system dynamics technique is applied to the model. The results show that in the Power-to-Power model, regardless of efficiency, the process requires more energy than that stored as H<sub>2</sub>V. Therefore, the careful use of electrical energy for storage in H<sub>2</sub>V is essential, since unlike other primary energy sources electrical energy is not freely found in nature. As for the projections, with the conservative growth and likely to occur the supply of H<sub>2</sub>V in Brazil in 10 years (2033) would represent about 10.64% of the global demand that will be about 240.7 million m<sup>3</sup> approximately.

**Key words** — Hydrogen; Projection; Bass model; Storage; Systems Dynamics.

## I. INTRODUÇÃO

O uso do hidrogênio (H<sub>2</sub>) como vetor energético tem sido amplamente discutido, pois é considerado um dos elementos mais importantes para a transição energética e sustentabilidade das matrizes energéticas. Devido ao seu potencial como combustível limpo e renovável, quando produzido de fontes limpas ou com tecnologia de captura de carbono (CCS) do inglês *capture storage system* [1], [2].

A integração do uso do H<sub>2</sub> aos sistemas elétricos potencializa o aproveitamento das fontes renováveis. Porém, sendo uma tecnologia em desenvolvimento, atualmente é cara de produzir, armazenar e é altamente inflamável se não for manuseado corretamente, sua implementação em larga escala enfrenta ainda desafios [1], [3].

Contudo, a proliferação da difusão de inovações das fontes alternativas de energia e as recentes ondas de inserção dos veículos elétricos no mercado global intensificaram as pesquisas e investimentos em vetores energéticos focados em tecnologias de armazenamento. Destas, a produção do hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) é o destaque, para que no futuro próximo seja possível interligar essa produção aos sistema elétrico de potência (SEP)[4]–[6].

A produção de H<sub>2</sub> a partir do SEP é chamada de hidrogênio amarelo ou azul em alguns contextos [7], [8]. Entretanto, para

o SEP brasileiro, com uma matriz altamente renovável, este H<sub>2</sub> é enquadrado neste trabalho como H<sub>2</sub>V, e sua implementação aumentaria a diversidade energética, confiabilidade, eficiência e flexibilidade do sistema.

### A. Sistema elétrico de potência

O sistema elétrico de potência é a rede responsável por transmitir a energia elétrica da fonte geradora até as unidades consumidoras, cuja confiabilidade geralmente é avaliada para quatro Níveis hierárquicos (NH) sendo: NH0, NH1, NH2 e NH3.

Em que, NH0 é a disponibilidade de recurso primário, NH1 relação entre a geração e disponibilidade da fonte, NH2 é a fase intermediária geralmente a mais estudada, por fim o NH3 estuda o planejamento da distribuição. Tradicionalmente, o armazenamento de energia era pensado maiormente no NH0 e NH1 que compreende no armazenamento de recursos energéticos da fonte, como é o caso dos reservatórios de água NH0 e no armazenamento da energia já gerada NH1 e NH3 em pequenas escalas [9].

O planejamento tradicional tornou-se obsoleto frente ao rápido crescimento da geração renovável e intermitente, que introduziu uma elevada carga de geração necessitando de armazenamento para uso posteriores [2], [10].

Logo, o uso do H<sub>2</sub> como vetor de armazenamento energético irá potencializar o aproveitamento destas fontes distribuídas e intermitentes nos sistemas [2], [3], [11]. Visto que, ao contrário dos SEP tradicionais de fluxo de geração unidirecionais, hoje as tecnologias de armazenamento precisam e devem ser aplicadas em qualquer NH do SEP, e o H<sub>2</sub> como vetor de energia é escalável com possibilidades de usos diversos em qualquer nível do sistema ou fora dele.

As principais vantagens do H<sub>2</sub>V no atual contexto da transição dos SEP é que, as tecnologias envolvidas dessa poderão operar como unidades despacháveis para amortização de carga em horários de pico, melhoria do fator da potência, suporte da carga em momentos de standby, operar em paralelo com geradores distribuídos, facilitar a integração das micro redes e, o principal de tudo, escalonar o aproveitamento da

geração solar fotovoltaica e geração eólica, cuja geração divergi dos horários de maior demanda [4], [5], [10].

### B. Hidrogênio como vetor energético

O processo de produção do hidrogênio pode ser resumido como não renovável quando obtido a partir de fontes fósseis e renovável quando obtido da biomassa ou da água. No entanto, na produção a partir de fontes fósseis, podem ser adotadas técnicas de CCS para torná-lo limpo. E para diferenciar, é utilizado um sistema de código de cores para designar os diferentes métodos de produção, sendo as principais: H<sub>2</sub> Verde, H<sub>2</sub> Azul (produção com CCS) e H<sub>2</sub> Cinza (sem CCS) [1], [6].

Estima-se que, em um futuro próximo, cerca de 25% de H<sub>2</sub> poderia ser comercializado globalmente, com aproximadamente 70% sendo utilizado como matéria-prima e combustível, em vez de ser reconvertido após o transporte, a fim de evitar perdas de transformação [7].

Entretanto, é necessário garantir que esse seja produzido corretamente, pois atualmente o H<sub>2</sub> Cinza é a forma mais comum de produção respondendo por mais de 95%. Isso ocorre devido ao seu processo mais econômico, produzido a partir da reforma a vapor do metano do gás natural ou da gaseificação do carvão, o que resulta numa pegada de CO<sub>2</sub> substancial e não compatível com os acordos de desenvolvimento de emissões líquidas nulas e o plano de redução de 1.5°C até 2050 da geopolítica Internacional [1], [6].

Devidos aos desafios envolta o uso massivo do H<sub>2</sub> como vetor energético pode demorar um pouco, pois a produção de H<sub>2</sub>V na atualidade não é lucrativa. Ele pode ser produzido por eletrólise para ser armazenado e posteriormente ré eletrificado, mas essa transformação é menos eficiente em comparação a outras tecnologias de armazenamento. Ainda assim, devido à sua capacidade de armazenamento maior e escalável em comparação com baterias, esse está ganhando popularidade e espaço no mercado global [5], [7].

Ao analisar o mercado Europeu os autores [12] em seu trabalho avaliaram dois modelos de negócios para usos de H<sub>2</sub> nas modalidades xH<sub>2</sub>-to-Power e Power-to-xH<sub>2</sub>. Os resultados mostram que, com a implicação dos altos preços de energia no mercado atacadista, os casos de negócios xH<sub>2</sub>-to-Power já podem ser lucrativos. Todavia, devido à produção de H<sub>2</sub>V ser cara, os modelos de negócios Power-to-xH<sub>2</sub> no momento têm valores presentes líquidos (VPL) negativos.

Já os autores em [13] ao analisar o mercado alemão, fazendo a projeção de H<sub>2</sub> com foco no custo dos eletrolisadores concluem que essas tecnologia só serão lucrativos em 2037. Contudo, em termos energéticos os eletrolisadores irão reduzir a volatilidade dos preços de eletricidade, pois no contexto atual, que a demanda global de energia é quase 80% suprido por combustíveis fósseis sendo essas reservas altamente concentradas em alguns países, cujo os 5 principais países produtores detêm cerca de 62% a 65% dessas reservas de petróleo e gás, quanto da maturação da utilização do H<sub>2</sub> proporcionará mais opções [2].

Para isso é necessário criar políticas mais abrangentes com investimentos que mensuram as externalidades, conforme discutido em [14] ao concluírem que, muitas das soluções de econômica de H<sub>2</sub>V ainda não provaram ser economicamente lucrativas. No entanto, poderiam ser se os projetos de investimento fossem considerados de uma perspectiva mais

ampla não apenas a nível de empresa e perspectiva puramente econômica. Este facto justifica o porquê o H<sub>2</sub>V ainda não é popularmente difundido como vetor energético.

O mercado provável do H<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>V é discutido em [6] nesse são projetados quatro subdivisões principais de mercado futuro: o mercado para produção, transporte, transformação e usos finais. Investindo em cada um destes mercados, vários países desenvolvidos e em desenvolvimento, principalmente os da cúpula do G7, apresentaram planos para recuperação da economia estabilizada pelo COVID-19, e liderar a indústria em conjunto com a redução das emissões de carbono.

No caso do Brasil, o país reúne condições favoráveis de explorar o mercado para produção, enquanto consolida outras possibilidades de usos finais. Além disso, já possui infraestrutura desenvolvida para o uso de biocombustíveis, como etanol, base para a produção de H<sub>2</sub> Azul. Assim, é fundamental priorizar o desenvolvimento do mercado nacional porque as estimativas indicam que até 2050, 90% da geração de energia será de fontes renováveis, com energia eólica e solar representando 63% do total [2], [7], [11]

Deste modo, o objetivo principal do trabalho é avaliar a projeção da disponibilidade de oferta do H<sub>2</sub>V no Brasil, com base no coeficiente de inovação, e calcular qual seria a energia necessária advinda da rede para essa produção, avaliando também o quantitativo de energia que retornaria a rede caso a energia armazenada no H<sub>2</sub> fosse reconvertida para a rede. A projeção é realizada utilizando o modelo de Bass, para difusão de inovações com a auxílio da técnica de dinâmica de sistemas (DS).

Por fim, é usado diagrama de laços causais da técnica de DS para análise das principais perspectivas, desafios de formação de políticas para inserção do H<sub>2</sub>V como vetor energético e combustível do futuro.

## II. DESENVOLVIMENTO PRÁTICO

O trabalho é modelado com base na modelagem de simulação da DS, que é uma técnica estabelecida para análise de sistemas complexos. É feita uma avaliação usando diagrama de laços causais para análise das principais perspectivas, desafios atuais e futuros para inserção do H<sub>2</sub>V.

As projeções do H<sub>2</sub>V são realizadas usando o modelo matemático para projeção de difusão de inovações de Bass [15], cuja base está na teoria de difusão de inovações de Roger [16]. A Fig.1, apresenta o modelo de difusão de Bass em DS.

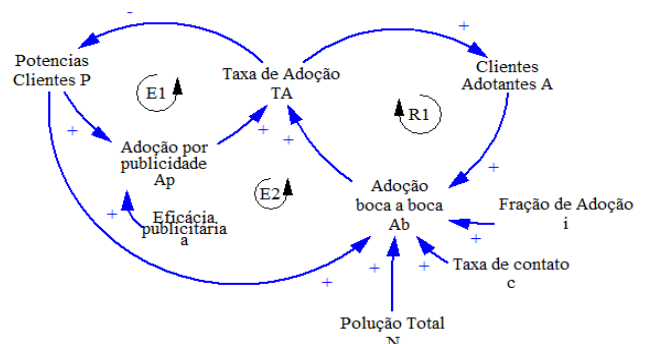


Fig.1. Modelo de difusão de inovações na visão de Dinâmica de sistemas (Fonte: Adaptado de Sterman [17])

Na Fig.1, a taxa de adoção (TA) é composta pela adoção por publicidade (Ap), representando os inovadores, e a adoção por propaganda boca a boca (Ab), que reflete os imitadores de

uma inovação. A *TA* influencia os Potenciais Adotantes (*P*) e abastece os Adotantes (*A*). Os laços *E1* e *E2* são laços de equilíbrio, mostrando que a *TA* por *Ap* e a interação entre *Ap* e *Ab* são loops de equilíbrio do mercado potencial em algum instante do tempo. Os Potenciais Adotantes ficam escassos devido à influência da *TA*, o que leva ao término dos inovadores (*E1*) e, posteriormente, à saturação do mercado (*E2*). Portanto, os sistemas não crescem indefinidamente. Por outro lado, enquanto houver uma *TA*, haverá população de adotantes, representados pelo laço de Reforço *R1*.

Na equação (1) é apresentada a *TA* em função do tempo. A modelagem matemática completa pode ser encontrada em [18].

$$TA(t) = Ap + Ab = a \cdot P + \frac{c \cdot i \cdot P \cdot A}{N} \quad (1)$$

Em (1), *c* é a taxa de contato, *i* fração de adoção, ou seja, é a probabilidade de adoção dado um contato com um adotante, *N* é a quantidade da população total acumulada no sistema. Sterman em [17] realça, qualquer quantidade em crescimento pode ser considerada uma população que cresce em um nicho com uma determinada capacidade de carga. No caso de inovações resultara em uma curva de crescimento acumulado em forma de S aplicada a processos, crescimento populacional ou quantidade de um mercado escalável, neste trabalho o princípio é aplicado ao gás hidrogênio.

A modelagem matemática em (1) para o diagrama do modelo de Bass Fig.1, é pautada em um planejamento Top-Down ou macroeconômico, pois o H2V por ser uma inovação disruptiva vários de seus aspectos microeconômicos e usos finais ainda são especulativos e não podem ser mensurados com clareza nesta fase embrionária. Razão pela qual a abordagem simplificada Top-Down é escolhida, pois caso fosse adotada a estrutura Botton-up necessitar-se-ia de uma quantidade de dados refinados dada sua preocupação, de oferta e destinação de uso finais que não é o foco deste trabalho, sendo deixado como uma oportunidade a explorar em estudos futuros [19].

A estrutura completa da metodologia do trabalho é desenvolvida conforme Fig.2, primeiro projeta-se a demanda de H2V que poderia ser ofertado em metros cúbicos, esta etapa é realizada usando o modelo de Bass.

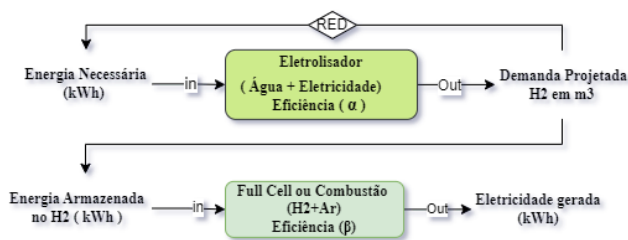


Fig.2. Estrutura da metodologia do trabalho.

Com a demanda projetada, calcula-se a energia necessária, para a produção dessa quantidade de H2V, considerando a eficiência média de tecnologias de Eletrolisadores, e por fim, calcula-se a energia que seria gerada caso esse hidrogênio fosse reconvertido em energia considerando uma célula de combustível ou um processo de combustão.

As etapas da Fig.2, resumem os cálculos para a produção de H<sub>2</sub> Power-to-Power. O processo começa com o cálculo Power-to-xH<sub>2</sub>, que usa eletrolisadores para produzir H<sub>2</sub>, em

seguida este é convertido em eletricidade por meio de uma célula de combustível ou combustão em uma modelagem xH<sub>2</sub>-to-Power.

A equação (2) calcula a energia necessário para produtor a demanda de H2V projetado em (1) e, (3) calcula a energia teórica armazenada nessa quantidade de H<sub>2</sub> disponível.

$$E_n = m_{H2} * PCi / \delta \quad (2)$$

$$E_{ar} = m_{H2} * PCi \quad (3)$$

Em que, *E<sub>n</sub>* (kWh) é a Energia necessária, *δ* é a eficiência de conversão pela tecnologia escolhida, *E<sub>ar</sub>* (kWh) é a energia teórica armazenada, *PCi* (kWh/kg) é o poder calorífico inferior do hidrogênio que é de aproximadamente 33,33kWh/kg e *m<sub>H2</sub>* (kg) é a massa resultante da conversão do volume total (*V<sub>H2</sub>* em m<sup>3</sup>) pelo equivalente em kg de H<sub>2</sub> dada em (4) dividido pela densidade (*ρ*) em kg/m<sup>3</sup>:

$$V_{H2} = \frac{m_{H2}}{\rho} \quad (4)$$

Já a energia elétrica gerada *E<sub>g</sub>* é dada em (5) onde *γ* é o coeficiente de conversão considerando uma célula de combustível ou tecnologias de combustão.

$$E_g = E_{ar} * \gamma \quad (5)$$

A eficiência global do sistema é calculada em (6) considerando que a produção Power-to-xH<sub>2</sub> praticamente consiste em usar a energia da rede elétrica para produzir H<sub>2</sub> com eletrolisadores, após, este H<sub>2</sub> é reconvertido em eletricidade em uma modelagem xH<sub>2</sub>-to-Power, usando uma célula de combustíveis ou combustão.

$$\varphi = \alpha * \beta \quad (6)$$

Em que, *φ* é Eficiência Global, *α* Eficiência Power-to-xH<sub>2</sub>, e *β* é a eficiência xH<sub>2</sub>-to-Power, obtidas na (7) e (8).

$$\alpha = \frac{E_{ar}}{E_n} \times 100 \quad (7)$$

$$\beta = \frac{E_g}{E_{ar}} \times 100 \quad (8)$$

Conforme referido, a modelagem adotada é do tipo Top-Down, que é uma abordagem agregada. Portanto, as equações foram apresentadas de forma agregada. Em contrapartida, em uma modelagem desagregada, seria necessário calcular as perdas do processo de transporte, armazenamento, entre outras etapas, o que se compreende poderia afetar a eficiência global do sistema, bem como o preço final da energia produzida.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No estudo de caso, foi realizada uma projeção de difusão de 10 anos da quantidade de H2V em metros cúbicos que o Brasil poderia oferecer ao mercado. O mercado potencial total foi estabelecido com base na demanda global de hidrogênio observado em 2021-2022, a qual foi de 94 milhões de m<sup>3</sup>, conforme divulgado pelo IEA [1].

Os parâmetros de entrada utilizados são mostrados na Tabela 1, com as informações relacionadas a diferentes perfis do coeficiente de inovação (*p*) que caracteriza a influência externa do mercado pela publicidade e marketing no intuito de incentivar a adoção do H2V. Selecionou-se cinco interações (*p<sub>A</sub>*, *p<sub>B</sub>*, *p<sub>C</sub>*, *p<sub>D</sub>* e *p<sub>E</sub>*) ao longo dos 10 anos.

Tabela 1. Parametros de entrada

Tempo (Anos)	$q$	$A$	$B$	$P$ $C$	$D$	$E$
10	0,53	0,0010	0,007	0,013	0,019	0,025

A Fig. 3 mostra o modelo de Bass implementado no software de simulação. Ele baseia-se na ideia de que a adoção de uma inovação é influenciada por dois fatores: A influência dos inovadores ( $p$ -inovação) os primeiros a adotar imediatamente, mesmo sem muita informação ou experiência, por enquanto é a fase em que se encontra a demanda por H2V. E a influência dos imitadores ( $q$ -imitação), onde “ $q$ ” é a constante inicial dos imitadores, representando a fração de adoção, definido conforme Tabela 1.

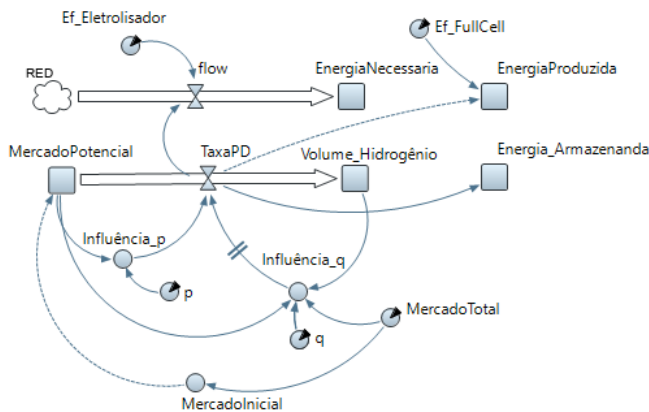


Fig. 3. Modelo de Bass para difusão de inovações na visão de DS.

Para simulação foi considerado que o potencial tecnológico de produção não seja uma barreira para o mercado, então a difusão seria influenciada maioritariamente pelo coeficiente de inovação (influência externa) por essa razão a variação foi feita apenas para o coeficiente de inovação ( $p$ ) variando de 0,001 a 0,025 conforme Tabela 1, que é tido como um valor médio para tecnologias com alto potencial de crescimento, na literatura  $p$  varia de 0,00007 a 0,03 [18], [20].

No que diz respeito ao coeficiente de imitação ( $q=0,53$ ), pode-se considerá-lo conservador, uma vez que, na era da informação em que vivemos, a disseminação da informação ocorre com uma velocidade cada vez maior. Além disso, tecnologias emergentes, como os sistemas fotovoltaicos, têm exibido coeficientes  $q$  superiores a 0,7 chegando a quase 1, sendo o valor mínimo 0,38, conforme mostra a literatura [18], [20].

A difusão de inovações nos primeiros anos é majoritariamente liderada por agentes inovadores. Portanto, pode-se presumir que o mercado de H<sub>2</sub> nos próximos anos terá um comportamento semelhante. Um fato relevante é que, de acordo com estudos de [12], a produção de H<sub>2</sub>V ainda apresenta um Valor Presente Líquido (VPL) negativo, indicando que apenas agentes de caráter inovador estariam aptos a aderir.

Portanto, as projeções realizadas estão sujeitas, em grande parte, às influências externas, com uma influência interna de alcance reduzido. A simulação do modelo foi feita utilizando o software AnyLogic®, e os resultados das projeções são plotadas na Fig. 4, que apresenta a quantidade de H<sub>2</sub>V projetada para oferta, o armazenamento e a quantidade de energia necessária para essa produção em GWh.

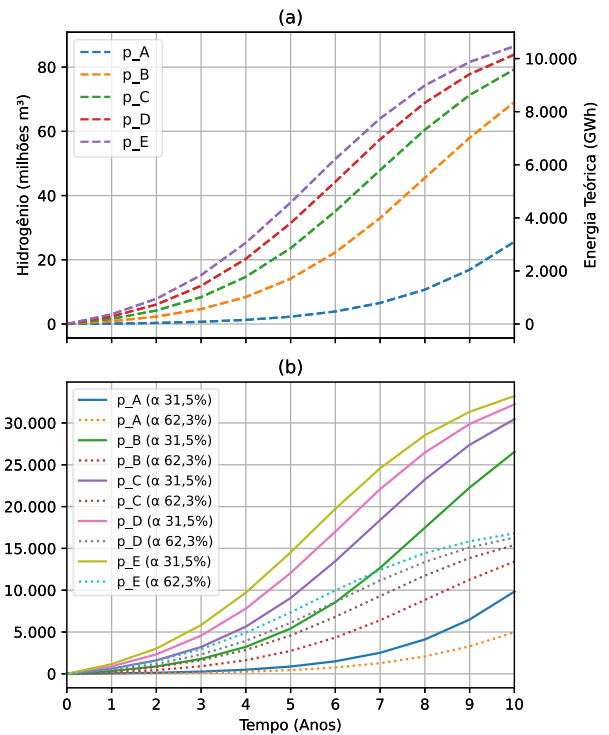


Fig. 4.(a) Projeção da quantidade de Hidrogênio Produzido, e no eixo secundário a Energia Teórica Armazenada (b) energia necessária Eletrólise com eficiência de 31,5% e 62,3%..

Tendo determinado, a quantidade de Hidrogênio conforme apresentado na Fig. 4 foi determinado a quantidade de Energia necessária para produção dessa oferta de Hidrogênio.

Os resultados na Fig. 4 apontam claramente que, independentemente da eficiência (seja 31,5% ou 62,3%) aplicada à eletrólise, a quantidade de energia demandada ou consumida no processo excede a energia teórica que será armazenada na forma de hidrogênio. Isso destaca a necessidade de um uso criterioso da energia elétrica para armazenar H<sub>2</sub>. Pois, ao contrário de outras fontes primárias de energia, a eletricidade não é encontrada livremente na natureza, sendo imprescindível produzi-la previamente. Deste modo, é crucial considerar as implicações e a eficiência na utilização da energia elétrica como meio de armazenar H<sub>2</sub>.

Contudo, se essa energia for produzida quando se tem altas produções de energia e ausência de carga, como por exemplo, quando há excesso de geração em centrais de energia eólica pela impossibilidade de estocar o vento que é um recurso primário renovável e abundante na natureza pode-se optar em armazenar a energia elétrica gerada destas fontes de forma estratégica.

Prosseguindo com as análises, conforme resultados das projeções temos que a oferta de H<sub>2</sub>V em 10 anos seria: No caso  $p_A$  25,6 milhões m<sup>3</sup>, caso  $p_B$  é 69,1 milhões m<sup>3</sup>, caso  $p_C$  é 79,3 milhões m<sup>3</sup>, caso  $p_D$  é 83,9 milhões m<sup>3</sup> e no caso  $p_E$  é de 86,5 milhões de m<sup>3</sup>. Considerando que a demanda global foi 94 milhões de m<sup>3</sup> (2021-2022), e esta cresce a uma taxa constante de 8,15% a.a IEA [1]. teríamos em 2027 150,4 milhões, em 2030 190,3 milhões e em 2033 240,7 milhões de m<sup>3</sup> de hidrogênio.

Neste ritmo de crescimento, se tomarmos o cenário  $p_A$  que é o mais conservador e provável, a oferta de H<sub>2</sub>V no Brasil em 10 anos (2033) representaria cerca de 10,64% da

demanda global estimada em 240,7 milhões de metros cúbicos resumido na Tabela 2.

Tabela 2. Cenários de suprimento de Hidrogênio vs demanda global

Caso	Suprimento da Demanda global		
	2027	2030	2033
$p_A$	0,85%	4,35%	10,64%
$p_B$	5,58%	21,94%	28,71%
$p_C$	9,77%	31,85%	32,95%
$p_D$	13,50%	38,23%	34,86%
$p_E$	16,82%	42,55%	35,94%

A Tabela 2 representa as projeções da oferta do H<sub>2</sub> para os diferentes casos ( $p_A, p_B, p_C, p_D, p_E$ ) em três períodos futuros: 2027, 2030 e 2033. Mostrando para cada anos o equivalente suprido quando comparado ao cenário global. A produção futura é de 25,6 milhões de metros cúbicos se esta demanda for transposta para cada ano corresponderia a 0,85% da demanda global em 2027, 4,35% em 2030 e 10,64% em 2033. O mesmo padrão se aplica aos outros casos ( $p_B, p_C, p_D$  e  $p_E$ ) com suas respectivas produções e projeções de demanda global nos períodos projetados.

Na segunda parte da simulação, ao considerar a reconversão do H<sub>2</sub> em eletricidade Fig. 5, a eficiência global é afetada pelas diferentes etapas do processo. Uma célula de combustível com eficiência média de 50% e processo de eletrólise a 31,5% e 62,3% resultariam em uma eficiência global aproximada de 15,75% e 31,15%, quase o dobro. Por outro lado, ao queimar esse H<sub>2</sub> diretamente, em um processo de eficiência de 40%, a eficiência global cairia para 12,6% e 24,92%, respectivamente.

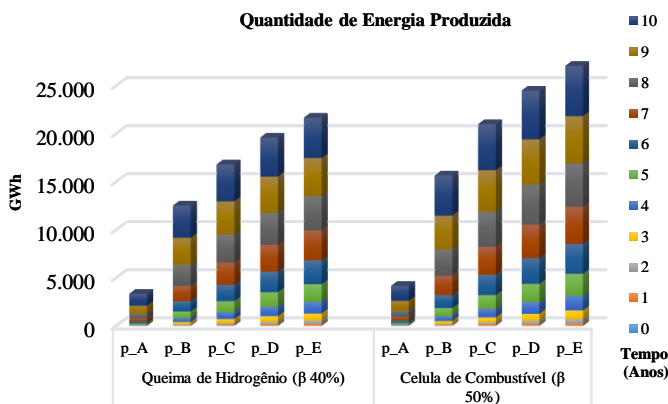


Fig. 5. Quantidade de Energia Gerada.

Nota-se pela quantidade de energia gerada Fig. 5, em comparação a energia consumida, em média dois terços dessa energia é perdida isso levando em consideração que a eficiência considerada para eletrolise, combustão e célula de combustível é otimista.

Por outro lado, considerando que a produção de H<sub>2</sub> pela eletrólise requer aquisição contínua de eletricidade, essa etapa pode ser considerada como um custo operacional (OPEX). Se calcularmos o CAPEX de investimento adicionando os custos de infraestrutura, transporte e armazenamento, o que é de extrema complexidade devido à alta densidade do H<sub>2</sub>, justifica-se o motivo pelo qual a maioria dos projetos envolvendo a produção de H<sub>2</sub>V por eletrólise não se mostraram lucrativos na maioria dos casos, conforme visto na literatura.

Por fim, dos gráficos da Fig. 4 e Fig. 5, o crescimento em forma de S resulta da interação não linear de ciclos de feedback positivo e negativo, da estrutura subjacente das etapas do desenvolvimento, e maturação de uma tecnologia quando esta adentra ao mercado.

A. Causalidade abrangente do Hidrogênio Verde: Oportunidades e Desafios

Ao analisar a Fig. 4 considerando apenas o potencial energético renovável é possível chegar à conclusão de que o Brasil pode fornecer a demanda projetada no cenário A, ou 10,63% da demanda global de H<sub>2</sub>V em 10 anos. E se outras tecnologias de produção de H<sub>2</sub>V com CCS forem levadas em consideração, as projeções podem ser maiores.

Contudo, como destacado pelos autores [19], a estrutura de planejamento para integração de recursos energéticos na pratica obedece a três principais tipos de cenários para projeções: o cenário de potencial técnico, econômico e de mercado.

A representação panorâmica do potencial técnico para produção do H<sub>2</sub>V e seus usos pode ser vista na Fig. 6 com o auxílio da técnica de DS. O uso do diagrama de laços causais utilizado nesta análise ajuda a visualizar as relações de causa e efeito entre as principais variáveis do sistema, fornecendo insights valiosos para o planejamento e a tomada de decisões com base no modelo, com o objetivo de melhorar os cenários de potencial econômico e de mercado.

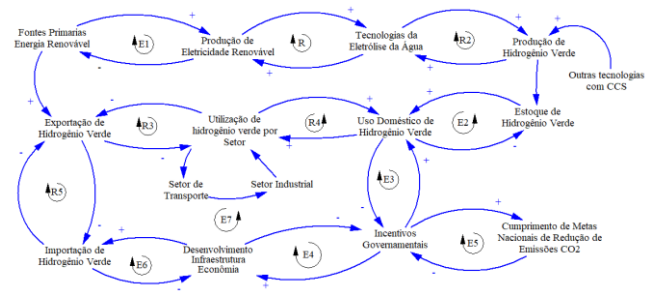


Fig. 6. Diagrama panorâmico de Laços Causais para o potencial do Hidrogênio

Na Fig. 6, o diagrama de laços causais, as setas indicam as relações de causa e efeito entre as variáveis para a abstração complexa. Os loops  $E_n$  e  $R_n$  mostram as interações de Equilíbrio (inibidor) e Reforço dessa relação dinâmica e complexa.

Nesta a produção de eletricidade renovável a partir de fontes primárias de energias renováveis é usada por tecnologias da eletrólise da água para à produção de H<sub>2</sub>V, que é armazenado em estoque e pode ser utilizado em diferentes setores destacando-se o de transporte e industrial, o que resultaria na redução de emissões de CO<sub>2</sub> e na substituição de combustíveis fósseis nestes setores. Para o caso da falta de mercado para consumo doméstico ou excesso de produção este H<sub>2</sub> pode ser exportado, promovendo a diversificação da economia sustentável para países importadores.

Os loops de equilíbrio  $E3, E4$  e  $E5$  mostram que os incentivos do governo é a variável mais importante nesta cadeia. Ao servir de ponto de partida para o desenvolvimento de infraestrutura, movimentação da economia sustentável e usos domésticos. Ressaltando deste modo, como o H<sub>2</sub>V pode ter impactos positivos em diferentes setores e na transição para uma economia energética mais sustentável.

Deste modo, conclui-se que, enquanto o mercado doméstico cresce, o Brasil abriria um vasto potencial de exportações conforme laço  $E7$ ,  $R3$  e  $R5$  embora a questão do transporte ainda seja um desafio. Contudo, o H2V é considerado o combustível do futuro pela sua multiplicidade de usos, para substituir os combustíveis fósseis em setores estratégicos como transporte, indústria e geração de energia, favorecendo a descarbonização desses. O que abre várias possibilidades de que embora como gerador de eletricidade, na atualidade não seja lucrativo, com certeza, quanto da maturação tecnológica e a exploração de todos estes setores em volta do seu uso em breve será bastante lucrativo, e o preço da tecnologia irá baixar em função do tempo.

A produção desse pode atingir a paridade tarifária em curto e médio prazo com incentivos adequados. Assim, terá a capacidade de competir com outras tecnologias disponíveis no mercado sem incentivos. Como aconteceu com a micro e mini geração distribuída (MMGD) que teve iniciativa de incentivos em abril de 2012 com a REN<sup>n</sup>482, oferecendo 100% de incentivos na modalidade *Net Metering*. No entanto, já em 2022, a lei n<sup>o</sup>14300 foi promulgada com o objetivo de reduzir alguns dos incentivos existentes. Os loops  $E3$  e  $E4$  representam essa relação de equilíbrio ao mostrar que quando o mercado atingir uma maturidade de mercado aceitável, a necessidade de incentivos é reduzida.

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o estudo, chega-se à conclusão de que o potencial de oferta para produção de hidrogênio no Brasil pode ser promissor, principalmente se forem utilizadas tecnologias eletrolíticas com eficiência superior a 50%. Todavia, é importante destacar a implementação em larga escala por eletrólise requer investimentos em infraestrutura, pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para aumentar a eficiência e reduzir os custos da produção. Por isso, o uso do hidrogênio Power-to-Power no Brasil, apesar de algumas iniciativas pontuais propostas, para sua difusão há ausência de previsão desse tipo de sistema no curto e médio prazo. No entanto, no longo prazo, considera-se inevitável.

As projeções realizadas demonstram que o uso da eletrólise para produzir hidrogênio verde resulta em uma perda de aproximadamente dois terços da energia gerada, mesmo com uma eficiência otimista. Por essa razão, o uso da eletricidade para armazenamento, na forma de  $H_2$ , precisa ser feito com cautela. Ao contrário das outras fontes de energias primárias, a energia elétrica não se encontra livremente na natureza.

A projeção do cenário conservador, com um coeficiente de inovação de 0,001, sugere que a oferta provável de H2V no Brasil em 10 anos (2033) representaria aproximadamente 10,64% da demanda global, a qual é estimada em cerca de 240,7 milhões de metros cúbicos. Já no cenário otimista, essa proporção pode chegar a 35,94%.

Por fim, no diagrama de laços causais, os loops de equilíbrio  $E3$ ,  $E4$  e  $E5$  mostram que os incentivos, de maneira geral, são a variável mais importante nesta cadeia. Eles servem como ponto de partida para o desenvolvimento da infraestrutura, a dinamização da economia circular sustentável e os usos domésticos, mas em função do tempo a necessidade

é reduzida como uma resposta de equilíbrio do próprio sistema.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001 e ao INCT-GD.

#### REFERENCIAS

- [1] IEA, "Hydrogen - IEA," *International Energy Agency*, 2023. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen#tracking> (accessed Jul. 22, 2023).
- [2] ESA, "Why Energy Storage? | Energy Storage Association," *American Clean Power Association*, 2022. <https://energystorage.org/why-energy-storage/> (accessed Aug. 10, 2022).
- [3] F. A. Farret and M. G. Simões, *Integration of Alternative Sources of Energy*. New Jersey: Wiley Interscience, 2006.
- [4] M. Kucukvar *et al.*, "Environmental efficiency of electric vehicles in Europe under various electricity production mix scenarios," *J. Clean. Prod.*, vol. 335, no. June 2021, p. 130291, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130291.
- [5] BatteryBits.org, "The Battery Report 2021," *Report*, pp. 1–132, 2022.
- [6] IRENA, *Geopolitics of the energy transformation: the hydrogen factor*. 2022.
- [7] IRENA, *Global Hydrogen Trade To Meet the 1.5°C Climate Goal: Part I-Trade outlook for 2050 and way forward*. 2022.
- [8] IRENA (International Renewable Energy Agency), *Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers*. 2022.
- [9] C. C. D. B. CAMARGO, *Confiabilidade aplicada a sistemas de potência elétrica*. Rio de Janeiro, 1981.
- [10] S. Bajaj, Jannuzzi Gilberto, R. Heideier, I. Vilela, J. Paccola, and R. Gomes, *Geração distribuída e eficiência energética Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro*, 1<sup>a</sup> edição. Campinas-SP: International Energy Initiative, 2018.
- [11] EPE, "PNE 2050 - Plano Nacional de Energia 2050," 2020.
- [12] J. Giehl, A. Hohgräve, M. Lohmann, and J. Müller-Kirchenbauer, "Economic analysis of sector coupling business models: Application on green hydrogen use cases," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 8, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.173.
- [13] P. Hesel, S. Braun, F. Zimmermann, and W. Fichtner, "Integrated modelling of European electricity and hydrogen markets," *Appl. Energy*, vol. 328, no. February, p. 120162, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120162.
- [14] J. Matinmikko, S. K. Kinnunen, T. Sinkkonen, and T. Kärrä, "Towards sustainable feasibility studies for P2X investments," *J. Clean. Prod.*, vol. 365, no. June, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132641.
- [15] V. Mahajan, E. Muller, and F. M. Bass, "New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research," *J. Mark.*, vol. 54, pp. 1–26, Jan. 1990.
- [16] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations: Fifth Edition*, 5th ed. New York, USA: The Free Press, Kindle Edition, 2003.
- [17] J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, 1st ed., vol. 1, no. 1. Boston: Jeffrey J. Shelsfud, 2000.
- [18] H. S. E. Chiquete, "Projeção da difusão da Geração Distribuída fotovoltaica para micro consumidores comerciais conectados à rede de baixa tensão," Universidade Federal de Santa Maria, 2022.
- [19] G. D. M. JANNUZZI, J. SWISHER, and R. REDLINGER, *PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS ENERGÉTICOS: oferta, demanda e suas interfaces*, 2nd ed., vol. único, no. 3. Campinas: IEI Brasil, 2018.
- [20] J. C. B. de Figueiredo, "MODELO DE DIFUSÃO DE BASS: UMA APLICAÇÃO PARA A INDÚSTRIA DE MOTOCICLETAS NO BRASIL," *Revista Gestão Industrial*, Ponta Grossa - Paraná - Brasi, 2012.