

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

LUCAS GARCIA VINCENZO

VEÍCULOS A HIDROGÊNIO – DESAFIOS DA NOVA TECNOLOGIA E
IMPACTOS SOBRE AS MATRIZES ELÉTRICA E ENERGÉTICA DO
BRASIL

SÃO PAULO
2022

LUCAS GARCIA VINCENZO

**VEÍCULOS A HIDROGÊNIO – DESAFIOS DA NOVA TECNOLOGIA E IMPACTOS
SOBRE AS MATRIZES ELÉTRICA E ENERGÉTICA DO BRASIL**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PECE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e em Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Gerhard Ett

**SÃO PAULO
2022**

A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, SÓ PODERÁ SER REALIZADA APÓS AUTORIZAÇÃO PRÉVIA DESTE AUTOR.

FICHA CATALOGRÁFICA

Vincenzo, Lucas Garcia.

Veículos a hidrogênio – Desafios da nova tecnologia e impactos sobre as matrizes elétrica e energética do Brasil. / Lucas Garcia Vincenzo; orientador: Gerhard Ett. – São Paulo, 2022.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Veículos a Hidrogênio. 2. Hidrogênio. 3. Geração de Hidrogênio.

Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

LUCAS GARCIA VINCENZO

“Veículos a hidrogênio – Desafios da nova tecnologia e impactos sobre as matrizes
elétrica e energética do Brasil”

Monografia defendida e aprovada pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Gerhard Ett – PECE/USP

Orientador

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira – PECE/USP

Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. XXXXX

DEDICATÓRIA

À minha família, com amor e gratidão
por todo incentivo a continuidade da
minha formação através deste curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pois é Ele quem me permite prosseguir com meus estudos em prol da evolução tecnológica e apoiar na transformação do planeta em um lugar melhor.

Aos meus pais Pietro o e Sandra, pois foram eles quem sempre me orientaram e me proporcionaram toda base de minha educação e formação, que me permitiu chegar até aqui.

À minha namorada, Bruna, por toda paciência e incentivo ao longo deste curso e na elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gerhard Ett, pela confiança, orientação e apoio neste trabalho;

À Cummins, pelo incentivo à educação e apoio financeiro oferecido a mim durante este curso.

OBRIGADO.

RESUMO

VINCENZO, Lucas Garcia. **Veículos a hidrogênio – Desafios da Nova Tecnologia e Impactos Sobre as Matrizes Elétrica e Energética do Brasil**. 2022 Monografia (Especialista) Programa de Educação Continuada – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

O presente trabalho tem como objetivo detalhar a tecnologia de veículos movidos por células a combustível e indicar os desafios que serão enfrentados para que esta tecnologia seja difundida no Brasil. Dentre os desafios, é destacada a necessidade de gerar o hidrogênio de maneira sustentável, através do chamado hidrogênio verde, e são apresentadas previsões sobre como as matrizes elétrica e energética do Brasil serão impactadas pelo crescimento da demanda por hidrogênio. Além disso, este trabalho também detalha a importância da eletrificação veicular no controle das alterações climáticas e compara tecnologias de veículos a baterias e veículos a células a combustível, elucidando os motivos pelos quais estas tecnologias deverão coexistir, e os motivos pelos quais a tecnologia de células a combustível é a mais promissora para veículos de frotas, veículos de cargas e veículos de transporte de longas distâncias.

Palavras-Chave: Eletrificação Veicular, Veículos a Hidrogênio, Hidrogênio, Geração de Hidrogênio

ABSTRACT

VINCENZO, Lucas Garcia. **Hydrogen Vehicles – Challenges of New Technology and Impacts on the National Energy Matrix.** 2022 Monography (Specialist) Programa de Educação Continuada – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

The present work aims to detail the technology of vehicles powered by fuel cells and indicate the challenges that will be faced for this technology to be disseminated in Brazil. Among the challenges, the need to generate hydrogen in a sustainable way, through the so-called green hydrogen, is highlighted, and forecasts are presented about how Brazil's electrical and energy matrix will be impacted by the growth of the demand for hydrogen. In addition, this work also details the importance of vehicular electrification in controlling climate change and compares battery and fuel cell vehicle technologies, elucidating the reasons why these technologies should coexist, and the reasons why cell technology fuel is the most promising for fleet vehicles, freight vehicles and long-distance transport vehicles.

Keywords: Vehicle Electrification, Hydrogen Vehicles, Hydrogen, Hydrogen Generation

Lista de figuras

Figura 1 - Representação elétrica de um inversor.....	19
Figura 2 – Representação da disposição das bobinas e ângulos de fases	20
Figura 3 – Representação da movimentação dos motores	20
Figura 4 – Funcionamento da célula a combustível	22
Figura 5 – Disposição dos componentes de propulsão e conversão de energia em um veículo	22
Figura 6 - Representação do sistema de refrigeração	24
Figura 7 - Integração dos subsistemas no veículo Toyota Mirai.....	25
Figura 8 - Tabela comparativa de tecnologias veiculares	27
Figura 9 - Código de cores do processo de extração do hidrogênio	31
Figura 10 - Custo da produção de hidrogênio com base em energias renováveis....	34
Figura 11 – Ilustração do processo de eletrólise	35
Figura 12 - Eletrolisador do Parque Tecnológico de Itaipu.....	37
Figura 13 - Matriz energética brasileira em 2020	38
Figura 14 - Matriz elétrica brasileira em 2020	39
Figura 15 - Curva de carga diária no SIN no verão, entre 2000 e 2014	40
Figura 16 - Curva de carga diária no SIN no inverno, entre 2000 e 2014	40
Figura 17 - Curva de aderência a uma nova tecnologia.....	41

Lista de siglas e abreviaturas

A - Ampère, unidade de corrente elétrica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CAT – Climate Action Teams – Agência da ONU responsável por monitorar as ações de redução de impactos climáticos

CC - Corrente Contínua

CCUS – Carbon Capture Usage and Storage – Processo de sequestro de carbono onde o carbono recebe um destino diferente de sua emissão na atmosfera

COP – Conferência das Partes

DC - Direct Current

ECM – Engine Control Module – Módulo de controle de um motor de combustão interna

ECU – Engine Control Unit - Módulo de controle de um motor de combustão interna

EPA - Environmental Protection Agency (EUA)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EUA - Estados Unidos da América

FEM – Força eletromotriz induzida

FGV – Fundação Getúlio Vargas

FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas

IRENA – International Renewable Energy Agency – Agência internacional de energia renovável

ONS – Operador Nacional do Sistema

ONU - Organização das Nações Unidas

PECE - Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica

PEM - Polymer Electrolite Membrane – Membrana de troca de prótons

PTI – Parque Tecnológico de Itaipu

PWM – Pulse Width Modulation – Modulação de comprimento de pulso

RPM - Rotações por Minuto

SIN – Sistema Interligado Nacional

UCM - Unidade de Controle do Motor

USP - Universidade de São Paulo

V - Volt, unidade de diferença de potencial elétrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 FUNCIONAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL.....	15
2.1 SISTEMA DE COMBUSTÍVEL:.....	15
2.2 BANCO DE BATERIAS:	15
2.2.1 RECARGA DAS BATERIAS:	16
2.3 SISTEMA DE CONTROLE E CONVERSÃO DE ENERGIA:.....	17
2.4 MOTOR ELÉTRICO:	19
2.5 CÉLULA A COMBUSTÍVEL:.....	21
2.6 SISTEMA DE EXAUSTÃO:.....	23
2.7 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO:.....	23
2.8 SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR:	25
3 UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL	26
4 COMPARATIVO ENTRE VEÍCULOS A HIDROGÊNIO E OUTRAS TECNOLOGIAS E DESAFIOS DO CENÁRIO DE ELETRIFICAÇÃO VEICULAR.....	27
4.1 NEUTRALIDADE DE CARBONO:	27
4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:	28
4.3 AUTONOMIA:.....	28
4.4 TEMPO DE ABASTECIMENTO:.....	29
4.5 CUSTO DA TECNOLOGIA:.....	30
5 A EXTRAÇÃO DO HIDROGÊNIO E A SUSTENTABILIDADE	31
5.1 O HIDROGÊNIO VERDE.....	33
5.1.1 PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE – ELETRÓLISE DA ÁGUA	34
6 IMPACTOS DOS VEÍCULOS À CÉLULA A COMBUSTÍVEL NAS MATRIZES ELÉTRICA E ENERGÉTICA NACIONAL	38
7 CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Visando reduzir os crescentes impactos ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis, os principais líderes globais vêm se reunindo anualmente nas chamadas Conferências das Partes (COPs), e firmando novos acordos sobre políticas ambientais. Estes acordos estabelecem metas para controlar aumento da temperatura global e reduzir a emissão mundial de gases causadores do efeito estufa. Atualmente, após 26 reuniões da Conferência das Partes, os líderes seguem almejando limitar o aumento da temperatura ambiental em 1,5 °C, em comparação à níveis pré-industriais, e estipulam que para atingir esta meta será necessário reduzir em 45% a emissão dos gases causadores do efeito estufa até 2030. Porém, segundo o último relatório do CAT (programa da ONU que rastreia as lacunas entre as emissões reais e as prometidas no Acordo de Paris), apenas com estas políticas já estabelecidas, a Terra teria sua temperatura elevada em 2,9 °C até o final do século.

Estas metas de redução de emissões, que já são bastante agressivas e que podem precisar serem ainda mais restritivas, representam um grande desafio para os setores de transporte e mobilidade urbana, uma vez que estes setores são majoritariamente dependentes de propulsores de combustão interna, e representam aproximadamente 25% da emissão global destes gases. O caminho para atingir esta meta passa, obrigatoriamente, por normas que exijam maior eficiência e menor nível de emissões destes propulsores, porém, a maioria dos países mais desenvolvidos (como os EUA e países da União Europeia) já contemplam normas de emissões bastante restritivas, e dificilmente poderão assegurar uma redução de 45% nas emissões, ainda considerando tecnologias de motores de combustão interna.

Neste cenário, a eletrificação veicular surge como alternativa para esta redução de emissões destes setores. Porém, a substituição dos motores de combustão interna por motores elétricos proporcionará outros desafios, como o alto custo desta tecnologia, sua limitada autonomia e a infraestrutura precária para recarga destes veículos.

Atualmente, a FIPE (FGV) os carros de passeio com motorização elétrica chegam a ser comercializados com um sobrepreço de 150% em relação ao mesmo modelo com motorização à combustão e os pontos de recarga ainda são escassos, limitando-se a 1300 pontos espalhados pelo país, dos quais mais de 400 encontram-se apenas na cidade de São Paulo. Além disso, apesar das tecnologias dessas

baterias terem evoluído consideravelmente nos últimos anos elas ainda não são capazes de assegurar uma grande autonomia, principalmente quando aplicadas em veículos de carga. Estes fatores tornam esta tecnologia praticamente inviável para um país de dimensões continentais como o Brasil, ao menos no curto prazo, tanto para os veículos de passeio quanto para os veículos pesados.

Para vencer estes desafios, a eletrificação veicular por meio de células a combustível é apontada como a tecnologia mais promissora para os próximos anos, pois reduz a dependência de uma bateria de grande capacidade e pesada (média de 500 kg) ou de recargas frequentes, uma vez que possibilita a geração da energia elétrica no próprio veículo através de um sistema de célula a combustível, alimentado por um tanque de hidrogênio leve (média de 5 kg), ambos acoplados ao veículo.

Ainda assim, para que esta tecnologia se torne viável em nosso país e seja uma solução efetiva para o meio ambiente, precisamos assegurar que o hidrogênio seja produzido de maneira sustentável, o chamado hidrogênio verde, do contrário, estaremos transferindo o problema do transporte para outro setor. Além disso, existem outras preocupações quanto a disponibilidade de pontos de abastecimento de hidrogênio, e também envolvendo a segurança logística e operacional desta fonte de energia, dada sua alta inflamabilidade, assim como acontece com qualquer outro combustível. Estas são preocupações que precisarão ser resolvidas antes desta tecnologia ser amplamente difundida no Brasil.

2 FUNCIONAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

Os veículos elétricos a célula de combustível, também conhecidos com FCEV (sigla para Fuel Cell Electric Vehicle), são veículos movidos por motores elétricos alimentados pela energia convertida no próprio veículo. Estes veículos são abastecidos por uma fonte de combustível, e contam com um sistema de célula a combustível que converte a energia química deste combustível diretamente em energia elétrica.

Os sistemas de propulsão e conversão de energia destes veículos contém, mas não se limitam à:

2.1 SISTEMA DE COMBUSTÍVEL:

O sistema de combustível é onde o gás combustível é armazenado e posteriormente transferido para as células combustível. Este sistema é composto por tanque(s) de combustível cilíndrico(s) onde o gás combustível é armazenado a altas pressões (entre 350 e 700 bar), segundo normas internacionais. Este tanque é abastecido por um bocal localizado no exterior do veículo, similar aos bocais de abastecimento de combustíveis fósseis, porém com os devidos sistemas de segurança e com as devidas vedações para o abastecimento de um gás. Já o sistema de circulação do gás combustível conta com um conjunto de injetores por onde o gás será injetado na célula a combustível, uma válvula reguladora de pressão que regula a pressão com a qual o gás deve chegar aos injetores, uma válvula de purga que permite drenar o condensado para fora do sistema e uma válvula de segurança de corte de fluxo que deve atuar cortando o fornecimento de gás combustível em caso de colisão do veículo;

2.2 BANCO DE BATERIAS:

Este sistema opera em paralelo ao sistema de célula de combustível. Ele é responsável pelo suprimento da energia excedente em momentos de maior demanda, quando a célula a combustível, isoladamente, não é capaz de fornecer 100% da energia elétrica requerida pelo motor. Também é neste sistema que toda energia obtida através do sistema de frenagem regenerativa é armazenada.

Este banco de baterias é composto por um conjunto de células de baterias de íon-lítio que armazenam energia em altas tensões (superiores a 200 VCC). A relação de capacidade de armazenamento de energia e de tensão de armazenamento deste sistema é diretamente proporcional a quantidade de células de baterias que ele é composto, assim, sistemas compostos por mais células de baterias armazenam mais energia e em maior tensão. Por outro lado, o incremento da quantidade de células de baterias também eleva o peso do veículo e a demanda por mais espaço para sua instalação.

A energia armazenada por este banco de baterias é utilizada para alimentar os componentes eletrônicos do veículo, como painel, rádio, sensores, entre outros, e pode ainda ser fornecida ao motor elétrico simultaneamente à energia gerada pela célula de combustível, quando assim determinado pela unidade de controle, para assegurar um melhor desempenho.

2.2.1 RECARGA DAS BATERIAS:

Mesmo com o sistema de célula a combustível integrado ao motor elétrico, o banco de baterias desempenha um papel importante nos FCEVs, sendo o grande responsável por alimentar os componentes eletrônicos equipados no veículo e ainda operar como uma segunda fonte de energia em momentos de alta demanda energética.

Para que todos estes sistemas operem adequadamente, é necessário garantir que as baterias estejam constantemente carregadas. Para isto, os FCEVs contam com diferentes sistemas para recargas de baterias:

- **Recarga por frenagem regenerativa:** Este sistema opera a partir do momento em que o motorista retira o pé do acelerador para iniciar o processo de frenagem. Neste momento, o motor elétrico que propulsiona o veículo deixa de consumir energia e passa a operar como um gerador, aproveitando da inércia de movimento do veículo, e fornecendo energia às baterias. As baterias, por sua vez,

comportam-se como uma carga e ajudam a desacelerar o motor, apoiando assim no processo de frenagem;

- **Recarga pelo sistema de célula a combustível:** Este sistema pode operar como uma alternativa em momentos onde o nível de bateria esteja baixo e a célula de combustível esteja sendo pouco demandada. Neste modo de recarga, a unidade de controle envia comandos à célula de combustível, e esta passa a fornecer parte de sua energia para a recarga da bateria ao mesmo tempo em que segue energizando o motor elétrico. Assim, cria-se uma reserva de energia para futuros momentos de maior demanda.

Em geral, as duas tecnologias citadas acima podem ser disponibilizadas em um mesmo veículo, a depender do projeto do fabricante. Pode ainda existir um terceiro meio de recarregar as baterias através de uma conexão externa com a rede elétrica, porém, este terceiro sistema dificilmente encontra-se disponível em veículos de frota ou veículos de carga por conta do longo tempo necessário para esta recarga.

2.3 SISTEMA DE CONTROLE E CONVERSÃO DE ENERGIA:

Este pode ser considerado o cérebro do sistema de tração e alimentação do veículo movido à célula a combustível. Este sistema é responsável por controlar a velocidade e o torque do motor elétrico, gerenciar a taxa de conversão de energia realizada pela célula a combustível, gerenciar o fluxo de energia a ser destinado ao motor elétrico pela célula de combustível e também pelas baterias, e até mesmo comandar a recarga das baterias através de energia das células combustível.

Este sistema é composto por três componentes principais, a unidade de controle, o conversor de tensão CC/CC e o conversor CC/CA, que também pode é conhecido como inversor ou oscilador.

A unidade de controle é o componente responsável pelo gerenciamento energético do veículo e pode ser, a grosso modo, comparado com a unidade

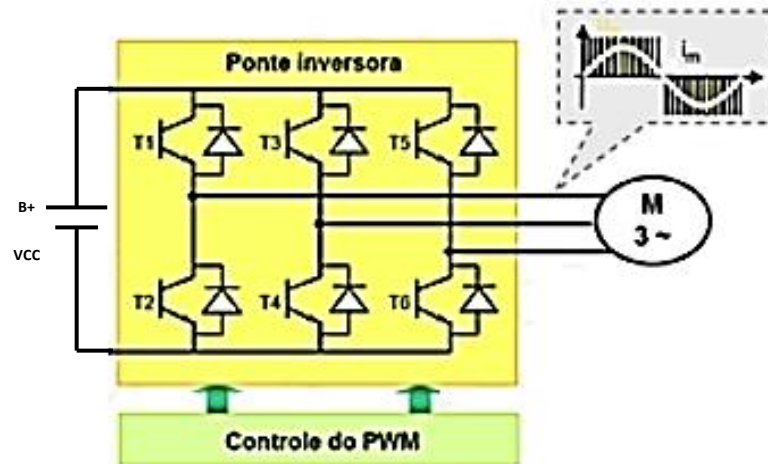
de controle (ECM ou ECU) de um motor a combustão interna. Assim como a ECM de um motor a combustão, este componente também recebe as informações obtidas através dos sensores do veículo (como o sensor de posição do pedal de aceleração e sensores de temperatura e pressão, por exemplo) e controla de maneira instantânea a injeção de combustível para disponibilizar a potência demandada ao motor. Em momento de alta demanda de energia, este sistema comanda uma maior injeção de gás combustível nas células combustível e pode ainda requerer da bateria o fornecimento da energia excedente em paralelo, de mesma maneira, ele pode reduzir a injeção de combustível nas células em momentos em que o motor esteja sendo menos demandado. Além destas funções, este sistema também é responsável por comandar o sistema de conversão DC/AC, controlando a variação de sua frequência.

O conversor de tensão CC/CC é o componente responsável por reduzir a tensão elétrica proveniente do banco de baterias para alimentar outros sistemas embarcados no veículo que operam em menor tensão, como por exemplo a multimídia, o computador de bordo e sistemas de alarme. Em geral, estes sistemas operam em um range compreendido entre 9 V e 24 V, a depender do fabricante, enquanto o banco de baterias armazena energia em tensões superiores a 200 V.

O terceiro componente, o transformador CC/CA, é o responsável por transformar a corrente contínua gerada pela célula a combustível, e também a corrente contínua armazenada no banco de baterias, em tensão alternada para alimentar o motor elétrico do veículo. Este inversor varia a frequência e a tensão da corrente alternada obtida em sua saída conforme a modulação de um sinal PWM emitido pela unidade de controle. Além disso, a energia de corrente alternada obtida na saída deste componente também é dividida em três fases distintas e com seus ângulos de fase defasados em 120° , gerando assim, um sistema de energia trifásico similar ao da rede concessionária que é utilizado para alimentar o motor elétrico.

A Figura 1 abaixo a representação do funcionamento do conversor CC/CA:

Figura 1 - Representação elétrica de um inversor



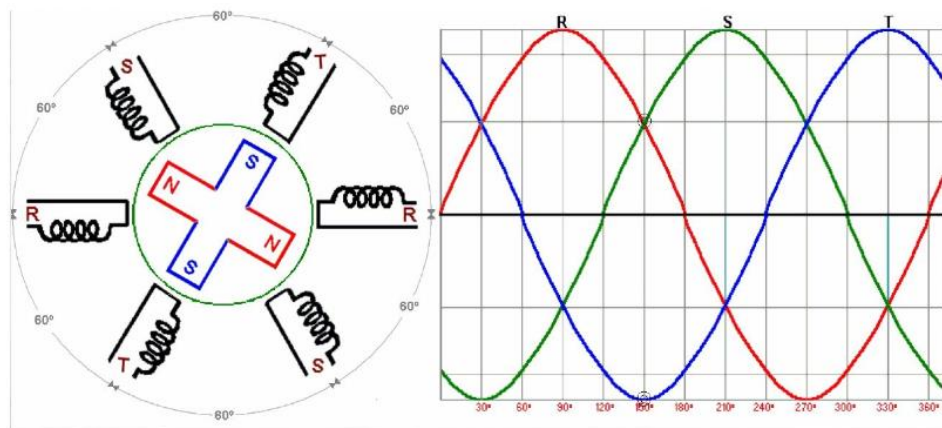
Fonte: Mundo Elétrica, 2022

2.4 MOTOR ELÉTRICO:

O motor elétrico é o grande responsável pela propulsão do veículo. Ele converte a energia elétrica proveniente da célula a combustível e do banco de baterias na energia mecânica que traciona o veículo.

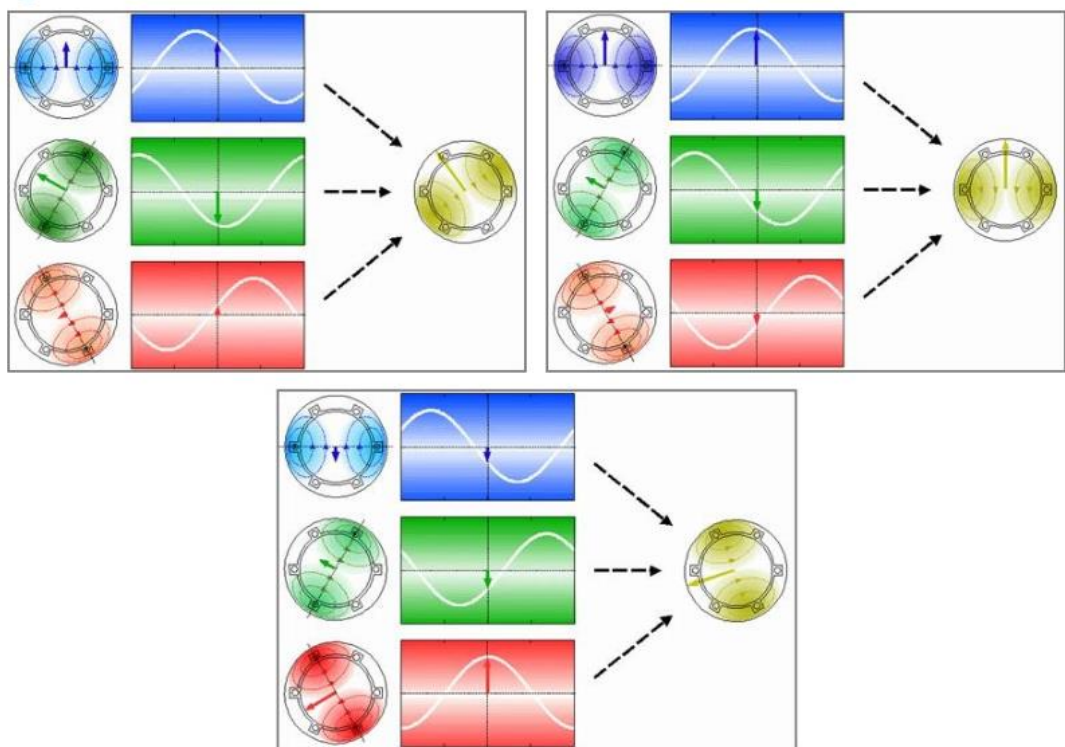
Os motores que tracionam os veículos elétricos à célula a combustível (FCEV) são motores de indução trifásicos que possuem um funcionamento bastante similar aos demais motores existentes no mercado para outras aplicações. Nestes motores, as bobinas do estator são alimentadas pela corrente alternada e produzem um campo magnético girante. Este campo girante provoca uma força eletromotriz induzida (FEM) nos condutores do rotor e forçam o seu deslocamento. A disposição das bobinas do estator, alinhado ao fato de as três fases serem alimentadas com corrente alternada com ângulos de fase deslocados entre si de 120° , fazem com que cada fase tenha um semi-ciclo positivo e negativo em tempos diferentes, possibilitando a inversões de polos em tempos diferentes, e consequentemente permitindo um movimento contínuo no motor. As Figuras 2 e 3 a seguir ilustram os diferentes tempos de cada semi ciclo e a movimentação do rotor do motor em cada um destes momentos.

Figura 2 – Representação da disposição das bobinas e ângulos de fases



Fonte: Trabalho acadêmico Universidade Rio dos Sinos, Leonardo Lisboa Knüppe e Luís Henrique Sefrin, 2013

Figura 3 – Representação da movimentação dos motores



Fonte: Trabalho acadêmico Universidade Rio dos Sinos, Leonardo Lisboa Knüppe e Luís Henrique Sefrin, 2013

Neste tipo de motor, a velocidade e torque do rotor são proporcionais a corrente e a frequência de magnetização do campo girante, que são alimentadas no estator. Desta forma, tanto a velocidade quanto o torque do

rotor deste motor, e consequentemente a velocidade torque do veículo, são controlados pela unidade de controle.

Assim como nos motores a combustão, as performances de cada modelo de motor elétrico variam conforme o seu design e potência, e eles também são conectados a um trem de força para propulsionar o veículo. Porém, os veículos elétricos dispensam a necessidade de uma caixa de câmbio, dado que é possível controlar o torque e rotação dos motores elétricos em todas as condições de sua operação.

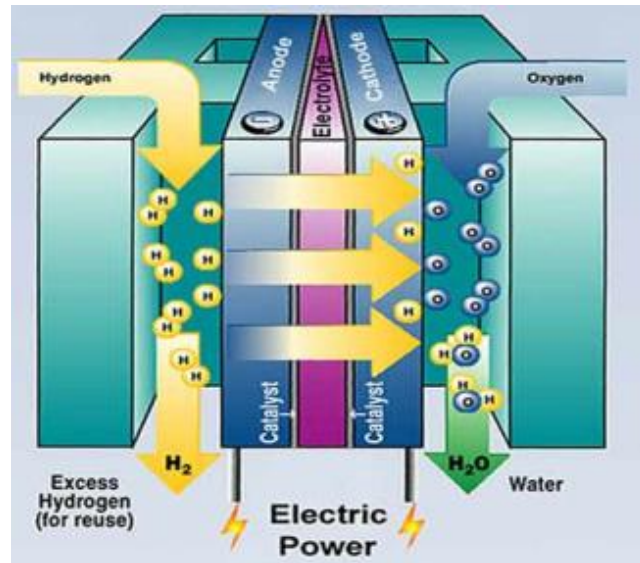
2.5 CÉLULA A COMBUSTÍVEL:

A célula a combustível é o componente responsável pela conversão da energia potencial do gás combustível em energia elétrica através de uma reação eletroquímica similar à reação química realizada em pilhas e baterias.

A célula a combustível é composta por duas placas, uma anódica e uma catódica, feitas de material catalisador, e separadas por uma membrana eletrolítica, também conhecida como membrana de troca de prótons (PEM). O gás combustível (hidrogênio) é inserido pela cavidade do sistema que permite o contato com a placa anódica, e o oxigênio (presente no ar atmosférico) é inserido em outra cavidade que permite o contato com a placa catódica. O gás combustível, em contato com o catalisador e tem suas moléculas divididas em prótons e elétrons. Os prótons do gás combustível migram através da membrana de troca de prótons em direção ao cátodo, enquanto os elétrons, que não são capazes de penetrar a esta membrana, deslocam-se para o cátodo, gerando corrente elétrica. Ao final do circuito elétrico, os elétrons reduzem o oxigênio no cátodo a ânion (O^{2-}), e formam com o cátion (H^+), a água. Estas moléculas de hidrogênio se associam, então, às moléculas de oxigênio e formam $0,65 \text{ Nm}^3/\text{kw}$ de água.

A Figura 4 abaixo ilustra esta reação:

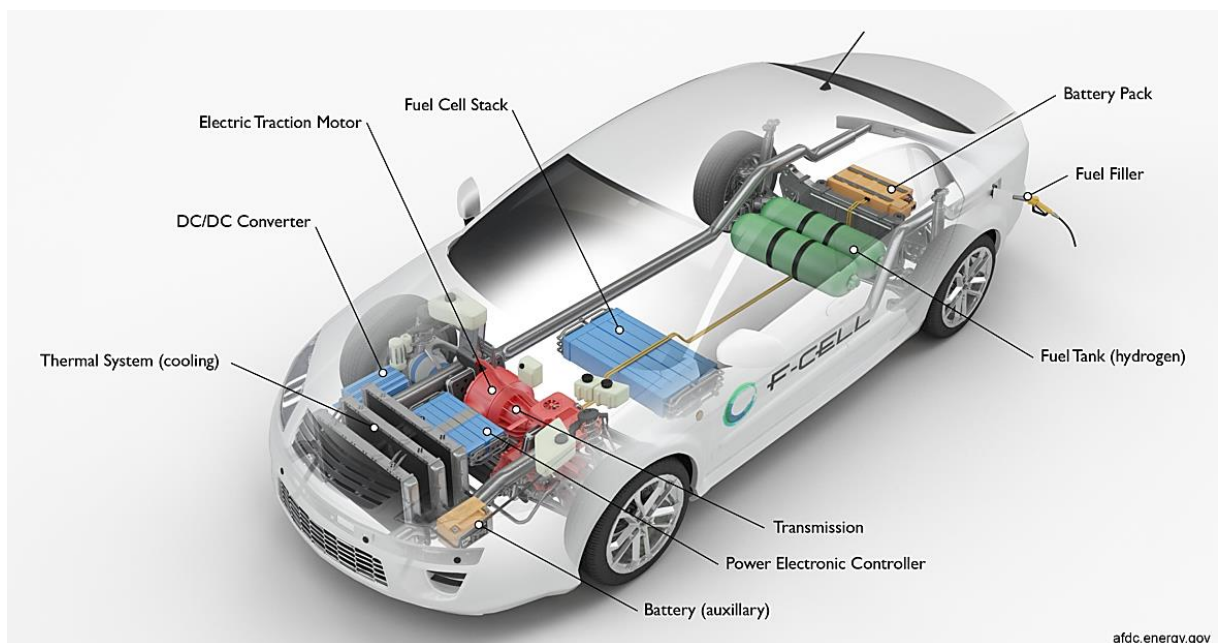
Figura 4 – Funcionamento da célula a combustível



Fonte: Battery University, 2022

A Figura 5 abaixo ilustra como estes sistemas são instalados e integrados sobre o chassi de um veículo:

Figura 5 – Disposição dos componentes de propulsão e conversão de energia em um veículo



Fonte: AFDC – Departamento de Energia dos EUA, 2022

Além destes principais componentes listados acima, a célula a combustível ainda conta com outros sistemas periféricos com os quais interage diretamente para garantir seu pleno funcionamento. Dentre eles vale destacar:

2.6 SISTEMA DE EXAUSTÃO:

O sistema de exaustão é por onde o vapor d'água, subproduto do processo de geração de energia pela célula a combustível, é expelido. Além da tubulação de escape, este sistema conta apenas com um único componente, um silencioso, que tem como objetivo reduzir os ruídos do escapamento.

2.7 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO:

O sistema de refrigeração é o grande responsável por regular a temperatura da célula de combustível e assim mantê-la próxima de sua temperatura de operação (próximo a 80 °C), evitando problemas de superaquecimento e/ou perda de potência. Este é um sistema fechado, composto por um trocador de calor (radiador), uma válvula de controle de temperatura e uma bomba de circulação de fluido refrigerante.

O processo de refrigeração da célula a combustível consiste na circulação de fluido refrigerante frio por este componente, com o apoio da bomba de circulação, para que este fluido absorva seu calor dissipado. Após absorver o calor dissipado, este fluido então aquecido, segue seu fluxo e ingressa no radiador através de seu tanque superior, e percorre os tubos do radiador até o tanque inferior, enquanto troca calor com o ambiente. O processo então reinicia com o fluido refrigerado sendo novamente bombeado para refrigerar a célula a combustível.

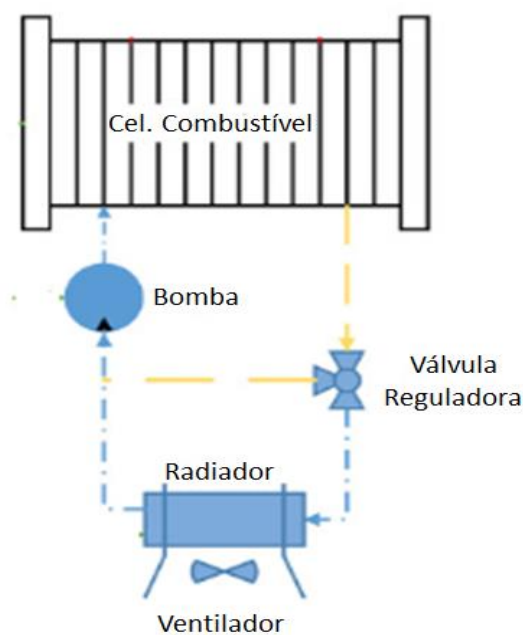
Para otimizar a troca de calor entre o fluido presente no radiador e o meio ambiente, os radiadores são posicionados nas partes frontais dos veículos, e logo à frente dos radiadores são realizadas aberturas através de grades para viabilizar a entrada de ar. Desta forma, a massa de ar que atinge frontalmente o veículo durante seu deslocamento realiza a maior parte da troca térmica com o radiador. Além disso, os veículos também contam com ventiladores localizados atrás do radiador, que sopram no sentido inverso ao radiador, corroborando com o fluxo de ingressão de através das grades frontais.

A válvula reguladora de temperatura, por sua vez, é uma válvula bidirecional que reage à temperatura do fluido refrigerante e direciona este fluido (de maneira parcial ou integral) ao radiador ou o força sua recirculação

na célula a combustível. Durante uma partida do veículo com o sistema ainda frio, esta válvula estará totalmente fechada e forçará que todo fluido refrigerante seja recirculado à célula a combustível, assegurando que a célula a combustível atinja sua temperatura de operação (próxima de 80°C) de maneira mais rápida. Quando a temperatura do fluido refrigerante encontra-se próxima da temperatura de operação da célula a combustível, esta válvula passa a modular a quantidade de fluido que deverá ser recirculado e a quantidade de fluido que deverá ser direcionado ao radiador para ser refrigerado. Quando o fluido atinge plenamente a temperatura de operação da célula a combustível, a válvula é totalmente aberta e todo fluido refrigerante segue ao radiador.

A Figura 6 abaixo ilustra o funcionamento deste sistema.

Figura 6 - Representação do sistema de refrigeração



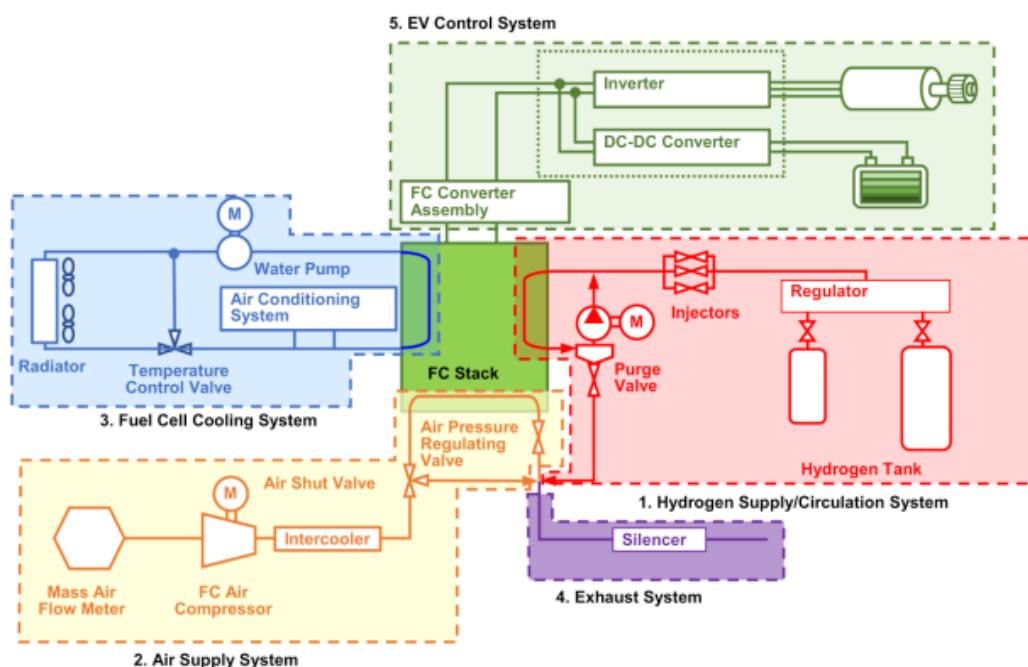
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

2.8 SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR:

O sistema de admissão de ar é responsável por abastecer a célula a combustível com o oxigênio necessário para assegurar a geração de energia. Este sistema é composto por um sensor de massa de ar, um filtro, um compressor e um resfriador de ar (intercooler). Seu funcionamento é bastante simples, o ar ambiente é admitido e filtrado, e na sequência é comprimido. Uma vez que o processo de compressão eleva a temperatura do ar e consequentemente expande seu volume, faz-se necessário resfriar o ar no intercooler antes de injetá-lo na célula a combustível para possibilitar a inserção de um maior volume de ar e consequentemente obter uma maior eficiência. Ao longo de todo este processo, o sensor de massa de ar efetua a medição do volume de ar que está ingressando no sistema e transmite esta informação à unidade de controle, para que ela possa gerenciar a injeção de gás combustível necessário para a reação química.

A Figura 7 abaixo ilustra como estes outros sistemas são integrados à célula a combustível no veículo Toyota Mirai:

Figura 7 - Integração dos subsistemas no veículo Toyota Mirai



Fonte: Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Energy Flow Analysis in Real Driving Conditions (RDC), 2021

3 UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL

Pesquisas são feitas, desde meados dos anos 50, com o intuito de viabilizar o hidrogênio como combustível para motores, porém, a grande parte destas pesquisas considerava o uso do hidrogênio como combustível para motores de combustão interna, dado seu alto poder calorífico e sua alta inflamabilidade. Mais recentemente, o hidrogênio passou a ser estudado como combustível para as células combustível, visando maior sustentabilidade e maior autonomia para motores elétricos, representando assim, uma alternativa aos motores de combustão interna e aos sistemas alimentados exclusivamente por baterias. Dentre os fatores que corroboram para o hidrogênio ser considerado como a melhor alternativa de combustível para células combustível destacam-se:

- **A abundância de hidrogênio na Terra:** O hidrogênio é um dos elementos mais abundantes em nosso planeta, mesmo que relativamente raro em sua forma isolada. Os átomos de hidrogênio estão presentes nas moléculas da água, que em sua forma líquida ocupa 71% da superfície terrestre, e ainda na forma de vapor de água, que por sua vez corresponde a cerca de 4% dos gases de nossa atmosfera. Já o hidrogênio gasoso, isolado de outros elementos, corresponde a apenas 0,5% dos gases de nossa atmosfera, o que nos força a extraí-lo de outras misturas quando desejamos obtê-lo em sua forma isolada (H_2);
- **Rejeito ecológico:** O sistema de célula a combustível a hidrogênio não emite CO_2 nem outros poluentes. Seu rejeito é composto, exclusivamente, de vapor de água, quando utilizado em reações com o oxigênio;
- **Propriedades químicas:** Devido ao seu baixo peso molecular e seus pontos de fusão e ebulição extremamente baixos, é possível armazenar grandes quantidades de hidrogênio pressurizadas na forma gasosa;
- **Produção sustentável:** É possível produzir o gás hidrogênio de maneira ecológica, através de fontes de energia renováveis.

4 COMPARATIVO ENTRE VEÍCULOS A HIDROGÊNIO E OUTRAS TECNOLOGIAS E DESAFIOS DO CENÁRIO DE ELETRIFICAÇÃO VEICULAR

Apesar de os FCEVs se posicionarem como uma excelente alternativa aos veículos com motores de combustão interna para dirimir a emissão de poluentes, e como uma melhor opção do que os veículos elétricos à bateria (EVs) em termos de autonomia, existem outros critérios onde os FCEVs podem ser comparados as demais tecnologias. A Figura 8 abaixo ranqueia estas tecnologias conforme alguns critérios:

Figura 8 - Tabela comparativa de tecnologias veiculares

Comparativo das Tecnologias Veiculares					
Tecnologia	Neutralidade de Carbono	Eficiência Energética	Autonomia	Tempo de Abastecimento	Custo da Tecnologia
Célula Combustível					
Bateria					
Combustão Interna					

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Os critérios adotados para cada uma destas classificações foram:

4.1 NEUTRALIDADE DE CARBONO:

Conforme mencionado nos tópicos anteriores, tanto os FCEVs quanto os EVs são excelentes alternativas para veículos livres de emissões de carbono. Porém, para atingir este objetivo, é importante que a energia elétrica consumida na recarga das baterias dos veículos elétricos, assim como a energia elétrica consumida na produção do hidrogênio que abastece as células combustíveis, tenham sido produzidas através de energias renováveis para que possamos dirimir a emissão de carbono em toda cadeia.

Partindo da premissa de que ambos utilizem de energias renováveis para produzir seus insumos, os FCEVs e os EVs apresentam uma vantagem sobre os veículos de combustão interna neste critério.

4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:

Neste critério os EVs levam larga vantagem frente às demais tecnologias. A cadeia de produção e distribuição da energia elétrica utilizada para recarga das baterias possui perdas pouco significativas quando comparadas com as cadeias de produção das demais formas de energia. Além disso, estes veículos também operam com motores elétricos de alta eficiência, o que possibilita uma eficiência energética de toda cadeia produtiva entre 40% e 70%.

Já os veículos com células de combustível sofrem com perdas muito mais significativas nos processos de produção do gás hidrogênio, compressão, resfriamento e transporte deste gás, além da conversão deste gás em energia elétrica já no veículo. Apesar de também contarem com motores elétricos super eficientes, todo este processo de conversões de energia, repleto de perdas, limitam esta tecnologia a uma eficiência média final entre 23% e 33%.

Já para os motores a combustão o cenário é ainda pior. A extração do combustível fóssil, seu refino e transporte, já demandam um grande consumo energético. Além disso, esta tecnologia ainda está sujeita à baixa eficiência dos motores a combustão interna, que possuem rendimentos inferiores a 23% devido às grandes perdas por calor e atrito. Todos estes consumos de energia no processo produtivo e perdas de eficiência internas do motor, limitam esta tecnologia a eficiências gerais entre 6% e 18%.

4.3 AUTONOMIA:

Em termos de autonomia os veículos à combustíveis fósseis ainda apresentam uma larga vantagem em relação aos EVs, e uma leve vantagem em relação aos FCEVs, quando consideramos motores à diesel. Enquanto os EVs ainda possuem autônominas limitadas por conta de suas baterias, e os FCEVs ainda são uma tecnologia em desenvolvimento, os veículos a combustão já venceram esta barreira da autonomia há muitos anos.

Este é o quesito que, em minha opinião, definirá os mercados onde os EVs e os FCEVs irão se posicionar. Enquanto para veículos de passeio a

autonomia dos EVs, limitada a 600 km, não pareça uma grande barreira para o cotidiano de seus usuários, esta autonomia pode significar uma limitação para veículos de carga, veículos de frotas e outros meios de transporte que obrigatoriamente precisem percorrer longas distâncias antes do próximo abastecimento. Quando tratamos de caminhões pesados que operam majoritariamente em rodovias, veículos de transporte urbano contínuo como ônibus, taxis e transportes por aplicativos, ou até mesmo em meios de transporte de longas distâncias como aviões e navios, é imprescindível que esta autonomia seja drasticamente elevada para suportar as necessidades destas aplicações, e é improvável que as tecnologias de baterias evoluam tão rapidamente quanto às demandas ecológicas por transportes com carbono neutro. Neste cenário, entendo que as tecnologias de célula a combustível serão as mais propícias para atender a estes mercados.

Um ponto de atenção quanto a autonomia dos FCEVs é que, para expandir a autonomia destes veículos, é necessário armazenar quantidades maiores de gás hidrogênio. Felizmente, este é um ponto de grande atenção dos fabricantes deste tipo de veículo, e eles já vem trabalhando em tecnologias de armazenamento seguindo normas internacionais de segurança.

4.4 TEMPO DE ABASTECIMENTO:

Neste critério os FCEVs e veículos a combustão levam ampla vantagem sobre os EVs. Enquanto estas duas tecnologias podem ser reabastecidas em poucos minutos, os veículos elétricos à bateria podem levar horas para ter o seu ciclo de carga completo.

Assim como mencionado no critério de autonomia, este alto tempo de recarga pode não ser um fator decisivo para a tecnologia dos EVs quando pensamos nas pessoas que usam seus carros exclusivamente para deslocar-se ao trabalho e retornar às suas casas, podendo recarregá-los durante a noite, porém, para veículos comerciais, este longo tempo para recargas pode representar significativos impactos financeiros, e novamente

o FCEV se posiciona como a melhor tecnologia de carbono neutro para estas aplicações.

Infelizmente, até o presente momento, os pontos de recarga de EVs e os pontos de abastecimento de FCEVs são extremamente limitados em nosso país, e este deve ser o grande desafio a ser vencido para que estas tecnologias passem a se popularizar nos próximos anos. Além disso, atualmente o Brasil ainda não conta com uma quantidade relevante de plantas de produção de gás hidrogênio em larga escala, o que pode dificultar a penetração desta tecnologia em nossos mercados.

4.5 CUSTO DA TECNOLOGIA:

Devido ao fato de as tecnologias de motores de combustão interna estarem presentes no mercado há muito mais tempo do que as tecnologias de motores elétricos, ela leva ampla vantagem em termos de custo. Apesar disso, é esperado que a popularização dos veículos elétricos possibilite o ingresso de mais fabricantes de veículos e componentes nestes mercados, gerando uma elevação nos volumes, o que deve possibilitar a redução dos custos das tecnologias dos EVs e dos FCEVs em um futuro próximo.

Quando excluimos os motores a combustão deste comparativo e mantemos apenas as opções de motores elétricos, os veículos exclusivamente a baterias levam vantagem em termos de custo por serem uma tecnologia já mais difundida, e também por possuírem um sistema muito mais simples do que o sistema de célula a combustível que conta com sua conversão de energia a bordo.

5 A EXTRAÇÃO DO HIDROGÊNIO E A SUSTENTABILIDADE

Conforme explicado no item 4, apesar da abundante disponibilidade de hidrogênio em nosso planeta, este hidrogênio encontra-se majoritariamente presente em moléculas de outros elementos e precisa ser extraído para que seja aplicado em sistemas de célula a combustível. Existem diferentes processos para a extração de hidrogênio, variando de acordo com o elemento e/ou a fonte de energia que serão utilizados para essa extração. Estes diferentes processos de extração de hidrogênio provenientes de diferentes moléculas apresentam variações nos níveis de emissões de carbono, e são classificados a partir de um código de cores que representa o processo adotado, a fonte energética utilizada e o teor de emissões de carbono resultante.

A Figura 9, abaixo, representa este código de cores do hidrogênio, conforme seu processo de obtenção e teor de emissões de carbono:

Figura 9 - Código de cores do processo de extração do hidrogênio

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Fonte: EPE, 2018

Antes de se aprofundar nos processos descritos nesta tabela, primeiro é necessário entender sobre o conceito de CCUS, que é a sigla em inglês referente ao processo de captura e utilização do carbono. O CCUS é um conjunto de técnicas ou procedimentos que impedem que o carbono rejeitado seja emitido à atmosfera, este carbono é capturado e então destinado a outras aplicações, o que torna um processo com alto teor de emissões um pouco mais sustentável.

A produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis sem captura de carbono são os que apresentam maior teor de emissões de carbono. Os chamados hidrogênio preto, marrom e cinza ainda são os processos produtivos mais baratos e correspondem a mais de 90% da produção global de hidrogênio.

Quando as técnicas de CCUS são aplicadas sobre o processo de reforma vapor do gás natural, o que era anteriormente classificado como hidrogênio cinza passa a ser classificado como hidrogênio azul. O hidrogênio azul é, por definição, mais sustentável do que o cinza, apesar de os resultados em termos de redução de emissões variam conforme as taxas de CO₂ capturadas e a destinação dada a este gás.

O processo mais sustentável a partir do gás natural é o processo de pirólise de metano, o chamado hidrogênio turquesa. Este processo tem como rejeito o CO₂ sólido, o que impede que este gás carbônico seja emitido à atmosfera.

Em geral, o hidrogênio azul e o hidrogênio turquesa se apresentam como alternativas interessantes, em termos de sustentabilidade e diversificação das fontes de hidrogênio, podendo ser adotadas como um meio de transição até o hidrogênio verde. Estes processos podem ainda apresentar melhores resultados em termos de emissões se realizados a partir de biogás e/ou biomassa (o chamado hidrogênio musgo). Neste cenário, é possível atingir resultados de emissões negativas, retirando mais CO₂ da atmosfera durante a cadeia produtiva do que é emitido ao longo do processo de extração do hidrogênio.

Já o hidrogênio verde, que é o hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água quando energizado por fontes sustentáveis de energia, se posiciona como a grande aposta para a produção do hidrogênio sustentável no futuro. A grande vantagem deste processo é que ele é feito sobre a água, matéria que temos em abundância em nosso planeta, e demanda apenas energia elétrica proveniente de fontes renováveis de energia, que por si só já seria necessária para atender às necessidades climáticas e os acordos de reduções de emissões.

Vale citar, também, o hidrogênio amarelo e rosa, que são referentes a processos de eletrólise da água a partir de uma matriz energética mista e a partir de energia nuclear, respectivamente, e ainda o hidrogênio branco que é caracterizado pela extração natural do hidrogênio.

5.1 O HIDROGÊNIO VERDE

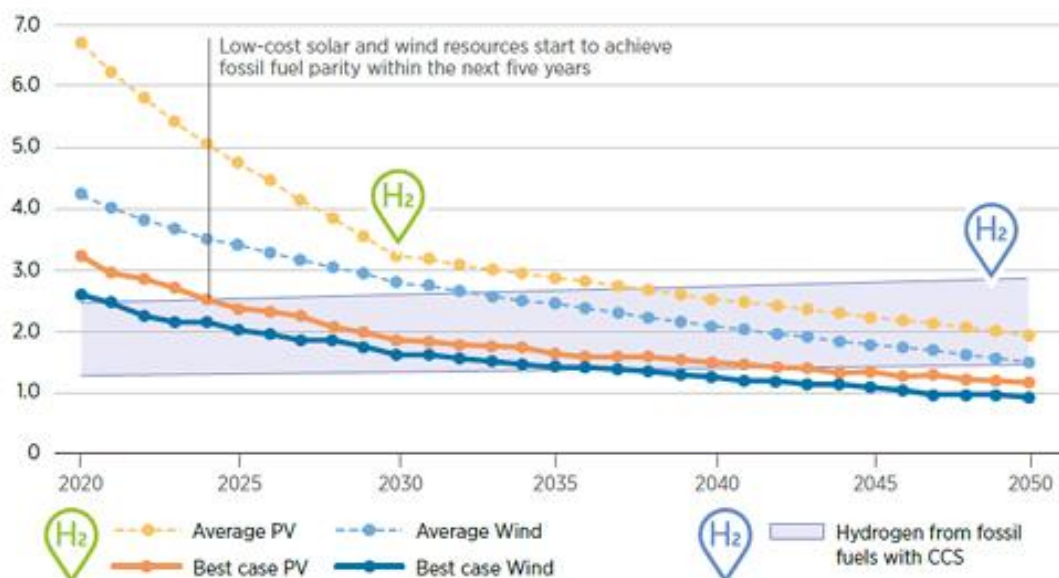
O hidrogênio verde é um tema que vem sendo bastante discutido por ambientalistas como uma alternativa de fonte energética sustentável, ao mesmo passo que vem sendo amplamente difundido por jornalistas da grande mídia. Mas apesar de todo este entusiasmo, esta tecnologia ainda parece estar distante de se tornar o carro chefe da produção global de hidrogênio.

Atualmente o hidrogênio verde representa menos de 4% de todo o hidrogênio produzido no mundo. Isto ocorre porque os custos de produção do hidrogênio através do processo de eletrólise da água ainda são mais elevados do que sua produção através dos combustíveis fósseis, e os equipamentos utilizados neste processo, os chamados eletrolisadores, ainda possuem elevados custos. Além disso, grande parte dos países desenvolvidos ainda não possuem matrizes energéticas limpas, o que dificulta a expansão desta tecnologia.

Por outro lado, um estudo da IRENA (sigla em inglês para Agência Internacional de Energias Renováveis), datado de 2020, aponta uma expectativa da redução nos custos da produção do hidrogênio verde para as próximas décadas, e espera-se que entre 2030 e 2040 o hidrogênio verde possa ser realmente competitivo. Esta redução estaria associada a a redução nos custos de eletrolisadores, tornando-os mais acessíveis, bem como reduções no custo da energia produzida por fontes renováveis, o que já vem sendo uma tendência.

A Figura 10 ilustra a expectativa de redução dos custos de produção de hidrogênio através das fontes de energias renováveis para os próximos anos, separando-as por cada tipo de fonte energética e comparando com o custo da produção do hidrogênio por meio de combustíveis fósseis com captura de carbono.

Figura 10 - Custo da produção de hidrogênio com base em energias renováveis



Fonte: IRENA, 2020

Nesta figura, as linhas tracejadas representam os cenários médios para estes custos, enquanto as linhas contínuas representam o melhor dos cenários. Em laranja são representados os custos para a energia solar, enquanto em azul temos a representação da energia eólica. Já o sombreado azul representa os custos com a produção de hidrogênio através dos combustíveis fósseis com a captura de carbono.

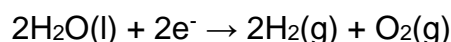
A consolidação destes cenários previstos é imprescindível para que o hidrogênio verde se torne viável e acessível, e com isso possamos efetivamente termos impactos positivos no meio ambiente.

5.1.1 PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE – ELETRÓLISE DA ÁGUA

O processo de eletrólise da água, processo pelo qual se produz o hidrogênio verde, é um processo físico-químico, eletrointensivo, que utiliza de uma fonte de energia elétrica de corrente contínua para quebrar a molécula da água em moléculas de hidrogênio e de oxigênio. Neste processo, dois eletrodos, sendo um anódico (alimentado pelo positivo da fonte de energia) e um catódico (que é conectado ao negativo da fonte

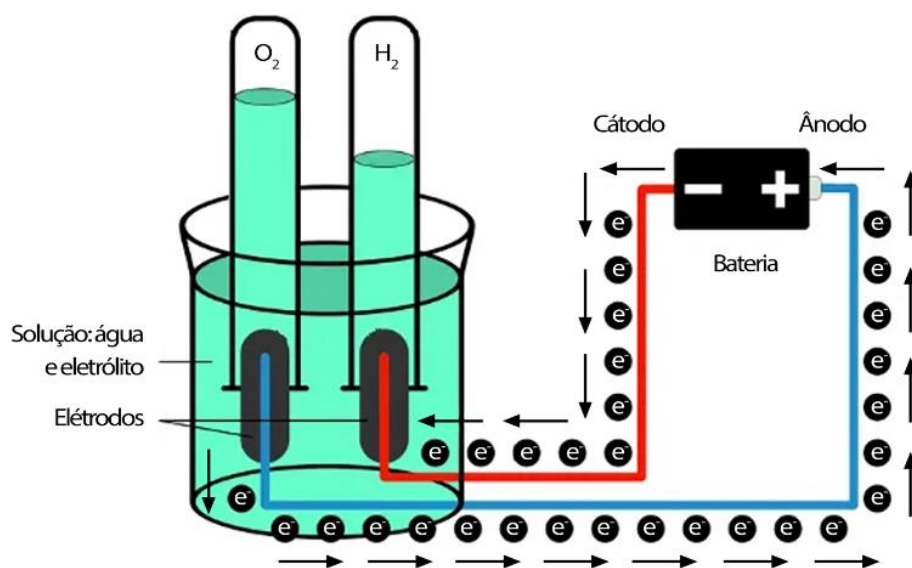
de energia) são mergulhados na água, e através deles é forçada uma passagem de corrente elétrica que realiza esta reação sobre a água. Esta reação gera gás hidrogênio na região do eletrodo anódico e gás oxigênio na região do eletrodo catódico, e este gás pode então ser coletado e armazenado.

A reação química descrita por este processo pode ser descrita por:



A Figura 11 abaixo ilustra de maneira didática como o processo de eletrólise da água funciona, na prática:

Figura 11 – Ilustração do processo de eletrólise



Fonte: Casadasciências, 2022

A eficiência deste processo está diretamente atrelada à tecnologia dos eletrólisadores utilizados, bem como aos eletrólitos aplicados. Os eletrólitos são substâncias como sais, ácidos ou substâncias alcalinas, que podem ser adicionados à água com o intuito de elevar a sua condutividade e facilitar a reação da eletrolise. Já os eletrólisadores são os equipamentos que efetivamente geram a reação da eletrólise. Eles podem ser divididos em três tipos principais:

- **Eletrolisador Alcalino:** Este eletrolisador opera em conjunto a eletrólitos alcalinos (em geral hidróxido de potássio) e é a tecnologia mais empregada atualmente no âmbito comercial, possuindo sistemas disponíveis para potências entre 1,8 kW e 5300 kW. Esta tecnologia apresenta como particularidade um diafragma entre os eletrodos para assegurar que não ocorra a mistura dos gases, após separados;

- **Eletrolisador com Membrana de Troca de Prótons (PEM):** Esta tecnologia é bastante similar à tecnologia da célula a combustível e opera, salvo algumas particularidades, realizando a reação inversa da célula de combustível. Apesar deste sistema apresentar um elevado grau de pureza no hidrogênio extraído, a quantidade de empresas que trabalha com esta tecnologia ainda é pequena, isto ocorre por conta de seu alto custo e de sua vida útil relativamente baixa (entre 10 e 20 anos) quando comparado ao eletrolisador alcalino, que tem vida útil estimada entre 20 e 30 anos. A expectativa do mercado é que ao passo que existam maiores investimentos em pesquisas e desenvolvimentos de células combustíveis a fim de reduzir o custo destes produtos, o custo desta tecnologia de eletrolisadores também seja reduzido;

- **Eletrolisador de Óxido Sólido:** Esta tecnologia é a mais cara das três e a única que depende de altas temperaturas (entre 700 °C e 1000 °C) para operar, o que reduz sua eficiência por conta de seu período de seu aquecimento. Nesta tecnologia adota-se um eletrólito de óxido de metal não poroso, que permite a passagem de íons de hidrogênio no sentido do ânodo para o cátodo.

Em condições normais de temperatura e pressão, a reação físico-química da eletrólise é iniciada a partir 1,23 V de tensão, porém, na

prática, é demandada uma grande fonte de energia, com elevadas tensões e correntes para que este processo atinja escalas industriais. E é exatamente neste ponto que as fontes renováveis de energia entram. Esta energia pode ser gerada e fornecida através de grandes parques de energia solar, eólica ou até mesmo hidráulica, em períodos onde seus recursos não seriam totalmente aproveitados por conta de demandas inferiores à sua capacidade produtiva. Um exemplo desta aplicação, já em operação, é o Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) do Hidrogênio, instalado no Parque Tecnológico de Itaipu (PTI) e dirigido pela hidrelétrica Itaipu Binacional. Este projeto que opera desde 2014 é capaz de produzir 10 Nm³/h de hidrogênio a partir de água vertida turbinável, ou seja, água que não seria aproveitada para a produção de energia. A expectativa deste projeto é que, no futuro, com o crescimento da demanda de hidrogênio, Itaipu possa diversificar sua fonte de receitas e elevar a eficiência total de sua planta em até 5%.

Figura 12 - Eletrolisador do Parque Tecnológico de Itaipu



Fonte: PTI (2021)

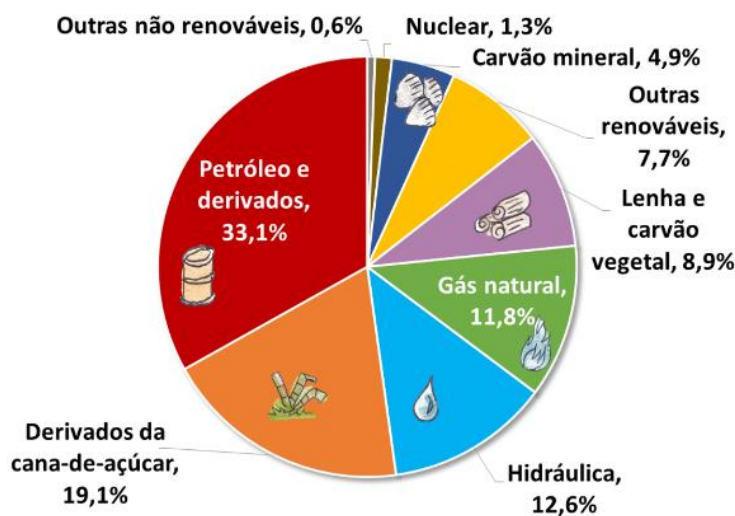
6 IMPACTOS DOS VEÍCULOS À CÉLULA A COMBUSTÍVEL NAS MATRIZES ELÉTRICA E ENERGÉTICA NACIONAL

Considerando os avanços das tecnologias de veículos movidos à célula a combustível e os recentes lançamentos de montadoras que já consideram esse sistema na propulsão de seus veículos, podemos concluir que esta tecnologia estará cada vez mais presente na frota de veículos de nosso país.

O grande objetivo desta tecnologia é proporcionar uma alternativa mais sustentável para os segmentos de mobilidade e transporte, reduzindo a emissão de gases do efeito estufa. Porém, para que estes objetivos sejam atingidos sem que haja aumento na emissão de CO₂ na produção do combustível que alimentará estes veículos, será necessário assegurar que este combustível esteja sendo produzido através de energia limpa, e é neste cenário que hidrogênio verde surge como grande destaque.

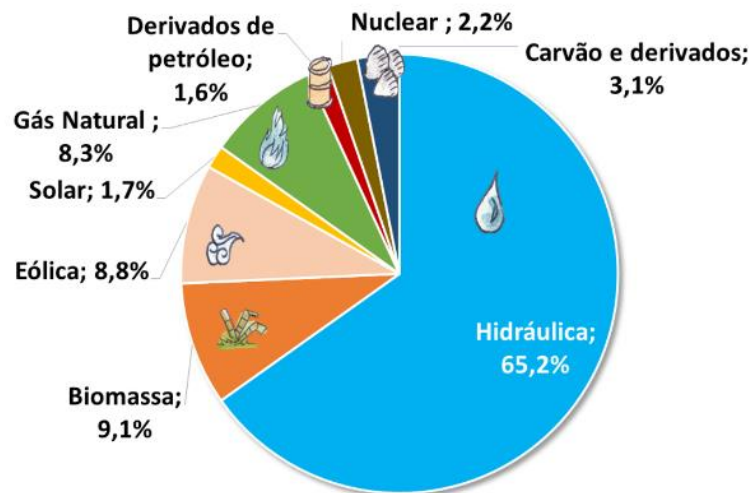
O aumento da demanda pelo hidrogênio verde demandará, também, um aumento na produção de energia por fontes renováveis. Desta forma, a entrada de veículos movidos à célula a combustível no mercado nacional impactará tanto a matriz energética quanto a matriz elétrica brasileira. As Figuras 13 e 14 abaixo ilustram os levantamentos mais recentes sobre a representatividade de cada fonte de energia nas matrizes energética e elétrica nacionais:

Figura 13 - Matriz energética brasileira em 2020



Fonte: EPE, 2022

Figura 14 - Matriz elétrica brasileira em 2020



Fonte: EPE, 2022

A tendência é que o aumento da população de FCEVs eleve a participação de outros combustíveis renováveis na matriz energética nacional, ao mesmo passo que reduzirá a participação dos combustíveis fósseis. Por outro lado, o crescimento de fontes renováveis na matriz elétrica deverá ser defasado (atrasado) em relação ao aumento da população de veículos. Isto deverá ocorrer pois as fontes renováveis de energia que já se encontram em operação em nosso país foram dimensionadas para suprir os picos de demandas energéticas, tanto sazonais quanto horárias, e não possuem sua plena capacidade geradora sendo aproveitada nos demais períodos. Desta forma, parte desta capacidade produtiva, que não é demandada em determinados intervalos de consumo, já poderia ser aproveitada para alimentar os processos de produção de hidrogênio verde e suprir o início da curva de demanda por este combustível.

As Figuras 15 e 16, abaixo, ilustram os diferentes comportamentos das cargas horárias, no Brasil, nos períodos de verão e inverno.

Figura 15 - Curva de carga diária no SIN no verão, entre 2000 e 2014

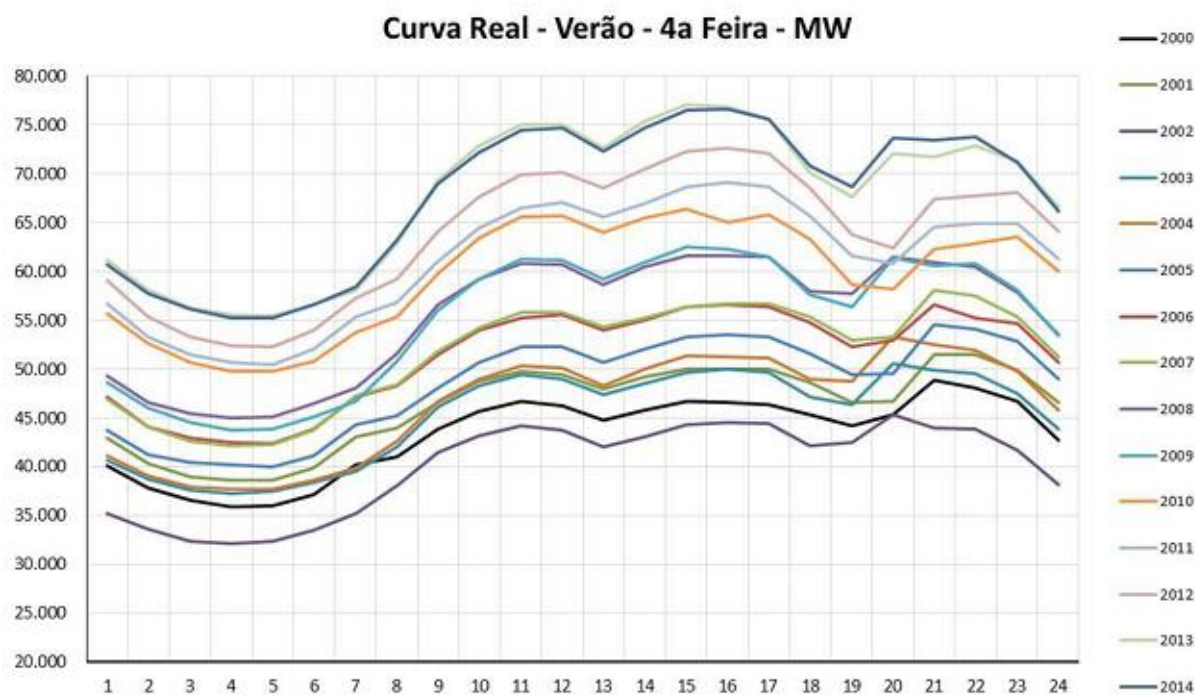
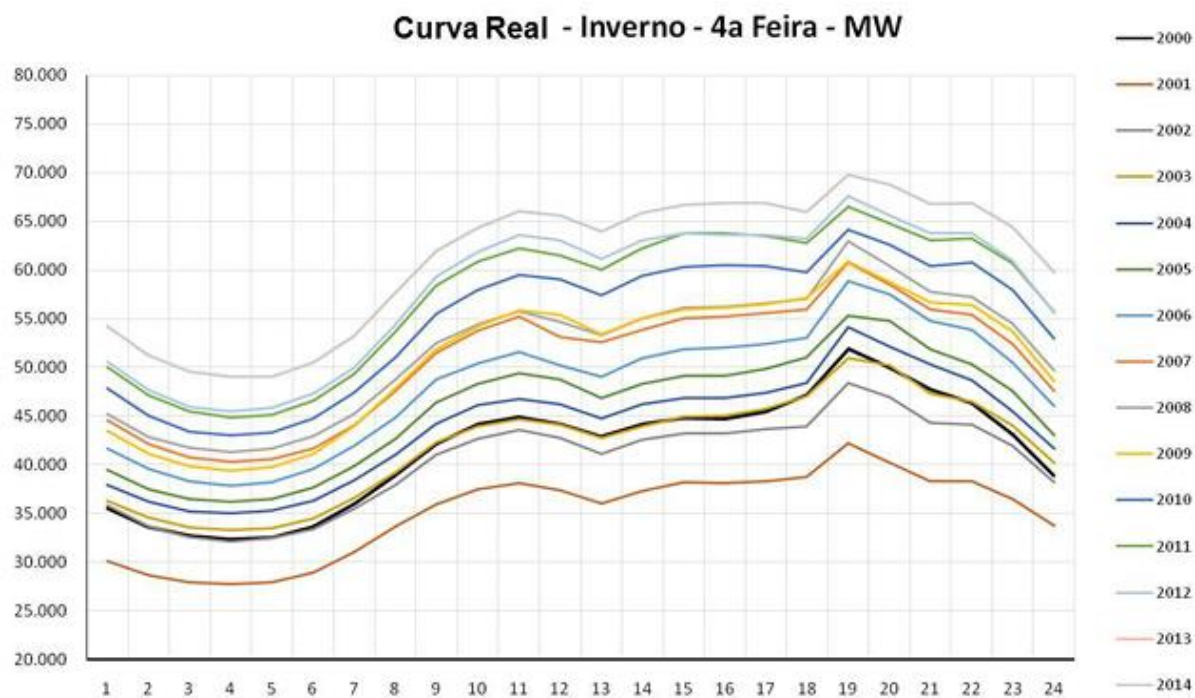


Figura 16 - Curva de carga diária no SIN no inverno, entre 2000 e 2014

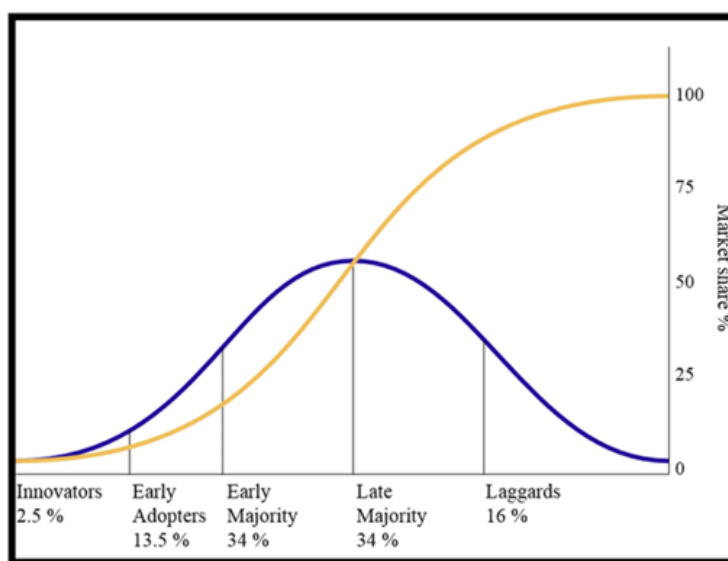
Fonte: EPE, 2015



Nestas figuras é possível notar uma variação considerável no consumo ao longo do dia, com quedas bastante acentuadas nos períodos da madrugada. Além disso, também há uma diferença considerável nas demandas médias entre os períodos de verão e de inverno. Estas diferenças entre as capacidades de geração e as demandas sazonais e horárias podem ser aproveitadas para a produção do hidrogênio verde, aumentando, inclusive, a eficiência total da geral da unidade geradora.

É evidente que, com o crescimento da população de FCEVs, será necessária uma expansão da potência instalada para suprir a demanda de hidrogênio, porém, por ser uma tecnologia nova para nosso mercado, a sua aderência deve acontecer de forma temporalmente dispersa e iniciar com um crescimento lento. A Figura 17 abaixo ilustra a curva de aderência de novas tecnologias no mercado

Figura 17 - Curva de aderência a uma nova tecnologia



Fonte: EPE, 2018

Desta forma, levando em consideração este comportamento para a inserção de FCEVs em nosso mercado, será possível suprir as demandas por hidrogênio no início do ciclo de vida dos FCEVs apenas com as unidades geradoras já existentes, e planejar novos recursos para suprir demandas futuras, seguindo a mesma metodologia já adotada pela ANEEL.

7 CONCLUSÃO

Dada a necessidade de reduzir drasticamente as emissões de gases causadores do efeito estufa, é necessário revisar as matrizes energéticas mundiais e buscar por alternativas energéticas mais sustentáveis e que dependam cada vez menos de combustíveis fósseis. Neste cenário, o setor de transporte e mobilidade será um dos mais afetados, já que é majoritariamente propulsionado por motores alimentados por derivados de combustíveis fósseis e, sozinho, corresponde a 25% de toda emissão global de CO₂.

As alternativas para descarbonizar o setor de transporte passam, obrigatoriamente, pela utilização de propulsores elétricos, para os quais já existem duas tecnologias disponíveis e operando, a tecnologia de veículos elétricos com motores alimentados exclusivamente por baterias (os chamados EVs) e a tecnologia de células combustível abastecidas por gás hidrogênio, capazes de gerar a própria energia elétrica bordo (os chamados FCEVs). Ambas as tecnologias seguem sendo aprimoradas e aparentam ser bastante promissoras. Os EVs são uma tecnologia mais simples e de menor custo, mas com limitações em termos de autonomia e de tempo de recarga, o que deve limitá-la aos mercados de veículos urbanos de passeio. Já os FCEVs são compostos por uma tecnologia mais complexa e ainda com poucos modelos disponíveis em operação, mas que promete solucionar os problemas de autonomia e de abastecimento, e assim atender aos mercados de veículos de carga, veículos de frota e meios de transporte de longas distância, como aviões e navios por exemplo.

Ainda assim, para que esta tecnologia de FCEVs torne-se viável no Brasil, haverá a necessidade de reduzir os custos desta tecnologia, o que poderá demandar incentivos para que empresas tenham o interesse em produzi-la e assim gerar concorrências na cadeia produtiva dos principais componentes. Além disso, será necessário assegurar que a produção do combustível que alimentará estas células combustível seja feita de maneira sustentável, evitando assim que haja um aumento nas emissões de CO₂ em outro segmento. Para isso, também far-se-ão necessários investimentos na produção de hidrogênio verde.

Felizmente, a matriz energética brasileira é predominantemente composta por fontes renováveis de energia e é bastante diversificada em termos territoriais e de tecnologias, e dadas as variações sazonais e horárias de carga, ela já pode absorver

parte da demanda inicial por hidrogênio verde que acompanhará a inserção desta tecnologia no país. Ela também é planejada com antecedência visando futuros crescimentos de demandas, o que deverá possibilitar a acomodação da curva de crescimento da produção de hidrogênio verde através do processo eletrólise, e, no futuro, também já deverá estar preparada para absorver as demandas de produção do hidrogênio verde em larga escala.

Com todas estas barreiras já vencidas, o desafio final para a expansão desta tecnologia será a ampliação da quantidade de pontos de abastecimento, o que deverá ocorrer de maneira orgânica, acompanhando o crescimento da frota de veículos com esta tecnologia.

REFERÊNCIAS

Setor de transportes contribui com 25% das emissões de gases no mundo.

Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2015/12/1533881-setor-de-transportes-contribui-com-25-das-emissoes-de-gases-no-mundo#:~:text=Segundo%20as%20Na%C3%A7%C3%B5es%20Unidas%2C%20os,das%20emiss%C3%B5es%20ligadas%20%C3%A0%20energia>>.

Acesso em: 16 de agosto de 2022

Monografia: Barreto, Gustavo de Andrade. Avaliação de metodologias de aplicação de oxihidrogênio em motores de combustão interna.

Programa de Educação Continuada Poli – Universidade de São Paulo - 2014

COP26: um breve resumo sobre os principais acordos.

Disponível em: <https://blog.waycarbon.com/2021/11/cop26-um-breve-resumo-sobre-os-principais-acordos/>.

Acesso em: 16 de agosto de 2022

COP e seus acordos.

Disponível em: [https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/cop#:~:text=A%20Confer%C3%Aancia%20das%20Partes%20\(COP,o%20p laneta%20e%20negociar%20acordos](https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/cop#:~:text=A%20Confer%C3%Aancia%20das%20Partes%20(COP,o%20p laneta%20e%20negociar%20acordos).

Acesso em: 16 de agosto de 2022

Valor médio de comercialização dos veículos elétricos.

Disponível em: <https://veiculos.fipe.org.br/?moto/honda/7-2020/811130-8/2019/g/gw3hkpbyf8r#moto&moto-codigo>.

Acesso em 16 de agosto de 2022

Does a Hydrogen Car Need Batteries?

Disponível em: <https://www.hydrogenfuelnews.com/do-hydrogen-car-need-batteries/8551423/>.

Acesso em 13/09/2022

Como funcionam os carros a hidrogénio?

Disponível em: <https://www.maistecnologia.com/como-funcionam-os-carros-a-hidrogenio/>

Acesso em 13 de setembro de 2022.

How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?

Disponível em: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>

Acesso em 13 de setembro de 2022.

Hydrogen Fuel Cell Vehicles

Disponível em: <https://www.epa.gov/greenvehicles/hydrogen-fuel-cell-vehicles>

Acesso em 15 de setembro de 2022

Monografia: Vicente de Lima Gongora, Sistema de Fornecimento de Potência a partir de Célula de Combustível utilizando Conversor Estático com Modulação Delta Modificada

USP São Carlos 2017

Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Architecture

Disponível em: <https://www.mathworks.com/videos/fuel-cell-electric-vehicle-fcev-architecture-1655879985593.html>

Acesso em 15 de setembro de 2022

Tesla Model 3: O mais barato de Elon Musk

<https://www.noticiasautomotivas.com.br/tesla-model-3/>

Acesso em 15 de setembro de 2022

Artigo científico - Energy conversion in motor vehicles

Autor Andrzej Szałek

SZAŁEK, A. Energy conversion in motor vehicles. Combustion Engines. 2020, 183(4), 50-57.

Disponível em: <https://doi.org/10.19206/CE-2020-408>

Monografia: An evaluation of future energy conversion systems including fuel cell
T. S. Saitoh¹ , A. Yoshimura² & N. Yamada¹ ¹ Graduate School of Environmental
Studies, Tohoku University, Sendai, Japan ² Yanmar Co. Ltd., Japan

CÉLULA A COMBUSTÍVEL, COMO FUNCIONA

Disponível em: <https://autoentusiastas.com.br/2021/03/celula-a-combustivel-como-funciona/#:~:text=Sistemas%20de%20c%C3%A9lulas%20a%20combust%C3%ADvel,forem%20alimentadas%20por%20um%20combust%C3%ADvel.>

Acesso em 15 de setembro de 2022

REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE ISSN 2763-8928 ACERTTE -Administração,
Ciências Contábeis, Economia, Turismo, Tecnologia e Engenhariav.1, n.6,
2021HIDROGÊNIO COMO FONTE ALTERNATIVA DE COMBUSTÍVEL
AUTOMOTIVO: UMA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA EXPLORATÓRIAHYDROGEN
AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF AUTOMOTIVE FUEL: AN EXPLORATORY
BIBLIOGRAPHIC RESEARCHBeatriz Beca Figueiredo¹, Francisco Ignácio Giocondo
Cesar²e1649

Disponível em: <https://doi.org/10.47820/acertte.v1i6.49>

Introducing the all-new Toyota Mirai

Disponível em: <https://newsroom.toyota.eu/introducing-the-all-new-toyota-mirai/>

Acesso em 15 de setembro de 2022

Motor elétrico automotivo: entenda as diferenças e vantagens

Disponível em: <https://chiptronic.com.br/blog/motor-eletrico-automotivo-entenda-as-diferencas-e-vantagens>

Acesso em 15 de setembro de 2022

O que é inversor de frequência?

Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-inversor-de-frequencia/>

Acesso em 15 de setembro de 2022

Controle de tensão do estator de um motor de indução

Disponível em: <https://illustrationprize.com/pt/414-stator-voltage-control-of-an-induction-motor.html>

Acesso em 15 de setembro de 2022

Trabalho acadêmico:

Alunos: Leonardo Lisboa Knüppe e Luís Henrique Sefrin

Universidade Vale do Rio dos Sinos - São Leopoldo

21 de agosto de 2013.

Pesquisa sobre Campo Girante Trifásico

Disponível em: <https://leoknuppe.wordpress.com/2013/11/07/272/>

Research on Temperature Control of Fuel-Cell Cooling System Based on Variable Domain Fuzzy PID by Yuru Jia 1,Ruiliang Zhang 2,3,*,Xue Lv 2,Tao Zhang 2 andZhengwu Fan 2,3

Department of Mechatronic and Vehicle Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China

Department of Vehicle Engineering, School of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Automotive Design Engineering Technology Research Center, Taiyuan 030024, China

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10030534>

Publicado em: 8 March 2022

How does the Fuel Cell Work?

Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-210-how-does-the-fuel-cell-work>

Acesso em 16 de setembro de 2022

Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science

Disponível em: <https://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899>

Acessado em 11 de outubro de 2022

Monografia pós graduação em química

Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável

Paiva, Suelya da Silva Mendonça de

Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548>

Acessado em 29 de outubro de 2022

Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>

Acessado em 29 de outubro de 2022

IRENA, Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050, IRENA, 2020. Ito, H., et al. Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions. International journal of hydrogen energy, 36, 10527 - 10540, 2011.

Disponível em: <https://doi:10.1016/j.ijhydene.2011.05.127>

Acessado em 29 de outubro de 2022

Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio

Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2022/025/>

Acessado em 01 de novembro de 2022

Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) do Hidrogênio

Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/relatorios/2014/pse-pesquisas-hidrogenio.pdf>

Acessado em 01 de novembro de 2022

Por que e como produzir hidrogênio verde?

Disponível em: <https://www.pti.org.br/por-que-e-como-produzir-hidrogenio-verde/>

Acessado em 01 de novembro de 2022

Matriz Energética e Elétrica

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

Acessado em 01 de novembro de 2022

NOTA TÉCNICA DEA 01/15 Estimativa da Capacidade Instalada de Geração Distribuída no SIN: Aplicações no Horário de Ponta

Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2001%20-](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2001%20-%20Geração%20Distribuída%20no%20Horário%20de%20Ponta[1].pdf)

[%20Geração%20Distribuída%20no%20Horário%20de%20Ponta\[1\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2001%20-%20Geração%20Distribuída%20no%20Horário%20de%20Ponta[1].pdf)

Acessado em 01 de novembro de 2022

Eletromobilidade e Biocombustíveis

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Eletromobilidade%20e%20Biocombustiveis.pdf>

Acessado em 01 de novembro de 2022