

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS,
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**ANÁLISE ECONÔMICA E COMPARATIVA DA PRODUÇÃO ON-SITE DE
HIDROGÊNIO RENOVÁVEL EM POSTOS DE ABASTECIMENTO DE VEÍCULOS**

Gilberto Azevedo de Oliveira Prado

São Paulo

2021

Gilberto Azevedo de Oliveira Prado

**ANÁLISE ECONÔMICA E COMPARATIVA DA PRODUÇÃO ON-SITE DE
HIDROGÊNIO RENOVÁVEL EM POSTOS DE ABASTECIMENTO DE VEÍCULOS**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Suani Coelho, PhD

São Paulo

2021

*“A sabedoria do humilde levantará a sua
cabeça e o fará sentar-se em meio aos grandes”*

Eclesiástico 11:1

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a quem dá toda a força, capacidade, proteção e sabedoria para continuar firme em busca de grandes vitórias, que é Deus, nosso Senhor.

Aos familiares pelo apoio incondicional nesta jornada. Aos amigos pessoais e aos que fiz no curso por todo o suporte, tornando esta caminhada um pouco mais amena. À minha esposa Jéssica pela parceria em todos os momentos, renovando minhas energias para continuar sempre em frente. Agradecimento especial à Professora Suani Coelho e ao consultor Antônio Alberto Stuchi por toda a colaboração para a realização deste trabalho, com os quais tive o privilégio de discutir ideias em alto nível e absorver parte da grande experiência de mercado que possuem. Agradeço também à USP e aos demais professores pelo ensino e acolhimento durante o período de estudos.

RESUMO

Após mais de um século utilizando intensamente combustíveis fósseis, a humanidade passou então a buscar de forma cada vez mais ativa fontes alternativas de energia, de forma a reduzir as emissões de gases que causam Efeito Estufa e que sejam renováveis, com a intenção de construir um futuro mais sustentável. Uma das fontes mais promissoras atualmente é o Hidrogênio, muitas vezes chamado também de “combustível do futuro”. Esse elemento, tão abundante no planeta Terra, possui um enorme potencial energético e tem como subproduto o vapor de água quando utilizado em processos de combustão ou de conversão em energia elétrica através das chamadas células de combustíveis, podendo então ser enormemente aproveitado junto ao setor de transportes. O presente trabalho tem como objetivo investigar e avaliar tecnicamente e financeiramente o emprego dessa produção on-site de Hidrogênio renovável a ser em postos de abastecimento de veículos a partir de 3 processos e insumos principais: reforma do biometano, reforma do etanol e eletrólise da água, além de compará-lo ao uso de outras fontes propulsoras como diesel, gasolina, etanol e eletricidade. Como resultado, encontrou-se que apesar do alto investimento em um posto de abastecimento de hidrogênio (acima de R\$ 10 milhões de reais), o preço final do produto poderia atingir R\$ 31,52 / kg de H₂ quando produzido a partir do biometano, sendo bastante competitivo com combustíveis tradicionais e podendo ser utilizado como um complemento às soluções com veículos totalmente elétricos, que demonstraram possuir o menor custo.

Palavras-chaves: Hidrogênio; Descarbonização; Mobilidade; Transição energética

ABSTRACT

After more than a century using fossil fuels intensively, the humanity then began to seek actively alternative energy sources that are renewable in order to reduce greenhouse gas emissions, with the intention of building a more sustainable future. One of the most promising sources today is Hydrogen, often also called the “fuel of the future”. This element, so abundant on planet Earth, has enormous energy potential and its by-product is water vapor when used in combustion processes or conversion into electrical energy through so-called fuel cells, which can then be enormously used by the transport sector. The present work aims to investigate and technically and financially evaluate the use of on-site production of renewable hydrogen to be used in vehicle filling stations from 3 main processes and inputs: biomethane reform, ethanol reform and water electrolysis, also comparing it to the use of other sources such as diesel, gasoline, ethanol and electricity. As a result, it was found that despite the high investment in a hydrogen filling station (above R\$ 10 million reais), the final price of the product could reach R\$ 31.52 / kg of H₂ when produced from biomethane, being very competitive with traditional fuels and could be used as a complement to solutions with all-electric vehicles, which have shown to have the lowest cost.

Keywords: Hydrogen; Decarbonization; Mobility; Energy transition

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes e cores do hidrogênio	15
Figura 2: Princípio operacional de uma célula a combustível	20
Figura 3: Esquemático de um veículo a célula a combustível de hidrogênio	21
Figura 4: Ônibus brasileiro movido a hidrogênio	23
Figura 5: Processo de produção e abastecimento de hidrogênio.....	24
Figura 6: Container de produção de hidrogênio	25
Figura 7: Dispenser para abastecimento de veículos	26
Figura 8: Esquemático de matérias-primas necessárias para produção de H ₂	30
Figura 9: Gráfico de custos anuais de matérias-primas em Reais	35
Figura 10: Preço médio final estimado de hidrogênio por origem.....	36
Figura 11: Custo médio por quilômetro rodado por fonte propulsora (R\$/km)	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reações químicas da produção de hidrogênio	18
Tabela 2: Investimento estimado em estações de abastecimento.....	28
Tabela 3: Premissas operacionais consideradas.....	28
Tabela 4: Preço final aproximado das matérias-primas	29
Tabela 5: Modelos de veículos utilizados para estudo	31
Tabela 6: Resultados de CAPEX e OPEX necessários	33

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

CAPEX: Capital Expenditure

CCS: Carbon Capture System

FC: Fuel Cell

GNV: Gás Natural Veicular

H₂: Hidrogênio

H₂O: Água

kJ: Quilo-Joule

km: Quilômetros

LCOE: Levelized Cost of Energy

Nm³: Normal Metros Cúbicos

OPEX: Operational Expenditure

R\$: Reais (Brasil)

SMR: Steam Methane Reforming

SUV: Sport Utility Vehicles

TIR: Taxa Interna de Retorno

TCO: Total Cost of Ownership

US\$: Dólares Americanos

VUC: Veículo Urbano de Carga

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Justificativa.....	13
1.2. Objetivos.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Produção de hidrogênio renovável.....	14
2.1.1. Produção a partir da eletrólise da água.....	16
2.1.2. Produção a partir do biometano.....	17
2.1.3. Produção a partir do etanol.....	17
2.1.4. Resumo e reações químicas globais.....	18
2.2. Hidrogênio como fonte propulsora em veículos.....	19
2.2.1. Célula a combustível.....	19
2.2.2. Veículos comerciais.....	20
2.3. Histórico de aplicações no Brasil.....	22
2.3.1. Sistemas de abastecimento de veículos.....	24
3. METODOLOGIA.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1. Viabilidade técnica.....	32
4.2. Avaliação econômica.....	33
4.2.1. Cenário por parte do empreendedor.....	33
4.2.2. Cenário por parte do consumidor.....	37
5. CONCLUSÃO.....	39
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

A procura por novas fontes de energias renováveis tem se intensificado nos últimos anos, principalmente devido às preocupações ambientais, destacando-se a redução da emissão de gases causadores de efeito estufa. Devido à crescente concentração da população em espaços urbanos aliada à industrialização, tem se havido um aumento considerável na demanda de transportes e, assim, uma maior concentração de veículos nas cidades, reforçando a necessidade pela busca de combustíveis e fontes propulsoras alternativas às baseadas em insumos de origem fóssil (SALVI e SUBRAMANIAN, 2013).

Uma dessas possíveis fontes, qual vem sendo estudada de forma mais intensa nas últimas décadas por diversos pesquisadores, empresas e governos é o hidrogênio. De acordo com DA SILVA (2016), ele pode vir a se tornar um combustível completo para o futuro de uma humanidade cada vez mais sustentável, possibilitando assim a eliminação da dependência do petróleo e proporcionando benefícios sociais, econômicos e ambientais.

No entanto, apesar de ser o elemento químico mais simples e abundante do planeta, quase não é possível encontrar o di-átomo H_2 (hidrogênio) na natureza de forma isolada. A maioria dos processos desenvolvidos para sua obtenção têm se utilizado de diferentes meios para que possa ser extraído a partir de outras cadeias de moléculas. Quando o processo emprega o uso de fontes de origem renovável, como a utilização de insumos de origem vegetal (bio-produtos), ou mesmo água (H_2O) em conjunto com uma energia vinda de fonte não poluidora (como a eólica ou solar), torna-se um combustível ecologicamente correto e com grande poder de não apenas suprir as necessidades energéticas da população, mas também de cooperar com os enormes desafios de descarbonização do planeta.

Uma das principais características do hidrogênio é a sua multiplicidade de aplicações, sendo considerado por muitos um verdadeiro vetor energético. Segundo VARGAS et al. (2006), esse elemento químico possui a maior quantidade de energia por unidade de massa quando comparado a qualquer outro tipo de combustível conhecido, sendo de aproximadamente 120,7 kJ por grama. Ele pode ser utilizado como alternativa de armazenamento de energia elétrica, sendo posteriormente transformado em

eletricidade através do uso de uma célula de combustível, ou mesmo atuar como combustível em indústrias energeticamente intensivas. Segundo SANTOS (2021), é possível ainda ser utilizado diretamente em meios de transporte, principalmente em veículos pesados de passageiros e mercadorias, através da geração interna de eletricidade no veículo ou mesmo queimado em um motor de combustão interna, além de possibilitar a produção de combustíveis sintéticos de base renovável e aplicáveis nos setores marítimos e de aviação, por exemplo.

Todavia, ainda existem diversos desafios relacionados com a utilização do hidrogênio renovável em escala comercial como substituto de outros combustíveis, a começar pelo seu transporte e armazenamento. De acordo com a IEA (2019), os custos associados a estas duas etapas da cadeia irão contribuir de forma significativa para a competitividade do hidrogênio. Devido à sua baixa densidade e alta instabilidade, transportá-lo por longas distâncias envolve uma alta complexidade. O formato mais recomendado é o de liquefazê-lo através de um processo de compressão, transportando o hidrogênio na forma líquida e assim permitindo o deslocamento em maiores capacidades mássicas, ou então transportá-lo em conjunto a produtos mais estáveis, como a amônia ou o metanol, de forma a servirem como moléculas carregadoras para os átomos de hidrogênio. Porém, esses processos acabam por aumentar o custo total de produção e distribuição, além de acrescentar etapas de transformação e reversão na cadeia produtiva. De tal maneira, tem sido cada vez mais comum a realização de estudos que objetivam a produção e aplicação *on-site*, ou seja, realizada no próprio local de utilização, evitando-se assim grande parte dos custos associados ao transporte e também reduzindo a necessidade de volume armazenado, caso uma parte do consumo ocorra de forma simultânea à etapa produtiva.

O Brasil se destaca no cenário internacional como possuidor de uma matriz elétrica, em sua maioria, oriunda de fontes renováveis, além de um enorme potencial de expansão dos parques de geração de energia limpa e de produção de biocombustíveis. Devido a esses fatores, o país tem o poder de exercer um papel de destaque frente à transição energética deste século, e pode ser um importante contribuidor para a aplicação do hidrogênio em grande escala. O Brasil possui também uma das maiores frotas

rodoviárias do mundo e, conseqüentemente, redes bastante consolidadas de distribuição de combustíveis com alta capilaridade de penetração em todo território nacional.

O presente estudo busca, portanto, analisar como a já bastante desenvolvida infraestrutura de postos de abastecimento de veículos (ou postos de combustíveis) poderia ser não só um canal de oferta de hidrogênio para aplicações junto ao setor de transportes, mas também um local para produção descentralizada *on-site* se utilizando de insumos renováveis, especificamente a partir do biometano, do etanol e da eletrólise da água. A análise se dará através de uma avaliação econômica e comparativa da oferta a partir desses diferentes processos produtivos e outras fontes propulsoras.

1.1. Justificativa

Um mundo energeticamente sustentável exige o desenvolvimento de novas tecnologias que possam atuar com maior eficiência e menores índices de emissão de gases causadores de efeito estufa. O setor de transportes, sozinho, é responsável por aproximadamente 24% das emissões globais de gás carbônico (CO₂) dentro do escopo de energia (IEA, 2019), e é altamente recomendado que sejam propostas soluções alternativas que ensejem a descarbonização de suas atividades, caso queiramos de fato manter as emissões em um nível controlado a nível mundial.

Todavia, não basta as novas tecnologias serem apenas brilhantes em teoria, mas precisam também apresentar viabilidade técnica, além de ser fundamental que existam modelos econômicos que suportem sua implementação. Faz-se necessário, portanto, que o emprego do hidrogênio como fonte alternativa propulsora de veículos seja avaliado a partir de soluções que permitam o seu uso de uma forma mais abrangente e em alto volume, gerando impacto representativo que faça jus a seu potencial. Sendo assim, uma das possibilidades é de se produzi-lo diretamente nos postos de abastecimento de veículos que temos atualmente instalados no Brasil, os quais poderiam servir de instrumento para produção e distribuição do hidrogênio renovável, dispensando eventuais dificuldades e custos agregados com seu transporte, além de aproveitar uma já existente capilaridade. No entanto, é preciso compreender os detalhes e complexidades deste modelo de negócio, além de como se compararia economicamente frente a combustíveis consolidados no mercado e outras possíveis fontes propulsoras,

de forma a melhor compreendermos sua viabilidade, seja do ponto de vista do empreendedor, que irá investir na oferta desse produto, assim como do consumidor.

1.2. Objetivos

- Explorar o potencial de viabilidade técnica para a produção de hidrogênio de origem renovável – a partir do biometano, etanol ou eletrólise da água – em um modelo descentralizado nos próprios postos de combustíveis (*on-site*);
- Analisar o modelo econômico da produção e distribuição de hidrogênio *on-site* para abastecimento de veículos rodoviários a partir dos insumos renováveis citados, assim como um sistema de abastecimento de eletricidade para baterias de veículos totalmente elétricos;
- Comparar economicamente sua utilização em relação a outras fontes propulsoras – Diesel, gasolina, etanol ou eletricidade – principalmente no que se refere aos investimentos necessários pelo empreendedor, preço final para o consumidor e custos de rodagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Produção de hidrogênio renovável

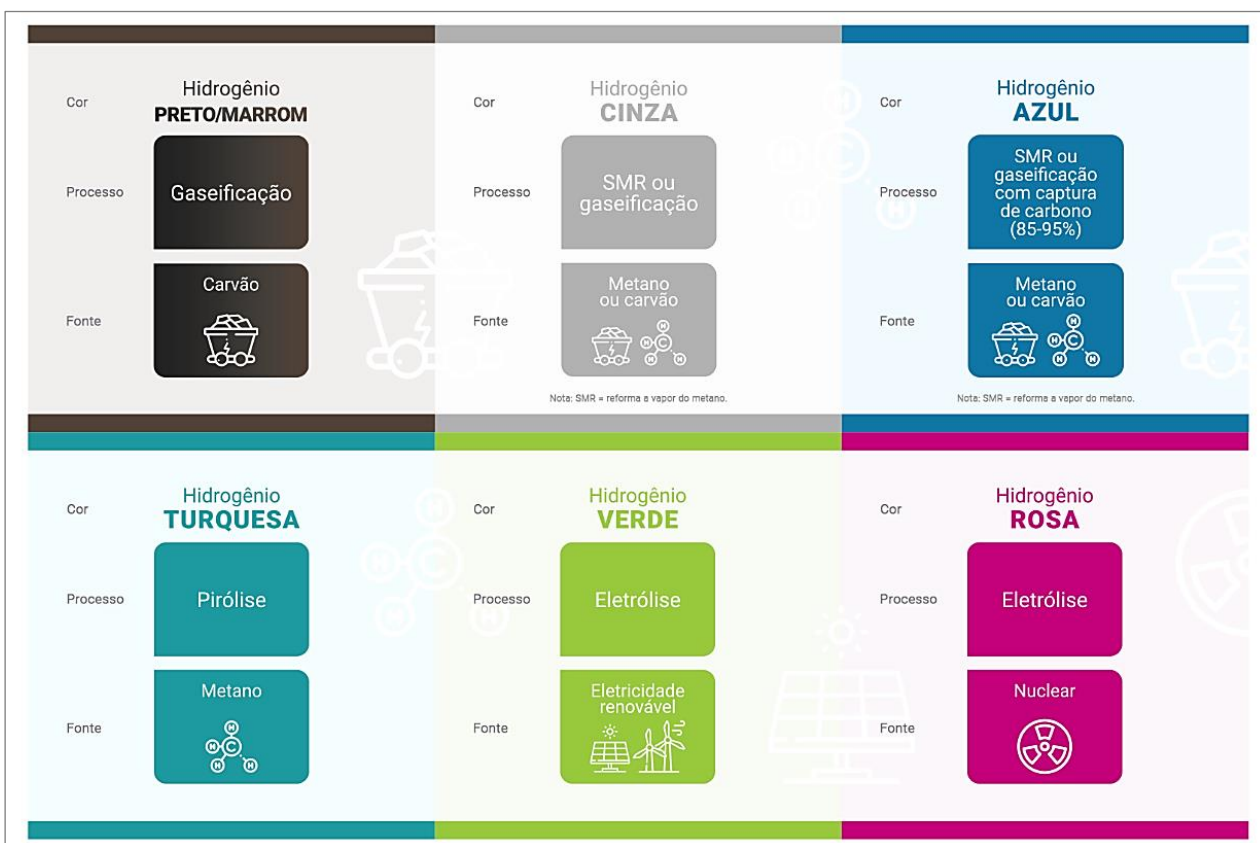
De acordo com a IEA (2021), a demanda global por hidrogênio puro atingiu 70 milhões de toneladas nos últimos anos, e é esperado que cresça de forma cada vez mais acelerada. No entanto, 95% ainda são gerados a partir de fontes fósseis como gás natural e carvão. Ao se utilizar o hidrogênio como solução para a descarbonização dos meios de transporte é importante observar, portanto, qual a origem do produto, de forma a se garantir que tenha sido produzido utilizando-se uma fonte de origem renovável.

A obtenção de hidrogênio pode ocorrer através de matérias-primas distintas. De acordo com a EPE (2021), entre os materiais renováveis possíveis para fornecimento de

átomos de hidrogênio podemos ter a água (H₂O), a biomassa e os biocombustíveis líquidos e gasosos, como o etanol e o biometano, todos esses presentes de forma massiva no mercado brasileiro.

As diferentes rotas alternativas para a produção de hidrogênio acabaram por resultar em classificações no formato de cores, de forma a facilitar sua identificação. A Figura 1 abaixo apresenta um esquemático sobre alguns dos principais processos e cores relativas à originação de hidrogênio.

Figura 1 - Fontes e cores do hidrogênio



Fonte: IRENA (2020)

O hidrogênio classificado como preto ou cinza, gerado a partir da gaseificação do carvão ou do gás natural, respectivamente, é o mais comum de ser encontrado no mercado atualmente, conforme já mencionado. Quando aliado a um sistema de captura de carbono (CCS), ele passa a ser considerado como hidrogênio azul. Segundo a MCKINSEY (2021), mais de US\$ 80 bilhões de investimento foram anunciados

globalmente em projetos de hidrogênio até 2030, sendo a grande maioria voltada para produção do hidrogênio classificado como verde, ou seja, de fonte renovável, principalmente atrelada ao processo de eletrólise da água utilizando-se de energia solar ou eólica. O hidrogênio proveniente de fontes orgânicas renováveis, como o etanol ou biometano, não costuma fazer parte das classificações globais de hidrogênio verde, porém é considerado pela EPE (2021) como do tipo *musgo*, uma vez que apesar de emitir gás carbônico durante a etapa de produção de hidrogênio, acaba podendo ser neutro ou mesmo negativo em emissões se considerado todo o ciclo de desenvolvimento biológico.

2.1.1. Produção a partir da eletrólise da água

A produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água é realizada empregando-se energia elétrica de forma intensiva com objetivo de se quebrar as moléculas de H_2O através de um aparelho chamado de eletrolisador, resultando em hidrogênio e oxigênio como produtos finais. Um fato interessante desse processo é que o oxigênio, portanto, pode também ser aproveitado para comercialização junto a indústrias químicas ou de materiais hospitalares.

Existem três principais tecnologias de produção de hidrogênio por eletrólise, de acordo com a PWC (2019). A primeira é a alcalina (ALK), que é a mais básica e possui um *market share* de aproximadamente 70% do mercado. É utilizada em processos de menor escala, e precisa operar continuamente para que consiga uma ótima relação de eficiência e menores índices de falha, o que contrasta com a intermitência de algumas fontes de energias renováveis. Outra tecnologia é a de membranas poliméricas (PEM), que contempla aproximadamente os outros 30% de mercado e está sendo adotada pela maioria dos grandes desenvolvedores de eletrolisadores, ainda de acordo com a PWC (2019). Essa tecnologia pode ser operada de forma intermitente e possui custos-benefícios interessantes para projetos de médio a grande porte, sendo então aplicada em conjunto com parques de geração de energia renovável. Uma terceira tecnologia, ainda em estágio de pesquisa, é a de óxido de sólido (SOE), qual possuiria uma alta eficiência a baixo custo, porém com longo tempo de partida e ainda baixa vida útil.

De acordo com PATRÍCIO (2014), o modelo produtivo da eletrólise em si é relativamente simples e tecnologicamente já plenamente dominado. Portanto, tem sido a

rota mais comum para produção de hidrogênio renovável, aliando-se a energia elétrica consumida no processo a uma geração de energia por fontes eólica ou solar. A grande dificuldade desse processo é atingir custos produtivos tão baixos quanto os encontrados atualmente na produção utilizando gás natural ou carvão. De tal forma, um dos principais fatores para redução de custos operacionais é o próprio preço nivelado da energia elétrica gerada ou comprada (LCOE), assim como sua eficiência. É importante, também, que haja disponibilidade de água suficiente para o processo e que consigamos, com a escala, reduzir os custos dos equipamentos empregados.

2.1.2. Produção a partir do biometano

Uma das grandes vantagens da produção de hidrogênio a partir do gás biometano (ou metano de origem biológica) é que pode ocorrer de forma bastante similar ao já usual processo de reforma de gás natural, sendo assim um potencial substituto direto, podendo até mesmo utilizar de parte da rede de distribuição estabelecida, a depender do preço do insumo utilizado e da demanda de mercado.

De acordo com SOUZA (2018), esse processo ocorre através da reforma catalítica do metano (CH_4) com vapor de água (H_2O), sendo um processo de alta eficiência térmica, apesar dos altos custos operacionais devido à necessidade energética de superaquecimento do vapor a temperaturas acima de 700°C . As altas temperaturas podem ser atingidas através de um processo de queima de um combustível, podendo-se então utilizar o próprio biometano para tal, podendo chegar a consumir até 40% do volume de gás apenas para o aquecimento da água. A quebra das moléculas de metano resulta em um amplo volume de hidrogênio, assim como CO residual e CO_2 resultantes.

2.1.3. Produção a partir do etanol

O etanol é um combustível líquido renovável e pouco poluente que pode atuar como um vetor de transporte de hidrogênio. O Brasil é um dos principais produtores mundiais e bateu inclusive seu próprio recorde na produção de etanol na safra 2021/20 com o total de 35,6 bilhões de litros (PORTAL GOV.BR, 2020), sendo a maioria proveniente de plantações de cana-de-açúcar.

Por ser um combustível de fácil armazenamento e transporte, além de já possuir uma cadeia de distribuição consolidada no país através das distribuidoras de combustíveis, o etanol possui um grande potencial de ser um elemento intrinsecamente associado a uma economia nacional movida a hidrogênio.

A produção de hidrogênio a partir do etanol pode ser realizada através de processos variados. No entanto, segundo TEIXEIRA (2016) o mais comum é através da reforma a vapor, que se trata de um processo endotérmico qual o combustível reage com a água na presença de catalisadores sob temperaturas acima de 400°C. Todavia, é importante citar que esse processo, assim como os equipamentos empregados, ainda se encontram em estágio de desenvolvimento.

2.1.4. Resumo e reações químicas globais

A Tabela 1: Reações químicas da produção de hidrogênio abaixo apresenta um resumo sobre os processos de produção de hidrogênio renovável apresentados, assim como suas reações químicas globais e fatores condicionantes, quais são muito importantes para que os processos ocorram de forma completa e satisfatória, resultando então na obtenção de átomos isolados de H₂.

Tabela 1: Reações químicas da produção de hidrogênio

PROCESSO	REAÇÃO QUÍMICA GLOBAL	CONDICIONANTES
Eletrólise da Água	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	Alto Consumo de Energia Elétrica
Reforma do Biometano	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$	Alto Consumo de Energia Térmica
Reforma do Etanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}_2 + 2\text{CO}_2$	Consumo de Energia Térmica e Catalisadores

Fonte: Adaptado de SOUZA (2018)

2.2. Hidrogênio como fonte propulsora em veículos

Há várias décadas existem pesquisas sobre fontes alternativas a serem utilizadas para propulsão de veículos. Dentre as iniciativas, uma das mais estudadas é através do uso do hidrogênio como insumo principal, seja através de sua queima em um motor a combustão ou pela transformação de sua energia química em energia elétrica (utilizando uma célula a combustível e assim fornecendo corrente elétrica a um motor). De tal forma, o hidrogênio se destaca como uma fonte promissora, além do fato de o principal material resultante de sua aplicação ser, basicamente, vapor de água.

O funcionamento de veículos a hidrogênio se dá pelo uso de tanques que podem armazená-lo sob o estado líquido ou gasoso. De acordo com a MCKINSEY (2021), a vantagem de se armazená-lo no estado líquido é poder comprimi-lo, obtendo-se maior quantidade em massa, e assim acondicionando uma maior capacidade energética. Todavia, a complexidade e custos desse modelo podem acabar sendo inviáveis para veículos leves que trafegam por distâncias relativamente pequenas.

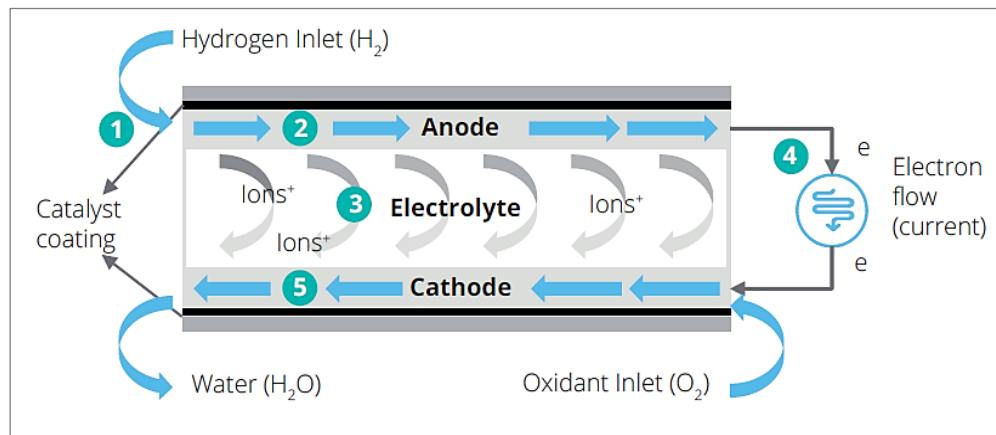
Os veículos a qual esta tecnologia pode ser empregada vão desde empilhadeiras a hidrogênio até veículos de passageiros, caminhões, ônibus rodoviários, aviões ou navios. As principais vantagens em se utilizar o hidrogênio como fonte propulsora consistem em sua flexibilidade produtiva, podendo até mesmo ser de origem totalmente renovável, além de sua alta concentração energética, permitindo maiores autonomias aos veículos, e da possibilidade de não expelir emissões locais, dispensando apenas vapor de água durante sua operação. Ademais, pode ser transportado, comercializado e exportado entre países. Seu rápido tempo de abastecimento permite também que o modelo de negócio não seja muito diferente das operações costumeiras que ocorrem junto a uma bomba de combustíveis tradicional.

2.2.1. Célula a combustível

De forma genérica, uma célula de combustível é um instrumento de reação eletroquímica com o objetivo de fazer a conversão da energia química de um conjunto de elementos para energia elétrica. No caso do processo envolvendo o hidrogênio, ele e o oxigênio são os reagentes do processo, tendo então como produto a saída de água, em

forma de vapor, além da geração de eletricidade. Por isso mesmo, é também chamada de eletrólise reversa, uma vez que a reação que ocorre em seu interior se assemelha ao sentido contrário da reação que ocorre com a água durante o processo de geração de hidrogênio por eletrólise. A Figura 2 abaixo apresenta um esquemático desse princípio.

Figura 2: Princípio operacional de uma célula a combustível



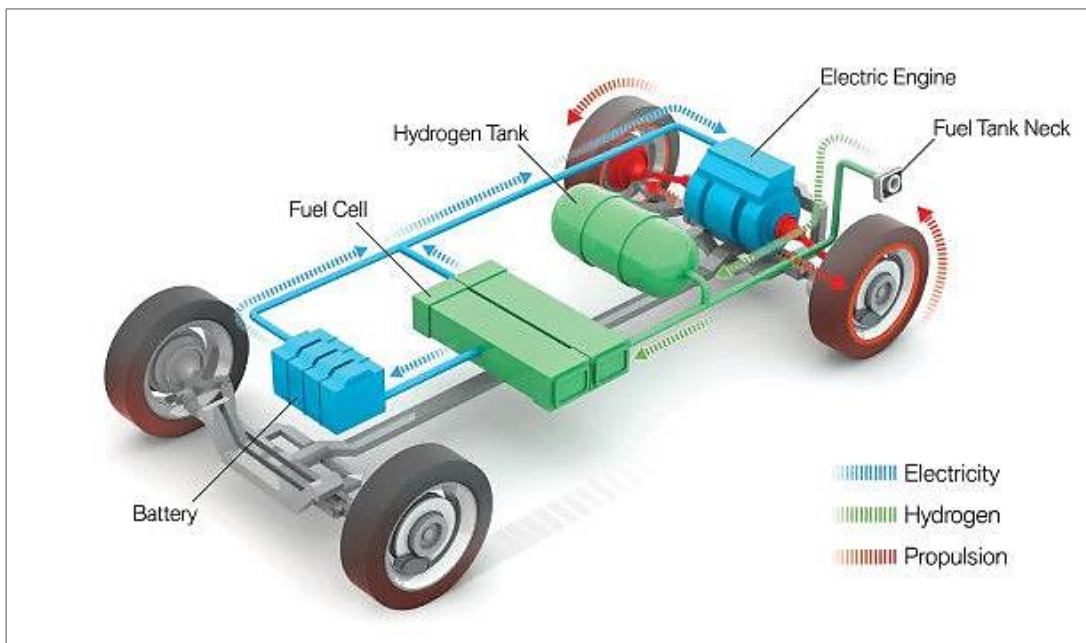
Fonte: DELOITTE (2020)

De acordo com a AFDC (2018), a maioria dos veículos atuais movidos a hidrogênio têm usado preferencialmente as tecnologias de célula a combustível ao invés de queimá-lo em um motor a combustão. Isso se deve pelo fato das células, também chamadas de *Fuel Cell (FC)*, possuírem uma maior eficiência e índice zero de emissões, o que pode não ocorrer em um motor de combustão interna. Além disso, possuem uma operação estável e silenciosa com menos peças móveis. Os principais focos de seu desenvolvimento ainda consistem na redução de seu custo, muito por conta do alto valor dos materiais empregados em sua construção, assim como no incremento da eficiência e aumento da durabilidade, permitindo que faça parte de toda a vida útil dos veículos.

2.2.2. Veículos comerciais

Para aplicações veiculares, a célula a combustível é instalada no interior do veículo com objetivo de gerar eletricidade a partir do hidrogênio. A Figura 2 abaixo apresenta um esquemático desse princípio.

Figura 3: Esquemático de um veículo a célula a combustível de hidrogênio



Fonte: BMW (2019)

Para que o veículo possa se mover, o tanque presente no veículo é abastecido com hidrogênio proveniente de uma fonte externa. Esse mesmo hidrogênio reage na célula a combustível com o oxigênio, o qual é capturado diretamente do ar ambiente. De acordo com a BMW (2019), a energia elétrica produzida por essa reação pode seguir duas rotas diferentes, a depender do momento e demanda exigida pelo condutor. Ela pode ser parcialmente armazenada em uma bateria para posterior utilização, ou então fornecer energia diretamente para o motor elétrico. Quando o veículo necessita de força total, pode-se recorrer até mesmo a essas duas fontes de eletricidade em conjunto. Além disso, de forma similar a veículos elétricos tradicionais, pode haver a recuperação da energia de frenagem, qual é também armazenada na bateria.

A experiência de dirigibilidade de um veículo a hidrogênio é similar à de um veículo totalmente elétrico, acentuado pelo baixo ruído, alta eficiência do motor e possibilidade de torque instantâneo. Além disso, como pontos positivos, se destaca pela realização de rápidos abastecimentos (geralmente inferiores a 15 minutos) e uma maior autonomia sem necessitar de um acréscimo relevante em peso ao veículo. Todavia, uma de suas maiores dificuldades é justamente encontrar postos de abastecimento disponíveis.

Diferentemente de veículos elétricos que conseguem recarregar utilizando-se até mesmo de pontos simples de eletricidade em baixa potência, o abastecimento de hidrogênio sempre irá depender de uma infraestrutura bastante específica e robusta. Por necessitar de equipamentos com um certo nível de complexidade e altos níveis de segurança, o investimento ainda é muito alto e a demanda quase inexistente, fazendo com que existam poucos locais aptos a receberem veículos a hidrogênio na América Latina. Além disso, o custo do veículo ainda é, em média, superior ao de um veículo totalmente elétrico, muito por conta do custo da célula a combustível utilizada e por ainda não capturar reduções com eventuais ganhos de escala.

2.3. Histórico de aplicações no Brasil

De acordo com SANTOS (2021), o Brasil iniciou de forma mais abrangente as pesquisas envolvendo hidrogênio na década de 1970, logo após a ocorrência dos sucessivos choques de petróleo, como parte das buscas por fontes alternativas de energia. Em 1975 foi, inclusive, inaugurado o laboratório LH2, sediado na Universidade de Campinas (Unicamp). Já em 1998, foi criado o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), procurando agrupar e difundir informações relevantes sobre o desenvolvimento de novas tecnologias associadas. Em 2002 foi criado o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2) com o intuito de ampliar uma rede de pesquisa que propiciasse o desenvolvimento nacional de sistemas de células de combustível. Em 2017 foi fundada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2), reunindo as principais empresas atuantes no território nacional e envolvidas com a sua produção, utilização ou desenvolvimento de células a combustível, incluindo pesquisadores, entidades acadêmicas e jurídicas.

A pandemia provocada pela Covid-2019 teve como um de seus efeitos uma maior preocupação global com o cenário ambiental. Esse fator fez com que se acelerassem projetos de energias renováveis em todo o mundo, e no Brasil não foi diferente. Em 2020 foi anunciado no Ceará um projeto para construção de um dos maiores hubs mundiais de hidrogênio verde para exportação, reunindo investimento de diversas empresas. Segundo a AIR PRODUCTS (2021), projetos desse tipo podem movimentar até US\$20

bilhões por ano no país. Um exemplo disso vem da empresa portuguesa EDP, que anunciou que irá investir na produção de hidrogênio verde a partir da eletrólise da água em sua planta localizada em Pecém, no Ceará, sendo possivelmente uma das primeiras unidades em grande escala comercial a entrar em operação no país.

Um dos principais projetos pilotos que ocorreram no Brasil vinculados ao setor de transportes foi o do “Ônibus brasileiro movido a hidrogênio”, lançado em 2006 e conduzido pela EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo) em parceria com operadores de transporte público de São Paulo e empresas produtoras dos componentes veiculares. De acordo com a própria EMTU/SP (2016), o projeto contemplou o desenvolvimento, aquisição, operação e manutenção de quatro ônibus com células a combustível a hidrogênio, juntamente de um sistema para abastecimento, cuja operacionalização ficou a cargo da Petrobrás.

Figura 4: Ônibus brasileiro movido a hidrogênio



Fonte: EMTU/SP (2016)

Outro importante projeto vem sendo desenvolvido pela fabricante Nissan com o objetivo de se utilizar o etanol para abastecer um sistema reformador embarcado em veículos, produzindo assim hidrogênio internamente para alimentar uma célula a combustível e, conseqüentemente, um motor elétrico. De acordo com GONÇALVES (2021) esse tipo de aplicação pode ser interessante no Brasil de forma a permitir aliarmos o etanol produzido no país em conjunto com a eletrificação do setor automotivo sem demandar maiores modificações na infraestrutura existente de postos de combustíveis.

2.3.1. Sistemas de abastecimento de veículos

Os veículos que se movem utilizando eletricidade gerada por uma célula de combustível geralmente necessitam que o suprimento de hidrogênio venha de uma fonte externa, sendo então necessário o desenvolvimento de uma infraestrutura específica para seu atendimento. A Figura 5 abaixo apresenta um esquemático da estação que foi desenvolvida para operar junto aos ônibus a hidrogênio no projeto conduzido pela EMTU/SP.

Figura 5: Processo de produção e abastecimento de hidrogênio



Fonte: EMTU/SP (2016)

De acordo com PARKS et. al (2014) os equipamentos presentes em uma estação *on-site* podem ser divididos em três categorias: geração, armazenamento e distribuição. Os equipamentos de geração são necessários para a produção de hidrogênio, utilizando-se de eletrolisadores ou de reformadores (no caso do biometano ou etanol). Para armazenamento, o hidrogênio gerado é comprimido e filtrado de forma que possa ser estocado em tanques especializados para posterior

utilização. Quanto à distribuição, é feita através de *dispensers* específicos, após passar por mais um estágio de adequação da pressão e temperatura, a depender da configuração da estação.

O processo de geração pode ocorrer dentro de um container projetado especificamente para essa finalidade. A empresa Hytron é uma das principais atuantes neste mercado e modalidade, sendo inicialmente formada no ano de 2003 como uma *spin-off* da UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas). Em 2020 a empresa foi adquirida pela Neuman & Esser Group, da Alemanha, de forma expandir e reforçar seu desenvolvimento tecnológico também em outros países (HYTRON, 2021). Na Figura 6 abaixo é apresentado um exemplo de um container de produção de hidrogênio projetado pela empresa.

Figura 6: Container de produção de hidrogênio



Fonte: HYTRON (2021)

Quanto ao sistema de armazenamento, ele é formado por um conjunto de compressores e refrigeradores com o objetivo de se acondicionar o hidrogênio de forma correta, além de componentes de vedação que procuram impedir que qualquer tipo de vazamento venha a ocorrer.

Em relação ao sistema de abastecimento, é importante que os bocais possuam sensores de forma a garantir um acoplamento correto junto ao veículo, além de serem verificadas as devidas condições de segurança operacional. As principais opções de pressão de abastecimento costumam ser de 350 ou de 700 bar. Os consumidores deverão ter então ciência sobre qual a pressão requerida, sendo mais comum a utilização de 350 bar para veículos pesados (caminhões e ônibus) e 700 bar para veículos médios e de passeio (AYDIN et al., 2021).

Ainda é raro encontrar estações de abastecimento a hidrogênio mesmo em países mais desenvolvidos, uma vez que o custo de implantação permanece bastante elevado, além do custo de operação, principalmente referente aos compressores e manutenção geral do sistema. Todavia, algumas empresas vêm formando parcerias e construindo modelos de negócio para incentivar a transição da frota de veículos para movidos a hidrogênio. Uma dessas iniciativas é da *H2 Mobility*, uma companhia independente formada por grandes *players* europeus com o objetivo de criar uma infraestrutura ampla de abastecimento na Alemanha e em outros países europeus. Atualmente, já contam com 118 estações em operação (H2 MOBILITY, 2021). Outra empresa que vem investindo em programas ligados ao hidrogênio é a multinacional *Shell*, que além de produzir hidrogênio verde tem buscado também desenvolver algumas primeiras estações de abastecimento nos Estados Unidos e Europa. Um exemplo é apresentado na Figura 7 abaixo.

Figura 7: Dispenser para abastecimento de veículos



Fonte: KANTOLA (2015)

3. METODOLOGIA

Primeiramente, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica a respeito da produção de hidrogênio e utilização como fonte propulsora de veículos, procurando entender os principais conceitos, dificuldades, vantagens e desvantagens de sua utilização. Em seguida, foi feito um levantamento técnico dos sistemas, equipamentos e insumos necessários para o desenvolvimento desse tipo de operação junto a postos de combustíveis no Brasil, os quais serão apresentados e discutidos na sessão de Resultados.

Para avaliação do modelo econômico, buscou-se primeiro compreender os investimentos (CAPEX) e principais custos operacionais (OPEX) a nível do empreendedor, ou seja, de quem iria potencialmente assumir estes valores com objetivo de desenvolver em seu posto um novo modelo de negócio de produção de hidrogênio a partir do biometano, etanol ou eletrólise da água. Foi também estudado, para comparação, o custo associado a uma estação de recarga de baterias para veículos elétricos. Por efeito de simplificação, não serão considerados no CAPEX eventuais investimentos em infraestrutura prévia para atendimento ao local, por exemplo, com reforços na rede elétrica, ou mesmo desenvolvimento de malha de gás para atendimento ao posto. Para o OPEX dos sistemas a hidrogênio, também não serão considerados os custos extras de demanda de energia da rede (R\$/kW), uma vez que a potência de seus equipamentos é desconhecida, sendo então utilizados apenas para os cálculos junto ao sistema de recarga de veículos elétricos.

Com base nos cenários e modelos estudados por MELAINA e PENEV (2013) para os sistemas a hidrogênio em modelos de produção *on-site* estimados para 2025-2030, aliados à uma premissa de produção de 750 kg/H₂ por dia e *dispensers* de 700 Bar, concomitante aos dados fornecidos por NICHOLAS (2019) para os sistemas de recarga de baterias de veículos elétricos, foram adaptados e assumidos os valores de investimento e operação das estações de abastecimento apresentados nas Tabelas 2 e 3 a seguir. Importante observar que para o caso do biometano, devido à ausência de dados específicos a seu respeito, foram utilizadas as mesmas premissas dos estudos para o gás natural (*SMR – Steam Methane Reforming*). Já para o sistema com base no etanol, o investimento foi assumido como 10% superior ao necessário para o sistema a

biometano, devido a sua maior complexidade tecnológica. Em relação aos sistemas a eletrólise e de recarga de veículos elétricos, não foram considerados investimentos em geração própria de eletricidade, e sim um modelo de conexão com o Grid (rede elétrica) e consequente compra de energia renovável via Mercado Livre.

Os valores de investimento médio contemplam uma implantação em modelo *turn-key*, ou seja, considerando-se já todos os maquinários necessários, assim como mão de obra, preparação de infraestrutura, projeto técnico, documentações, aprovações, entre outros. No caso dos modelos a hidrogênio, são estimativas de custos futuros (2025-2030), e para a recarga a eletricidade são valores atuais adicionados ao desenvolvimento de subestação de energia exclusiva. Os valores estão em Dólar americano (US\$), e para a modelagem será utilizada a cotação de 5,30 Reais / US\$ em modalidade real, ou seja, desconsiderando a inflação futura.

Tabela 2: Investimento estimado em estações de abastecimento

PRODUTO	ORIGEM	INVESTIMENTO MÉDIO	CAPACIDADE	MÁX. VEÍCULOS / DIA
Hidrogênio	Biometano	2.711 US\$/ <i>(kg H2/dia)</i>	750 kg H2/dia	125
Hidrogênio	Etanol	2.982 US\$/ <i>(kg H2/dia)</i>	750 kg H2/dia	125
Hidrogênio	Eletrólise / Grid	2.950 US\$/ <i>(kg H2/dia)</i>	750 kg H2/dia	125
Eletricidade	Grid (Rede elétrica)	1.050 US\$/kW	350 kW	126

Fonte: Adaptado de MELAINA e PENEV (2013) e NICHOLAS (2019)

Tabela 3: Premissas operacionais consideradas

TIPO	CUSTO ANUAL MÉDIO	
OPEX (Operação & Manutenção)	5%	do CAPEX
Demanda de energia	216,00	R\$ / kW
Eficiência Recarga Elétrica	95%	sobre o Grid
TIR	10 a 20%	sobre CAPEX
Vida útil dos sistemas	15	Anos
Cotação	5,30	R\$ / US\$

Fonte: O Autor (2021)

No caso do abastecimento por eletricidade, foi considerada uma estação de recarga de veículos elétricos de 350kW de potência. Para análise da quantidade máxima de veículos (de passeio) possíveis de serem atendidos por dia, foi considerada uma

média de 6 kg de H₂ por veículo a hidrogênio e 50kWh por veículo totalmente elétrico (os dados de alguns veículos reais são também apresentados na Tabela 5) a uma utilização diária de até 75% da potência da estação de recarga de eletricidade sob eficiência da recarga elétrica de 95% (representando as perdas de energia entre o volume que sai do Grid e o que é de fato transferido ao veículo), resultando assim em capacidades similares em número de veículos por dia, de forma a validar a equalização das comparações.

Em relação aos custos com as matérias-primas, foram utilizados dados médios de mercado vigentes em Outubro de 2021, de acordo com o site PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS (2021) para os preços finais de consumo, assumindo o valor do biometano pareado ao preço do GNV. Para se estimar o custo qual o biometano e o etanol chegam até o posto revendedor, foi considerada na modelagem financeira uma margem média de 10% entre o preço final médio de revenda e o custo com esses combustíveis. Já para a eletricidade, foi considerado um custo médio total de compra de energia renovável via Mercado Livre, incluindo encargos e custos com o sistema de distribuição. As premissas utilizadas estão apresentadas na Tabela 4 a seguir.

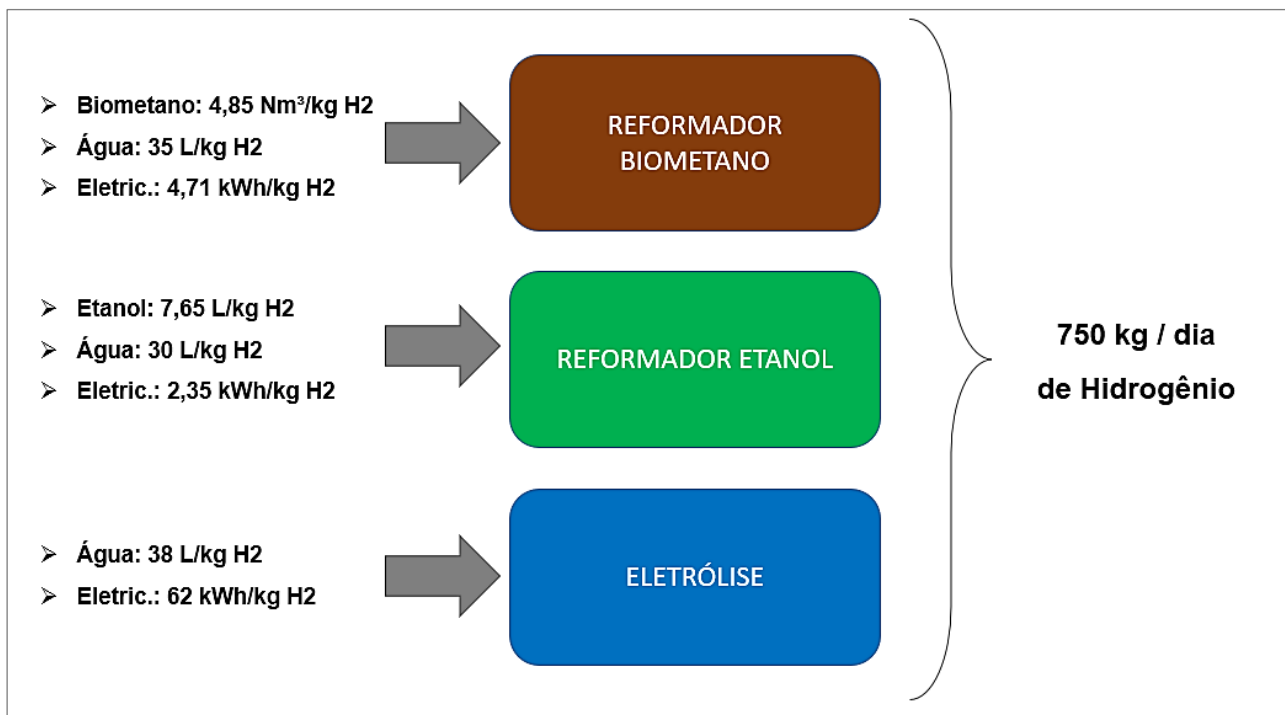
Tabela 4: Preço final aproximado das matérias-primas

FONTE AVALIADA	PREÇO FINAL MÉDIO	UNIDADE
Etanol	4,42	R\$/L
Gasolina	5,58	R\$/L
Diesel	4,55	R\$/L
GNV / Biometano	3,84	R\$/NM ³
Eletricidade	0,52	R\$/kWh
Água	0,003	R\$/L

Fonte: Adaptado de PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS (2021), ENEL-SP (2021) e SABESP (2021)

As principais variáveis para produção do hidrogênio a partir do biometano e etanol foram obtidas através de informações da HYTRON (2021) em sua apresentação de equipamentos e matérias-primas, juntamente de variáveis obtidas junto à empresa SH2 ENERGY (2021) para a eletrólise. As variáveis consideram não somente o volume intrínseco à produção, mas também o total necessário para operação do sistema, contemplando volume de água utilizado também para refrigeração e o combustível para o aquecimento dos reformadores. Os dados estão apresentados na Figura 8 abaixo.

Figura 8: Esquemático de matérias-primas necessárias para produção de H₂



Fonte: Adaptado de HYTRON (2021) e SH2 ENERGY (2021)

A avaliação dos modelos produtivos e de abastecimento irá então considerar o CAPEX para investimento nos sistemas e o OPEX geral (armazenamento de H₂ somado aos custos de Operação & Manutenção) com objetivo de identificar qual deveria ser o preço final (em Reais por kg de hidrogênio) de forma a se alcançar a TIR mínima desejada para o empreendedor. Como premissa, será considerado que haverá o consumo anual de 60% da capacidade máxima produtiva de hidrogênio (o mesmo valor a ser utilizado para o consumo de eletricidade no sistema de recarga elétrica de baterias), de forma a se aproximar o estudo a um cenário hipotético de mercado com demanda existente. Destaca-se que não está sendo considerada uma curva incremental de demanda, e sim um valor fixo ao longo dos 15 anos de operação.

Será também feita uma análise do ponto de vista do consumidor, procurando comparar as alternativas avaliadas quanto ao custo de rodagem (R\$/km) a partir das precificações encontrados na modelagem anterior, buscando-se assim compreender

como a eficiência de cada fonte propulsora afeta o custo final para o consumidor, sendo este um dos principais resultados que compõe a viabilidade de uma fonte propulsora.

Com o intuito de se fazer a análise de forma mais realista, foram utilizados dados de veículos de mercado, categorizados em 3 modalidades: Passeio, SUV (Sport Utility Vehicles) e Caminhões do tipo VUC (Veículos Urbanos de Carga). Destaca-se que o valor de compra ou manutenção dos veículos não foi utilizado na análise, e que o custo de rodagem considera assim apenas a parcela relativa ao abastecimento. Importante ressaltar que, no caso de caminhões a hidrogênio tipo VUC, não foram encontrados modelos comercialmente disponíveis em larga escala, sendo então feita uma adaptação e equalização a partir dos dados do caminhão *Xcient FC* da Hyundai que está em fase de pesquisa, considerando metade do seu porte e tanque, uma vez que está sendo desenvolvido para capacidades maiores do que os outros VUCs analisados.

A Tabela 5 abaixo apresenta os veículos que estão sendo utilizados no estudo.

Tabela 5: Modelos de veículos utilizados para estudo

CATEGORIA	TIPO	VEÍCULO	PESO (kg)	TANQUE	CONSUMO (CIDADE)	AUTONOMIA (km)
Passeio Sedan	Etanol (Flex)	Fiat Cronos	1.139	48 L	8,5 km/L	408
Passeio Sedan	Gasolina (Flex)	Fiat Cronos	1.139	48 L	12,4 km/L	595
Passeio Sedan	Elétrico	Chery Arrizo 5e	1.520	53 kWh	6,3 km/kWh	334
Passeio Sedan	Hidrogênio	Toyota Mirai	1.930	5,6 kg	131,6 km/kg	737
SUV Médio	Etanol (Flex)	Chevrolet Tracker	1.228	44 L	8,2 km/L	361
SUV Médio	Gasolina (Flex)	Chevrolet Tracker	1.228	44 L	11,9 km/L	524
SUV Médio	Elétrico	Volkswagen ID.4	2.124	77 kWh	5,3 km/kWh	408
SUV Médio	Hidrogênio	Hyundai Nexo	1.820	6,3 kg	99,5 km/kg	627
Caminhões (VUC)	Diesel	Volkswagen 9170	2.900	80 L	4,4 km/L	352
Caminhões (VUC)	Elétrico	JAC 1200-T	3.350	97 kWh	2,1 km/kWh	204
Caminhões (VUC)	Hidrogênio	Hyundai Xcient FC**	-	16 kg	32,5 km/kg	520

Fonte: Adaptado de iCARROS (2021) e EV-DATABASE (2021)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Viabilidade técnica

Segundo ANDRADE NETO (2017) existem aproximadamente 40.000 postos de combustíveis no Brasil, movimentando cifras superiores a R\$ 400 bilhões todos os anos. Com tendências cada vez mais fortes de consumidores buscando veículos com menos emissões e alternativas tecnológicas, é imprescindível que o setor esteja atento às inovações e adaptações. Atualmente, quase a totalidade desses postos já oferecem etanol para seus clientes, e um número considerável oferece gás natural (GNV), sendo parte da infraestrutura de gás que chega até o posto passível de ser direcionada para utilização de biometano, por mais que limitada à algumas regiões geográficas. Em relação à eletricidade, todos os postos possuem conexão à rede elétrica, porém em regiões mais afastadas ainda é complexo se implantar um sistema de alta potência. Todavia, percebe-se que existiria a possibilidade de implantação de sistemas pilotos de produção de hidrogênio por etanol, biometano ou eletrólise em locais específicos, criando-se mais uma opção de oferta de abastecimento ao consumidor final, reforçado pelo rápido tempo de abastecimento dos veículos e o longo alcance que poderiam atingir, não necessitando assim, em um primeiro momento, de uma rede mais densa, mas sim de pontos espalhados ou em modelo de corredores rodoviários que possam garantir uma cobertura ótima para impulsionar as primeiras adoções de frotas veiculares.

As principais necessidades para implantação de um sistema completo de produção e abastecimento de hidrogênio residem, portanto, na criação da infraestrutura básica de suprimento das matérias-primas, principalmente de água desmineralizada e dos materiais de transformação, além de uma conexão estável e potente junto à rede elétrica, capaz assim de suportar as operações, principalmente no caso de uso da eletrólise. Além disso, os compressores também demandam quantidade razoável de energia e potência da rede elétrica, sendo necessários para que haja o armazenamento para posterior distribuição do H₂ produzido. Todo este conjunto de equipamentos possui ainda um grau de complexidade do ponto de vista tecnológico, com poucas empresas totalmente especializadas em seu desenvolvimento, operação e manutenção, o que dificultaria uma possível implantação em massa no momento. No entanto, é importante

que sejam feitos testes e pilotos objetivando a expansão do conhecimento técnico necessário para a criação de uma futura infraestrutura mais ampla.

4.2. Avaliação econômica

4.2.1. Cenário por parte do empreendedor

Inicialmente, buscou-se compreender qual seria o CAPEX necessário para implantação dos sistemas de produção e abastecimento de hidrogênio e de eletricidade (para veículos totalmente elétricos). Com base na revisão bibliográfica e dados que foram compilados na etapa de Metodologia, os custos de investimento e operação anual (OPEX) foram calculados e apresentados na Tabela 6 a seguir, juntamente com o volume anual projetado, partindo-se do princípio – conforme dito anteriormente – de consumo em 60% da capacidade máxima anual.

Tabela 6: Resultados de CAPEX e OPEX necessários

ESTAÇÃO	ORIGEM	CAPEX (R\$)	OPEX ANUAL (R\$)	VOLUME ANUAL
Hidrogênio 700 Bar	Biometano	10.776.225	538.811	164.250 <i>kg H2</i>
Hidrogênio 700 Bar	Etanol	11.853.848	592.692	164.250 <i>kg H2</i>
Hidrogênio 700 Bar	Eletrólise	11.726.250	586.313	164.250 <i>kg H2</i>
Recarga Elétrica 350kW	Mercado Livre	1.947.750	172.988	1.379.700 <i>kWh</i>

Fonte: O Autor (2021)

Percebe-se que os investimentos necessários são de fato bastante elevados, ultrapassando a cifra de 10 milhões de Reais por posto com hidrogênio, o que dificulta a adoção deste negócio em larga escala sem a intervenção e apoio de programas públicos de incentivo ou de associações entre grandes empresas. Para efeito de comparação, um posto completo de combustíveis tradicional necessita de aproximadamente 1 a 4 milhões de Reais para ser implantado, além de já contar com uma demanda consolidada e um modelo comprovadamente lucrativo (ANDRADE NETO, 2017).

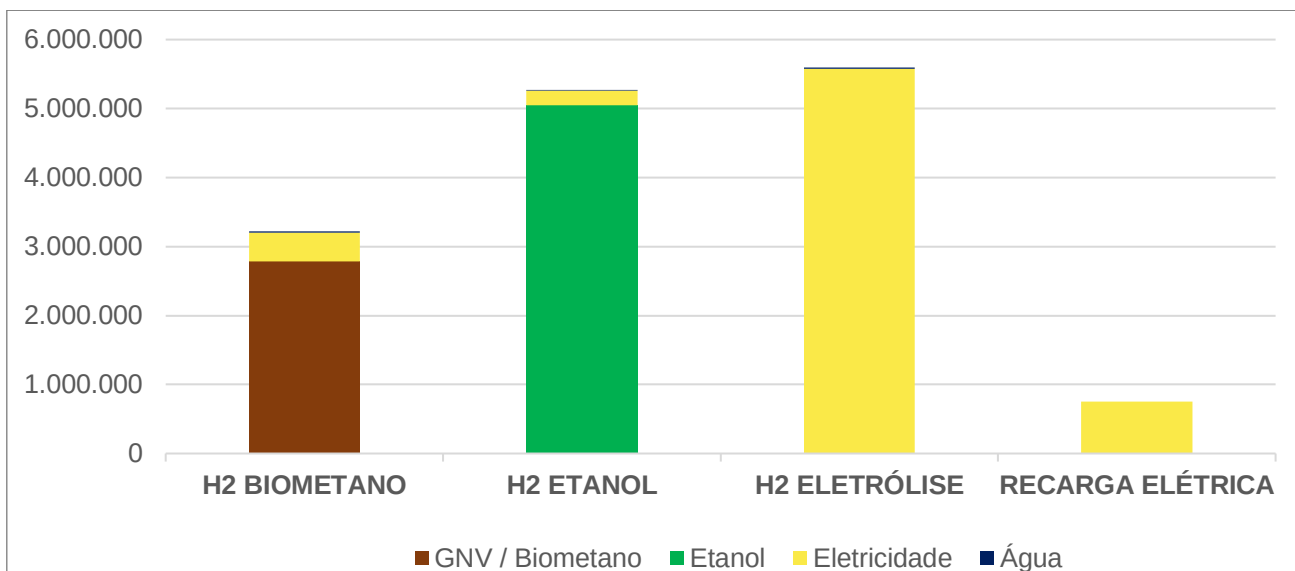
Os altos custos de OPEX são reflexo da complexidade tecnológica dos sistemas, custos fixos para serem mantidos e necessidades rotineiras de manutenção com mão de

obra especializada. Espera-se, porém, que estes custos venham a cair com o tempo, à medida que a tecnologia se torna cada vez mais difundida e ocorram os devidos aperfeiçoamentos necessários. Importante ressaltar que o suprimento de matéria-prima produtiva não está presente nos cálculos acima, ou seja, o que foi apresentado representa apenas o custo de disponibilidade operacional estimado das estações.

Comparando-se os sistemas de postos de hidrogênio com uma estação de recarga elétrica, percebe-se que a segunda é muito mais simples do ponto de vista de implantação e operação e, mesmo com um investimento ainda elevado, é da ordem de 5x menor do que uma estação a hidrogênio. Porém, uma observação bastante relevante é que não estão sendo considerados fatores operacionais do lado da demanda, como a necessidade de se abastecer veículos em paralelo em um momento de pico, ou seja, com o menor tempo possível, o que dificultaria a adoção do modelo com veículos totalmente elétricos. Para este estudo foi considerada a possibilidade de se realizar o abastecimento de forma controlada durante todo o dia, o que favorece o modelo de utilização de veículos totalmente elétricos. Na prática, quanto mais se necessita de se abastecer de forma concentrada, rápida e em paralelo, mais o cenário de investimentos entre os dois modelos (elétrico e a hidrogênio) tendem a se aproximar. Porém, se for permitido um modelo de operação com características mais flexíveis e/ou em séries menores (fila programada), o modelo com recarga para veículos elétricos passa a ter vantagem considerável se comparado com o hidrogênio atualmente.

Utilizando-se das premissas apresentadas na Tabela 3 (retirando-se 10% de margem estimada para o revendedor) e também do esquemático de produção da Figura 8, foi calculado o custo anual projetado com o suprimento de matérias-primas produtivas para cada um dos modelos estudados, resultando no gráfico da Figura 9 abaixo.

Figura 9: Gráfico de custos anuais de matérias-primas em Reais

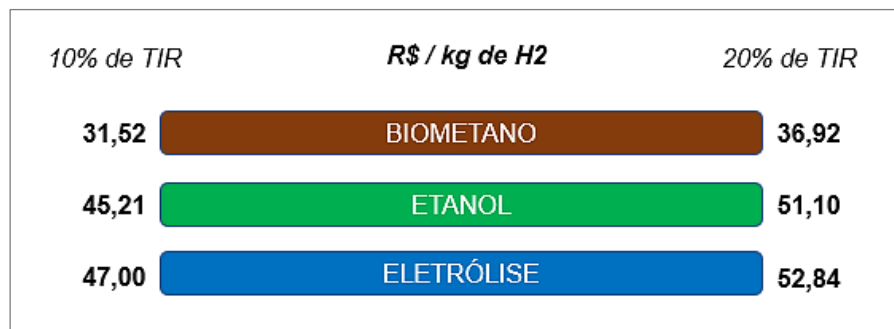


Fonte: O Autor (2021)

Interessante perceber que dentre os modelos de produção de hidrogênio o sistema a biometano apresenta não só o menor CAPEX e OPEX, mas também o menor custo com insumos para se realizar a produção. Já os sistemas a etanol e eletrólise possuem custos anuais que se aproximariam, tendo o modelo a etanol uma ligeira vantagem, mas que dependerão principalmente do preço da energia que está sendo comprada para se realizar a operação. Observa-se também que o custo com a água utilizada para a produção do hidrogênio é irrelevante se comparado aos demais itens. Já para a recarga elétrica, como não é necessário utilizar a eletricidade para nenhum processo específico e sim apenas injetá-la no veículo, tem-se que seu custo é o menor entre todos, demonstrando assim também uma maior eficiência.

Com o objetivo então de se estimar a precificação para o consumidor final, foram então utilizadas as premissas apresentadas na Tabela 3, em uma análise de fluxo de caixa considerando a remuneração alvo entre 10 a 20% de TIR, assim como os valores de CAPEX, OPEX e custos de matérias-primas para cada um dos sistemas. Como resultado, obteve-se que o *Payback* simples para todos os sistemas estudados poderia ocorrer próximo do 8º ano de operação (dentre 15 anos de vida útil prevista) para 10% de TIR. Os preços do kg de hidrogênio projetados são apresentados na Figura 10 abaixo.

Figura 10: Preço médio final estimado de hidrogênio por origem



Fonte: O Autor (2021)

Comparando-se os resultados encontrados com a literatura, observa-se uma certa proximidade. Segundo a MCKINSEY (2021), já existiriam projetos de geração centralizada de hidrogênio renovável custando entre 4 a 6 US\$ / kg H2 nos Estados Unidos. Todavia, muitos ainda se encontram a uma faixa de 10 a 15 US\$ / kg H2, considerando-se ainda um modelo com demanda incerta (SH2 ENERGY, 2021). Levando-se em conta a cotação de 5,30 R\$/US\$ utilizada no modelo, teríamos um custo atual partindo de R\$ 53,00 R\$/kg H2, que não é tão distante dos resultados obtidos e ainda demonstra um potencial relevante do Brasil em se produzir hidrogênio a menores custos, com o modelo a biometano podendo chegar a 31,52 R\$/kg H2 (a 10% de TIR). No entanto, este estudo considerou um modelo de alta demanda, ou seja, de 60% de consumo da capacidade máxima das estações de H2 anualmente, e não considerou inflação. Na prática, principalmente no caso de estações públicas, é uma situação ainda inviável, que dependerá de uma geração de demanda através de programas de migração de frotas de veículos tradicionais para os movidos a células a combustível, levando-se então a uma curva ascendente projetada de consumo ao longo dos anos, qual deverá então ser precificada na modelagem dos investimentos a serem feitos pelo empreendedor, aumentando-se o preço final para o consumidor.

Em relação ao modelo de recarga elétrica, os resultados se situaram na faixa entre 0,86 R\$/kWh a 0,97 R\$/kWh para 10% e 20% de TIR, respectivamente, considerando uma taxa de utilização de 60% das estações a 75% de sua potência máxima (balanceando a carga entre veículos carregando de forma simultânea), além de 95% de

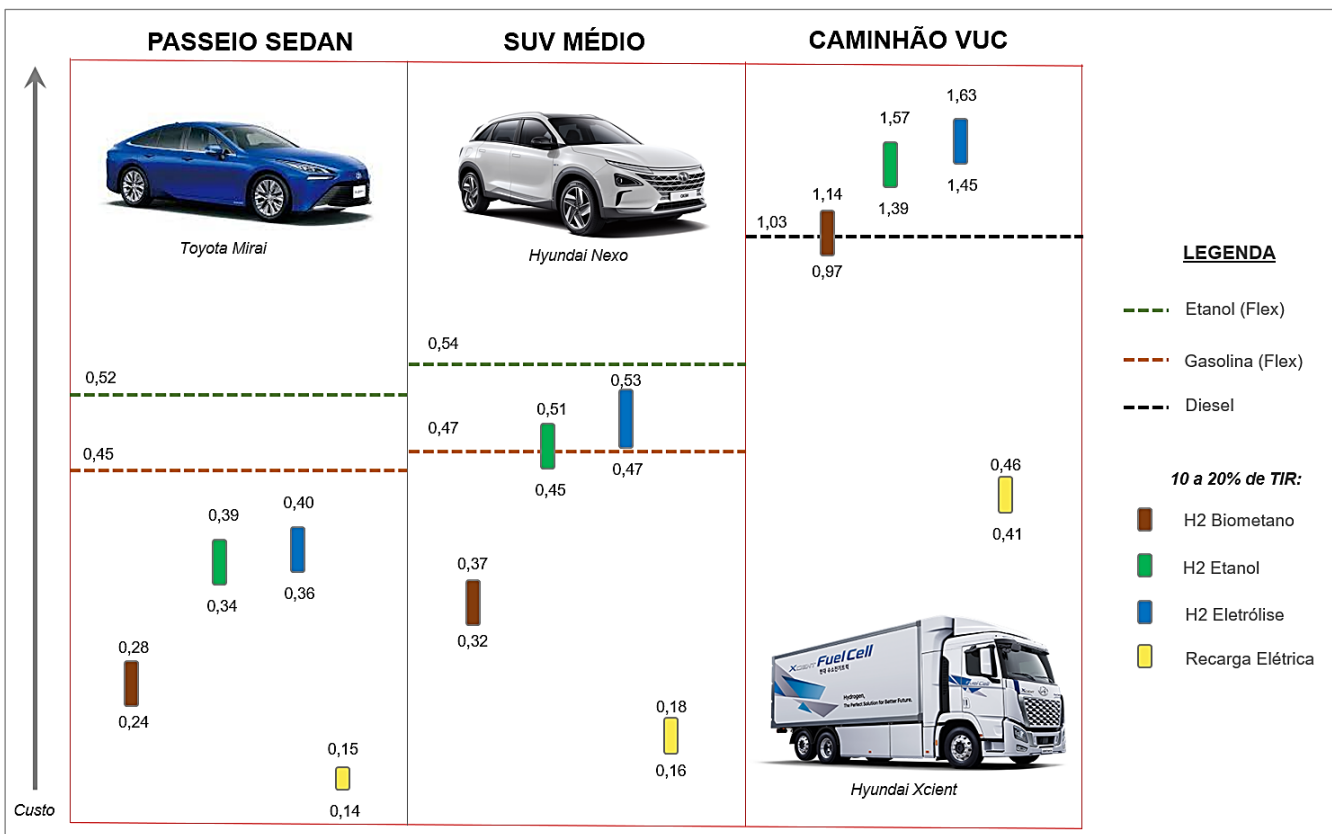
eficiência da conexão entre a estação de recarga elétrica e o grid. Da mesma forma, é uma situação ainda hipotética dada a baixa demanda de abastecimento de veículos elétricos e acentuada pela dificuldade de composição de cenários ótimos de programação de recarga em estações abertas, sujeitas às necessidades individuais do público externo.

4.2.2. Cenário por parte do consumidor

Analisando-se os modelos de veículos presentes na Tabela 5, percebe-se que o peso dos veículos elétricos e a hidrogênio são superiores aos dos veículos a combustão, resultando em ineficiências pela quantidade de massa envolvida. Percebe-se também que a alta autonomia é o grande destaque dos veículos a hidrogênio, contrastando-se com uma baixa autonomia dos veículos puramente elétricos.

Em relação aos custos para o consumidor, foram avaliados quanto custaria a rodagem com cada tipo de veículo, ou seja, qual seria o custo médio por quilômetro para abastecimento usando cada modelo estudado. Utilizando-se dos dados dos modelos de veículos da Tabela 5 juntamente dos preços do etanol, gasolina e diesel da Tabela 4 e os preços calculados de hidrogênio da Figura 10 (considerando a faixa de 10% e 20% de TIR), foram analisados o comportamento dos custos de rodagem para 3 categorias veiculares: Passeio Sedan, SUV Médio e Caminhão VUC. Os resultados são apresentados abaixo na Figura 11.

Figura 11: Custo médio por quilômetro rodado por fonte propulsora (R\$/km)



Fonte: O Autor (2021)

Percebe-se que o hidrogênio conseguiria ser bastante competitivo com a combustão do etanol e a gasolina utilizados por veículos *flex* em carros de Passeio Sedan e em SUV Médios, podendo atingir o valor de 0,24 R\$/km rodado com um Toyota Mirai em um modelo de 10% de TIR ao empreendedor e suprimido a partir do biometano. Devido à uma maior eficiência, os menores custos de rodagem seriam atingidos com o uso de recarga para veículos elétricos. Interessante observar também que, no caso de veículos a diesel, o hidrogênio teria maiores dificuldades de ser competitivo caso não sejam produzidos veículos com maior eficiência. Todavia, haveria mesmo assim um grande interesse em uma substituição direta de diesel por hidrogênio devido à redução de emissões de gases nocivos e a dificuldade de aplicação de veículos elétricos por conta de sua menor autonomia e maior tempo para recarga das baterias.

Importante ressaltar que para uma análise mais completa, seria interessante se avaliar o TCO (Total Cost of Ownership), incluindo também custos de manutenção e valor de compra dos veículos. Apesar dos valores de compra dos veículos não terem sido utilizados nesta modelagem, através das pesquisas realizadas foi possível identificar que o custo de um veículo a hidrogênio está aproximadamente 20% superior à de um veículo totalmente elétrico, que por sua vez se encontra a um patamar próximo de 2,5 vezes acima do preço de um veículo a combustão tradicional, porém com grandes expectativas de redução dessa diferença até 2050.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo buscou analisar a possibilidade de oferta de hidrogênio em postos de abastecimento de veículos, sendo produzido em formato *on-site* através do etanol, biometano ou eletrólise da água. Mesmo se tratando de um estudo aproximado e com menor grau de detalhes que um projeto real demandaria, constatou-se que há um grande potencial de utilização do hidrogênio em aplicações veiculares. Apesar de diversos desafios tecnológicos e alto investimento necessário (chegando a mais de R\$10 milhões por posto de hidrogênio), poderíamos atingir preços rentáveis e competitivos com os combustíveis utilizados atualmente no mercado brasileiro, podendo chegar a quase metade do custo por quilômetro rodado abastecendo-se um veículo de passeio com hidrogênio em comparação à gasolina (0,24 R\$/km contra 0,45 R\$/km, respectivamente).

Tecnicamente, as aplicações de produção *on-site* se mostram inicialmente viáveis, desde que haja disponibilidade de infraestrutura prévia para fornecimento de matéria prima e conexão de energia elétrica com potência necessária para o suprimento dos equipamentos. É interessante perceber que o fato de os postos simplesmente possuírem acesso ao biometano ou etanol não configuram por si só um elemento completo para o desenvolvimento de uma infraestrutura de abastecimento a hidrogênio, uma vez que diversos outros fatores devem também ser atendidos sob um alto investimento e operação altamente especializada.

Dentre os três processos apresentados para produção de hidrogênio, o que utiliza biometano resultou como o de menor preço final potencial (a 31,52 R\$/kg H₂), seguido

pelo etanol (45,21 R\$/kg H₂) e pela eletrólise (47,00 R\$/kg H₂), em modelagem de 10% de TIR para o empreendedor, sob premissa de demanda existente de 60% da capacidade máxima da estrutura (750 kg H₂ / dia) em 15 anos de operação. No entanto, cabe destacar que o fornecimento de biometano não ocorre atualmente em todos os postos de abastecimento, e o preço da eletricidade pode acabar sofrendo enormes variações, sendo necessário então avaliar caso a caso qual opção seria mais interessante. Além disso, a condição de uma alta e fixa demanda é apenas hipotética, devendo ser considerado um valor adicional em contrapartida ao risco da curva de crescimento do mercado de veículos a hidrogênio, que hoje é praticamente inexistente no Brasil.

Quando analisada a aplicação do hidrogênio em 3 categorias de veículos, foi percebido que há potencial de ser competitivo em custos para veículos de passeio sedan e SUVs. Em aplicações em veículos pesados há um desafio adicional em superar o custo por quilômetro rodado de uma solução a diesel, porém seria um prêmio direto a ser pago por evitar-se a queima de um combustível tão nocivo ao meio ambiente e à saúde humana.

Por fim, quando comparado com uma solução de recarga de baterias, o custo e a complexidade dos modelos utilizando hidrogênio foi bastante superior, demonstrando a dificuldade dessa operação em competir diretamente com veículos elétricos, principalmente em aplicações com veículos leves. No entanto, apesar de ter um custo de operação relativamente mais alto, a maior autonomia dos veículos aliado a um menor tempo para reabastecimento conferem ao hidrogênio uma posição de destaque frente aos desafios de descarbonização do setor automotivo. Entende-se que não deveria haver uma competição com os veículos totalmente elétricos, e sim uma atuação complementar, aplicando-se assim a melhor tecnologia para cada situação. Um exemplo disso são as aplicações com caminhões pesados onde existe uma grande dificuldade em se utilizar modelos totalmente elétricos devido ao grande volume e peso de suas baterias, aumentando o tempo de recarga aliado a uma baixa autonomia.

De forma geral, portanto, uma das maiores dificuldades encontradas para uso do hidrogênio como fonte propulsora residem no alto grau de investimento em estações de abastecimento (dificultando o desenvolvimento de redes mais amplas) e uma demanda ainda incerta. Portanto, um formato interessante de se iniciar algumas aplicações seria

junto a frotas particulares de veículos, quais poderiam realizar os seus abastecimentos em uma única estação centralizada. Além disso, deve-se levar em conta a melhor opção entre o uso de veículos a hidrogênio ou totalmente elétricos, principalmente se ainda for considerado o custo de aquisição e manutenção. No entanto, percebe-se que há um grande potencial que deve ser reforçado e explorado para que sejam desenvolvidas aplicações utilizando o hidrogênio como uma alternativa de fonte propulsora nos meios de transporte.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para próximos trabalhos, entende-se que deva ser avaliado o TCO completo dos veículos apresentados na Tabela 5, incluindo estimativas do preço de compra e manutenção dos veículos. Além disso, seria interessante que fosse realizado um estudo simulado da capacidade operacional de abastecimento de uma estação a hidrogênio vs. estação de recarga de baterias de veículos elétricos, de forma a melhor compreender as diferenças e viabilidade técnica de cada operação.

De forma a validarmos os valores aqui apresentados, sugere-se que seja avaliado um projeto prático piloto de sistema *on-site* de abastecimento de hidrogênio, analisando principalmente a assertividade do CAPEX e OPEX aqui projetados.

REFERÊNCIAS

AFDC (Alternative Fuel Data Center). US Department of Energy. Washington, DC, 2018. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_basics.html>. Acesso em: 19 set. 2021.

AIR PRODUCTS. Hidrogênio verde no Brasil. Rio de Janeiro, RJ, 29 set. 2021. Disponível em: <<https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-pode-movimentar-us-20-bi-por-ano-no-brasil-ate-2040-estima-air-products/>>. Acesso em: 30 set. 2021.

ANDRADE NETO, José Lima de. O mercado brasileiro de combustíveis. FGV Energia. Rio de Janeiro, 2017.

AYDIN, Muhammed Iberia; DINCER, Ibrahim; HA, Harry. Development of Oshawa hydrogen hub in Canada: A case study. International Journal of Hydrogen Energy, 2021.

BMW. Hydrogen fuel cell cars: everything you need to know. Munique, 5 dez. 2019. Disponível em: <<https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html>>. Acesso em: 9 set. 2021.

CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos). Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. Brasília, DF, 2010.

DA SILVA, Inara Amoroso. Hidrogênio: Combustível do Futuro. Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016.

DELOITTE. Fueling the Future of Mobility. Hydrogen and fuel cell solutions for transportation. Financ. Advis, v. 1, 2020.

EMTU/SP (Empresa metropolitana de transportes urbanos de São Paulo). Empreendimentos – Ônibus a hidrogênio. São Paulo, SP, 2016. Disponível em: <<https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/empreendimentos/projetos-de-desenvolvimento-tecnologico/onibus-a-hidrogenio.fss>>. Acesso em: 30 set. 2021.

ENEL-SP. Tarifas para o fornecimento de energia elétrica resolução homologatória nº 2.890 da ANEEL. São Paulo, SP. 04 jul. 2021. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/tabela-de-tarifas.html>. Acesso em: 18 out. 2021

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Ministério de Minas e Energia. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Brasília, DF, 2021.

ESPIN, Joffre; ESTEVEZ, Eduardo; THIRUMURUGANANDHAM, Saravana Prakash. Hydrogen Economy and Its Production Impact on Automobile Industry Forecasting in Ecuador Using Principal Component Analysis. In: International Conference on Computational Science and Its Applications. Springer, Cham, 2021. p. 512-526.

EV-DATABASE. EV Data and informations. Disponível em: <<https://ev-database.org/car>>. Acesso em: 29 out. 2021.

GONÇALVES, Felipe de Oliveira et al. Evaluation of the feasibility of ethanol and gasoline in solid oxide fuel cell vehicles in Brazil. International Journal of Hydrogen Energy, 2021.

H2 MOBILITY. Filling up with H2. Hydrogen mobility starts now. Disponível em: <<https://h2.live/en/tankstellen/>>. Acesso em: 1 out. 2021.

HYTRON. Solutions for hydrogen production & purification. Sumaré, SP. Disponível em: <http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/01_Daniel%20Hytron_NEA_GESL_072021.pdf>. Acesso em: 1 out. 2021.

ICARROS. Fichas Técnicas. Disponível em: <<https://www.icarros.com.br/>>. Acesso em: 29 out. 2021.

IEA (International Energy Agency). The Future of Hydrogen, 2019.

IRENA (International Renewable Energy Agency). Renewable Energy Statistics – Renewable Energy Target Setting. Abu Dhabi, UAE, 2020.

KANTOLA, H. K. Shell Hydrogen fueling station. Torrance, 20 abr. 2015. Disponível em: <<https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hydrogen-fueling-station-shell-torrance-ca/>>. Acesso em: 19 set. 2021.

McKINSEY (McKinsey & Company). Hydrogen Insights. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, 2021.

MELAINA, M.; PENEV, Mike. Hydrogen station cost estimates: comparing hydrogen station cost calculator results with other recent estimates. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2013.

NICHOLAS, Michael. Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major US metropolitan areas. 4 ago. 2019. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_Charging_Cost_20190813.pdf>. Acesso em: 2 out 2021.

PARKS, G. et al. Hydrogen station compression, storage, and dispensing technical status and costs: Systems integration. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2014.

PATRÍCIO, Rodrigo Alves et al. O Modelo do sistema energético de hidrogênio solar e o Estado do Ceará. Revista Tecnologia, v. 35, n. 1/2, p. 7-35, 2014.

PORTAL GOV.BR. Brasil alcança a maior produção de etanol da história. Brasília, DF, 24 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2020/04/brasil-alcanca-a-maior-producao-de-etanol-da-histori>>. Acesso em: 6 set. 2021.

PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS. Preço dos combustíveis em São Paulo. São Paulo, SP, 16 out. 2021. Disponível em: <<https://precodoscombustiveis.com.br/pt-br/city/brasil/sao-paulo/sao-paulo/3830>>. Acesso em: 20 out 2021

PWC. The dawn of green hydrogen. Maintaining the GCC's edge in a decarbonized world. Abu Dhabi, UAE, 2019.

SALVI, B.L.; SUBRAMANIAN, K.A; PANWAR, N.L. Alternative fuels for transportation vehicles: A technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 25, p. 404-419, 2013.

SANTOS, Vitor Manuel. O papel do hidrogênio na transição energética mundial e seus desdobramentos no sistema energético brasileiro, 2021.

SABESP. Tarifas de água e esgoto. São Paulo, SP. 10 mai 2021. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=183>>. Acesso em: 19 out. 2021.

SH2 ENERGY. Economics and cost comparison of hydrogen production. Disponível em: <<https://www.sgh2energy.com/economics>>. Acesso em: 1 out. 2021.

SOUZA, M.M.V.M. Hidrogênio e células a combustível. São Paulo, SP: Synergia, 2018

TEIXEIRA, Ana Carolina Rodrigues et al. Uma revisão sobre a reforma de etanol a vapor com foco na produção de hidrogênio. 2016.

VARGAS, Reinaldo A. et al. Hidrogênio: o vetor energético do futuro. São Paulo: Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), 2006.

YATES, Jonathon et al. Techno-economic analysis of hydrogen electrolysis from off-grid stand-alone photovoltaics incorporating uncertainty analysis. Cell Reports Physical Science, v. 1, n. 10, p. 100209, 2020.