

TECNOLOGIA DO HIDROGÊNIO PARA A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR DE TRANSPORTE: ANÁLISE DO TOYOTA MIRAI COM O SOFTWARE ADVISOR

Wilson José Feroni ⁽¹⁾ (wilson@ifes.edu.br), Isabel Aymara Balbataham Silva Barbosa ⁽²⁾ (isabel.barbosa@edu.ufes.br), Rafael Dos Santos ⁽³⁾ (santosrafael573@gmail.com), Julian David Hunt ⁽⁴⁾ (julian.hunt@kaust.edu.sa), Oldrich Joel Romero ⁽⁵⁾ (oldrich.romero@ufes.br)

⁽¹⁾ Instituto Federal de Educação do Espírito Santo (Ifes); Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico (EBTT); Brasil

⁽²⁾ Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes); Graduanda em Engenharia de Petróleo; bolsista do PRH-ANP 53.1 Ufes; Brasil

⁽³⁾ Suzano; Estagiário de Logística Florestal; Brasil

⁽⁴⁾ King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Pesquisador, Arabia Saudita

⁽⁵⁾ Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes); Professor do Programa de Pós-graduação em Energia; Brasil

RESUMO: *Este estudo utiliza o software de simulação Advanced Vehicle Simulator (Advisor) para avaliar o desempenho de um veículo híbrido de célula de combustível, Toyota Mirai, em condições de tráfego urbano. O objetivo é compreender a eficiência energética e as emissões do Mirai e contribuir para o debate sobre o desempenho dos veículos movidos a hidrogênio. A metodologia envolveu a utilização do Advisor para simular o ciclo de condução, analisando o perfil de velocidade do veículo, o estado de carga da bateria, potência da célula de combustível, torque e rotação do motor. Os resultados mostram que durante o ciclo de condução, o Toyota Mirai tem alta potência e zero emissões de poluentes. O estudo conclui que veículos a células de combustível, como o Mirai, têm potencial para contribuir na descarbonização do setor de transporte urbano, apesar dos desafios relacionados ao custo de combustíveis e infraestruturas, além de destacar a importância da continuidade em pesquisas para superar barreiras à adoção desta tecnologia.*

PALAVRAS-CHAVE: HIDROGÊNIO, CÉLULA DE COMBUSTÍVEL, ADVISOR, MIRAI.

HYDROGEN TECHNOLOGY FOR DECARBONIZING THE TRANSPORT SECTOR: ANALYSIS OF TOYOTA MIRAI WITH SOFTWARE ADVISOR

ABSTRACT: *This study uses the Advanced Vehicle Simulator (Advisor) software to evaluate the performance of a hybrid fuel cell vehicle, the Toyota Mirai, under urban traffic conditions on Manhattan Island. The aim is to understand the energy efficiency and emissions of the Mirai and contribute to the debate on the performance of hydrogen-powered vehicles. The methodology involved using Advisor to simulate the driving cycle, analyzing the vehicle's speed profile, battery state of charge, fuel cell power, torque, and engine RPM. The results show that during the driving cycle, the Toyota Mirai exhibits high power and zero pollutant emissions. The study concludes that fuel cell vehicles, like the Mirai, have the potential to contribute to the decarbonization of the urban transportation sector, despite challenges related to fuel costs and infrastructure, and highlights the importance of continued research to overcome barriers to the adoption of this technology.*

KEYWORDS: HYDROGEN, FUEL CELL, ADVISOR, MIRAI.

1. INTRODUÇÃO

Devido aos crescentes alertas e evidências científicas sobre as mudanças climáticas, existe a necessidade de redução da nossa dependência dos combustíveis fósseis. Isso se deve ao reconhecimento de que a queima de derivados de petróleo, do gás natural e do carvão são as principais causas do aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, contribuindo significativamente para o aquecimento global e os eventos climáticos extremos (IPCC, 2021).

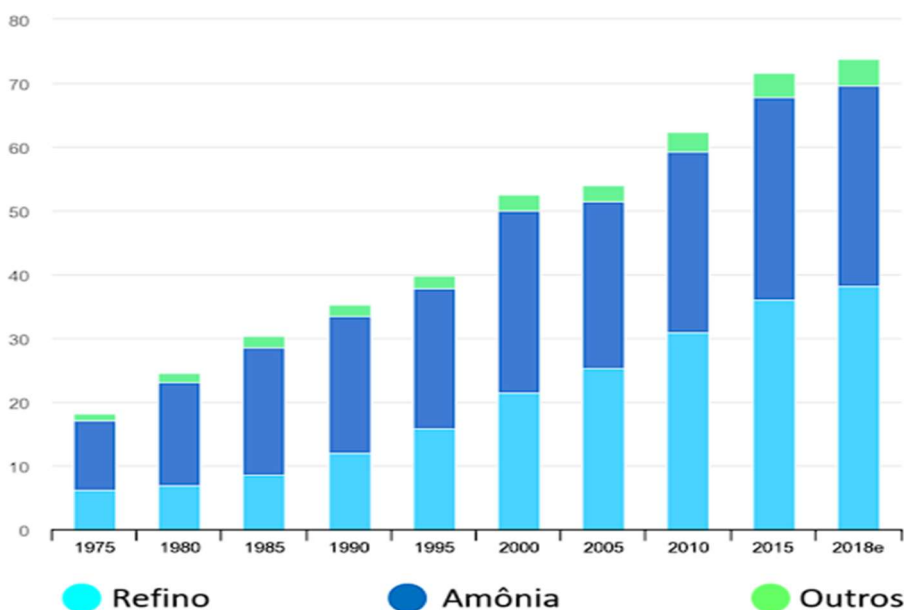
Ao mesmo tempo, é inegável que o desenvolvimento econômico e social da humanidade está intrinsecamente ligado ao aumento da demanda por energia. Esta demanda é suprida desde o século 19, em maior proporção pelos hidrocarbonetos, dado sua elevada densidade energética, baixo custo de extração e ser independente das condições climáticas como sol e vento, necessárias para as fontes alternativas. Em países desenvolvidos, onde o consumo per capita de eletricidade pode chegar a 10 mil kWh, essa correlação é mais do que evidente. No entanto, em nações subdesenvolvidas, o consumo per capita de eletricidade mal ultrapassa 2 mil kWh. Estas diferenças em acesso e uso das fontes de energia sublinha a necessidade urgente de melhorar sua distribuição, ao mesmo tempo que se busca fontes de energia sustentáveis como parte integrante do processo de ascensão de países em desenvolvimento (FAPESP, 2007).

Nesse contexto, as energias renováveis, em particular a energia eólica e a energia solar, têm ganhado destaque como alternativas viáveis para algumas das funções desempenhadas pelos combustíveis fósseis. Elas representam uma parcela cada vez maior da oferta global de energia, e essa tendência é esperada aumentar para os próximos anos. No entanto, é importante observar que, embora a oferta de algumas fontes fósseis, como o gás natural e o petróleo, tenha diminuído no decorrer do tempo, a oferta de carvão, uma das fontes mais poluentes, tem aumentado em alguns lugares do mundo (IEA, 2023). Isso ressalta a importância contínua de implementar fontes renováveis e tecnologias mais limpas.

No cenário atual, o hidrogênio se apresenta como uma das melhores alternativas aos combustíveis fósseis. O hidrogênio é versátil e pode ser produzido a partir de diversas fontes de energia, incluindo as renováveis, como a energia solar e a eólica, bem como de forma mais sustentável a partir da eletrólise da água, quando a eletricidade usada é gerada de maneira limpa.

Segundo GBEP (2021), o hidrogênio possui uma ampla variedade de aplicações industriais, as quais se destacam na Figura 1. Como pode ser observado, a demanda global por hidrogênio mais que triplicou em comparação a meados de 1970, superando a marca dos 70 Mt em 2018. Sendo a atividade de refino de óleo combustível a que mais tem contribuído para este aumento, além da crescente procura por fertilizantes que empregam amônia como o principal insumo.

FIGURA 1: Setores industriais que mais utilizam hidrogênio no mundo.



Fonte: GBEP (2021).

Conforme a IEA (2019), a maior parte do hidrogênio atualmente é utilizado em três setores industriais: refino de petróleo, produtos químicos e obtenção de ferro e aço. A produção de hidrogênio para atender às demandas desses setores ocorre necessariamente em escala comercial e é fundamentada no uso do gás natural, carvão e petróleo, acarretando impactos ambientais associados. É o denominado hidrogênio cinza. Contudo, existem tecnologias disponíveis para mitigar essas emissões, através da produção e fornecimento de hidrogênio com baixo teor de carbono. Em alguns casos, essas alternativas já estão sendo implementadas quando há suporte de políticas e viabilidade econômica (Dos Santos e Romero, 2024).

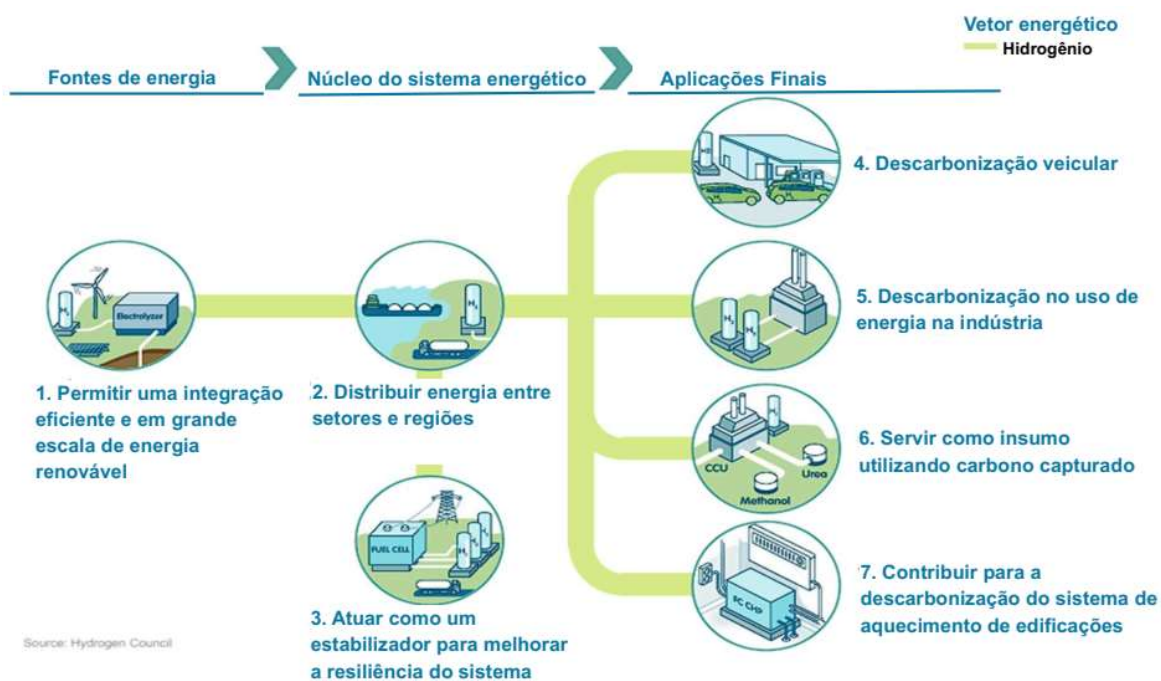
1.1 Aplicação do hidrogênio no setor de transporte

Devido às suas propriedades singulares, o hidrogênio tem se mostrado um agente poderoso na transição energética que o mundo está vivenciado, com benefícios tanto para o sistema energético quanto para aplicações finais. O Hydrogen Council (2017a) cita as formas em que o hidrogênio pode contribuir na descarbonização de setores da economia (Figura 2).

No setor de transportes, os veículos elétricos híbridos a pilhas de combustível (*Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles* – FCHEV) representam uma alternativa promissora aos combustíveis convencionais. Como já mencionado, os derivados do petróleo são dominantes na matriz de combustíveis para transporte, contribuindo significativamente com as indesejadas emissões globais

de carbono. A gasolina e o diesel representam 96% do consumo total de combustíveis e 21% das emissões globais de carbono.

FIGURA 2: Participação do hidrogênio na descarbonização dos principais setores da economia.



Fonte: Hydrogen Council (2017b).

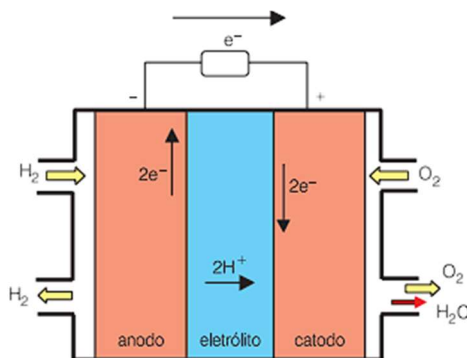
A transição para veículos de emissão zero é essencial, e tanto os FCHEVs movidos a hidrogênio quanto os veículos elétricos a bateria (BEV – *Battery Electric Vehicle*) desempenham papéis complementares nesse processo. Ambos fazem uso de tecnologias semelhantes e oferecem soluções adequadas para diferentes segmentos e clientes. A rigor, analisando todo o processo envolvendo a fabricação, funcionamento e descarte destes veículos, emissão zero é um conceito difícil de ser atendido. É uma temática ampla e controversa uma vez que envolve a extração de minerais (Lítio, cobalto, níquel, manganês, grafite, alumínio, cobre, terras raras, nióbio, entre outros) que são escassos na natureza.

Segundo Silva *et al.* (2022) veículos movidos a hidrogênio oferecem inúmeras vantagens, como ausência de baterias, emissões zero de gases de efeito estufa, maior autonomia e potência. Apesar de desafios como custos elevados e questões de segurança, a perspectiva é que, com a abertura do mercado e produção em massa, essas limitações possam ser superadas. A tendência aponta para uma adoção significativa desses veículos, com previsão de 150 milhões de vendas até 2050.

Silva *et al.* (2022) citam quatro principais tipos de células a combustível de hidrogênio: membrana de troca de prótons (PEM – *Proton Exchange Membrane*), células diretas de combustível de metanol (MET direct FC – *Methanol direct Fuel Cell*), célula de combustível de óxido sólido (SOFC – *Solid Oxid Fuel Cell*) usando gás natural e SOFC usando biodiesel.

Segundo Bonci (2021), as células do tipo PEM possuem como eletrólito uma membrana polimérica sólida feita de ácido perfluorosulfônico também chamado de NAFION. Ao inserir hidrogênio e oxigênio a sua camada porosa de eletrólito comprime a membrana. Completando o conjunto há um catalisador que acelera a reação química de quebra das moléculas (Figura 3), o hidrogênio gasoso penetra através da estrutura porosa do ânodo, dissolve-se no eletrólito e reage nos sítios ativos da superfície do eletrodo, liberando elétrons e formando prótons (H^+). Os elétrons liberados na oxidação do hidrogênio chegam ao cátodo por meio do circuito externo e ali participam da reação de redução do oxigênio. Os prótons formados no ânodo são transportados ao cátodo, onde reagem formando água.

FIGURA 3: Esquema de célula a combustível de hidrogênio.



Fonte: Alves (2012).

Ainda de acordo com Silva *et al.* (2022), as células do tipo MET *direct FC*, semelhantes às PEM, oferecem facilidade de recarga, baixa poluição e custos reduzidos em comparação com as de hidrogênio, embora tenham menor potência específica e densidade de energia. Essa tecnologia utiliza metanol, um combustível líquido disponível em postos existentes, proporcionando vantagens em termos de simplicidade e eficiência em temperaturas mais baixas.

As células de combustível SOFC permitem a geração centralizada de energia, sendo versáteis quanto ao combustível, podendo utilizar diferentes hidrocarbonetos. As SOFC de gás natural, utilizam esse gás como combustível. Seu funcionamento envolve a quebra do gás natural em carbono e hidrogênio, com o hidrogênio alimentando a célula. A reação de oxidação do combustível, liberando elétrons e água, ocorre entre o ânodo e o cátodo, gerando eletricidade para alimentar o veículo. Essa

tecnologia oferece alta eficiência e aplicabilidade generalizada, convertendo diretamente o gás natural em hidrogênio, sem a necessidade de um reformador, reduzindo os custos de produção.

O biodiesel é um combustível desenvolvido a partir de óleos vegetais, destinado a substituir o diesel, mantendo comportamento e características semelhantes. Tanto o diesel quanto o biodiesel, ricos em hidrocarbonetos, demonstram potencial para conversão em células de combustível SOFC, devido à sua elevada densidade energética e conteúdo substancial de hidrogênio. A aplicação do biodiesel em células de combustível não apenas compartilha essas propriedades, mas também oferece benefícios ambientais, sendo uma fonte renovável e verde. O processo de adaptação para células de combustível envolve a evaporação do combustível líquido em um reformador, transformando-o em fase gasosa a altas temperaturas para gerar hidrogênio, utilizado nas células SOFC.

Estudos conduzidos por Turkmen, Solmaz e Celik (2017) evidenciam que a eficiência da célula de combustível operada diretamente por hidrogênio puro é maior do que a eficiência da célula de combustível operada por hidrogênio produzido a partir da reforma de hidrocarbonetos.

Os FCHEVs apresentam vantagens significativas, como a capacidade de percorrer longas distâncias sem reabastecer, reabastecimento rápido e integração com a infraestrutura existente de distribuição de gasolina, proporcionando vantagens de custo e preservando empregos locais.

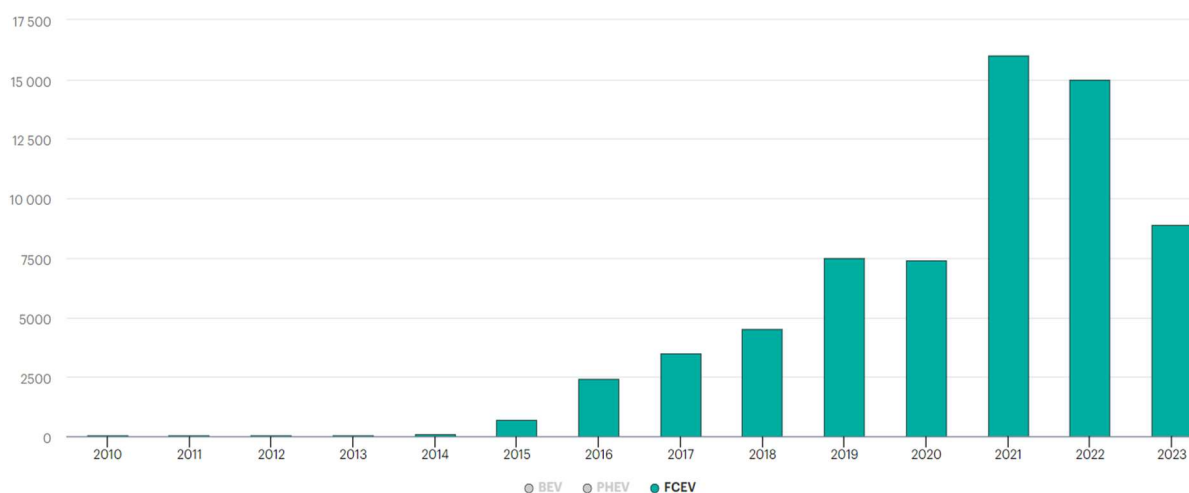
No cenário de carros de passageiros, embora o custo total de propriedade dos FCHEVs seja mais elevado do que os veículos de combustão interna, a expectativa é que a paridade de custo seja alcançada até 2025 para carros de médio e grande porte, impulsionada pela comercialização em escala. Grandes fabricantes de automóveis estão investindo em FCHEVs, e a produção deve aumentar significativamente nos próximos anos. Esta tendência pode ser observada na Figura 4 que mostra a quantidade de carros movidos a célula de combustível vendidos no período de 2010 a 2023.

No setor de transporte de passageiros e de mercadorias os FCHEVs estão ganhando espaço. Investimentos crescentes em ônibus movidos a hidrogênio e fabricantes direcionando a produção para veículos pesados movidos a hidrogênio, movimentam este mercado. A infraestrutura de hidrogênio está em crescimento, com 381 estações em todo o mundo em 2018, lideradas por Japão, Alemanha e Estados Unidos (IRENA, 2018).

A complementaridade entre FCHEVs e BEVs é evidente em uma segmentação do setor de transporte com base no peso do veículo e na distância de condução necessária. Enquanto os BEVs são adequados para veículos mais leves e curtas distâncias, os FCHEVs oferecem vantagens para veículos mais pesados e longas distâncias, como caminhões e ônibus. Além do transporte rodoviário, o hidrogênio também tem potencial para contribuir para a descarbonização do transporte ferroviário, marítimo e aéreo a longo prazo (IRENA, 2018).

Apesar do potencial teórico significativo do hidrogênio no transporte rodoviário, desafios como custos elevados e a necessidade de desenvolver redes extensas de estações de abastecimento precisam ser superados para uma implantação mais robusta. A intervenção governamental e investimentos são cruciais para impulsionar a adoção de FCHEVs (IRENA, 2018).

FIGURA 4: Veículos a célula de combustível vendidos no mundo no período 2010 a 2023.



Fonte: IEA (2023).

Dessa forma, enquanto os FCHEVs estão ganhando impulso e desempenham um papel vital na descarbonização do transporte, é imperativo abordar desafios específicos para garantir uma transição suave e eficaz para essas tecnologias inovadoras (IEA, 2019).

Nesse contexto, um dos automóveis de passeio com tecnologia FCHEV, é o Toyota Mirai (Toyota, 2024) (Figura 5a). O Mirai é equipado com três tanques para armazenamento de hidrogênio (Figura 5b), e seu abastecimento em postos de hidrogênio requerem aproximadamente 5 minutos. Esse tempo significa uma grande vantagem quando comparado com os atuais veículos puramente elétricos, que em geral, levam aproximadamente 30 minutos para recarregar de 20% até 80% da bateria. “Dado que o gás hidrogênio é altamente inflamável, os tanques usam tecnologias de foguetes espaciais, como um enrolamento de fibra de carbono em altíssima tensão ao redor dos cilindros”. (QUATRO RODAS, 2023).

O hidrogênio do tanque de combustível e o oxigênio presente no ar que entra pela grade de admissão se encontram na Pilha de Células a Combustível, onde ocorre uma reação química que cria eletricidade que alimenta o Mirai. Como subproduto dessa reação, tem-se apenas água.

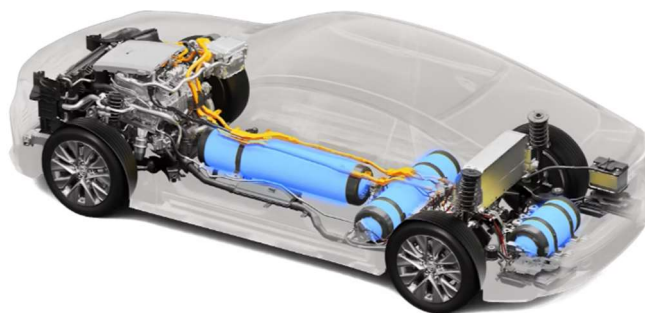
Devido ao alto custo de fazer protótipos veiculares, as empresas recorrem a simulações numéricas para testarem digitalmente seus produtos, antes de construírem um modelo físico. Assim,

o propósito desse artigo, é simular o desempenho do veículo Mirai utilizando o *software* Advisor – *Advanced Vehicle Simulator*.

FIGURA 5. Toyota Mirai: (a) foto do veículo em São Paulo; (b) os 3 tanques de H₂ em cor azul, a célula que gera a corrente elétrica está localizada na parte frontal e o motor elétrico na parte posterior logo abaixo das baterias.



(a) **Fonte:** Quatro Rodas (2023).



(b) **Fonte:** Toyota (2024).

O Advisor, foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (*National Renewable Energy Laboratory* – NREL) no final dos anos 1990. É utilizado na modelagem e análise de veículos com sistemas híbridos, elétricos, com célula de combustível e com motor de combustão interna, por fabricantes de automóveis, pesquisadores em universidades e na indústria. É um software de código aberto, desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink para modelagem e simulação dinâmica.

1.2 Objetivo

Estudar o desempenho do Toyota Mirai, veículo do tipo elétrico com célula de combustível (FCHEV), quando submetido a condições de tráfego urbano típicas de uma cidade do litoral.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho utiliza o software *Advanced Vehicle Simulator* (Advisor) para analisar parâmetros de desempenho do Toyota Mirai no que tange a velocidade do veículo, o estado de carga da bateria, potência da célula de combustível, torque e rotação do motor. O Mirai é que é um veículo híbrido com célula de combustível e motor elétrico (*Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles* – FCHEV) de tamanho médio, que está em sua 2ª geração.

2.1 Descrição do veículo

Em 2014, a fabricante Toyota lançou o primeiro veículo de produção em grande escala FCHEV, o Toyota Mirai. O Mirai destaca-se pelas suas emissões locais zero de carbono, elevada autonomia (502 km) e reabastecimento rápido (menos de 5 minutos). O Mirai é o FCHEV mais vendido e atingiu um total acumulado de 6293 vendas (Almeida e Kruczan 2021).

Em 2020 chega a 2ª e atual geração do Mirai. Em comparação 1ª Geração (2014-2020), o desempenho foi significativamente aprimorado, com a potência aumentada para 134 kW e uma autonomia ampliada para cerca de 647 km. Além disso, a eficiência do consumo de hidrogênio foi reduzido para aproximadamente 0,67 kg/100 km (Toyota, 2021). No Mirai a célula de combustível está localizada sob o capô, enquanto o motor e a bateria de acionamento estão na parte traseira (QUATRO RODAS, 2023). Ele é alimentado por três tanques de hidrogênio a bordo e um hidreto de níquel-metal BP, conforme apresentado na Figura 5b. As características mais relevantes do veículo estão resumidas na Tabela 1.

TABELA 1. Especificações técnicas do Toyota Mirai.

Pilha de células de combustível	
Modelo e código	FCB130
Tipo	Eletrólito de polímero
Número de células	330
Método de conexão	Série
Potência máxima de saída, kW	128
Bateria	
Tipo	Ion-Lithium
Número de células	84
Voltagem nominal	310.8
Capacidade, A h	4.0
Motor/gerador elétrico	
Tipo do motor	Motor síncrono com ímã permanente
Potência máxima, kW	134
Torque máximo, N m	300

Fonte: Toyota (2021).

2.2 Ferramenta numérica: o *software* Advisor

Existem muitos softwares para criar e simular configurações de veículos, sejam veículos convencionais, híbridos paralelos, híbridos em série e híbridos com divisão de potência. Entre os mais importantes tem-se o PSAT (*Powertrain System Analysis Toolkit*), o Advisor e o UC-Davis, que deriva

basicamente do Advisor (Rusu, Baciú e Livint, 2018). O *software* Advisor – *Advanced Vehicle Simulator* é um aplicativo implementado na plataforma Matlab. Possui uma interface amigável que permite aos usuários a possibilidade de fazer diferentes configurações de veículos, híbridos ou totalmente elétricos, com vários tipos de armazenamento de energia.

As principais etapas para simular o comportamento de um veículo neste ambiente são: (i) identificar e configurar os componentes do veículo; e (ii) definir o ciclo de condução e das condições em que a simulação será feita (Rusu, Baciú e Livint, 2018).

a) Componentes do veículo no ambiente Advisor

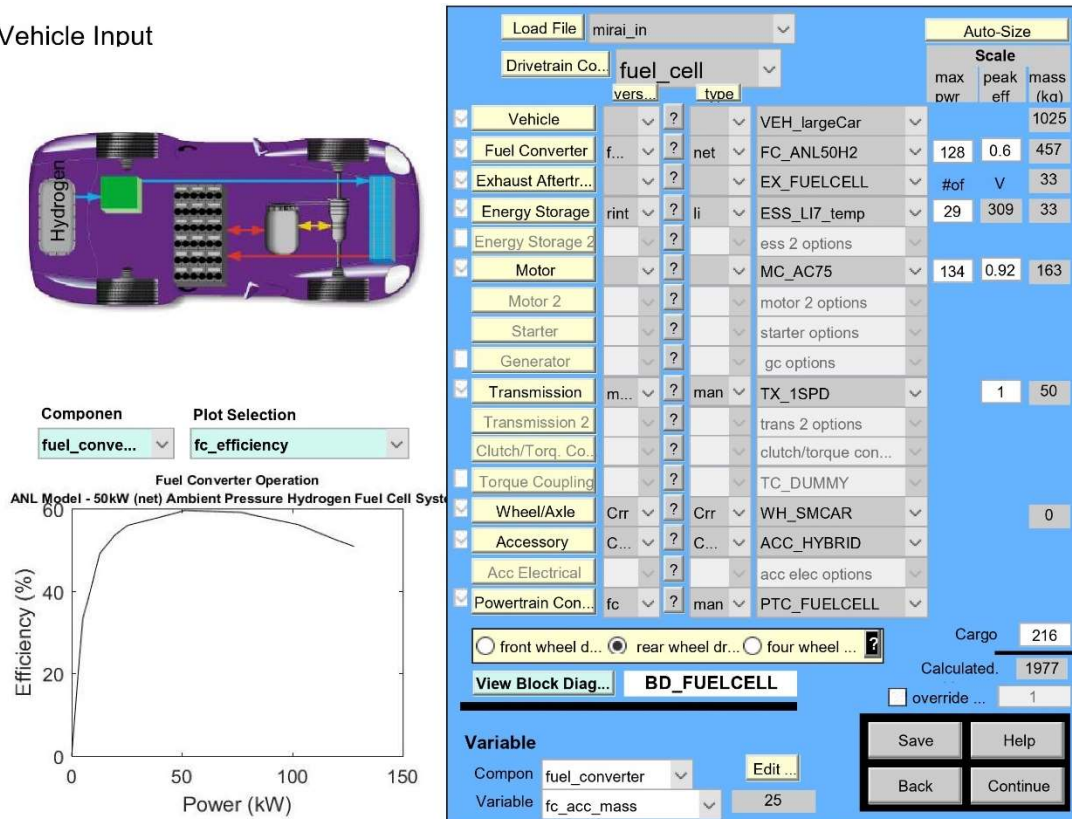
As características do Mirai, especificadas no item 2.1 deste artigo, são inseridas no *software* o qual é visualizado conforme mostra a Figura 6.

Cada uma das características selecionadas para o Mirai são traduzidas por palavras-chave, cujo significados são detalhadas a seguir.

- **VEH_largecar**: Define os parâmetros de carga de estrada para um carro de grande porte. O Mirai tem a massa de um sedan grande, por isso foi usado essa característica;
- **FC_ANL50H2**: Resultados de modelagem para um sistema de célula de combustível líquido de 50 W operando com hidrogênio. No caso do Mirai, esse valor foi ajustado para 128 W;
- **EX_FUELCELL**: Define os parâmetros do catalisador de pós-tratamento de escapamento para um veículo equipado com célula de combustível. As massas e áreas, são escaladas com base na potência máxima da célula de combustível (fc_pwr_max);
- **ESS_Li7_temp**: Bateria de íons de lítio. Como a bateria do Mirai é de 4 A h com voltagem de 310.8 v, no software foi utilizada a voltagem máxima;
- **MC_AC75**: Motor de indução AC Westinghouse de 75 kW, este valor foi ajustado para 134 kW que é a potência máxima do motor usado no Mirai;
- **TX_1SPD**: Este arquivo define uma caixa de câmbio de 1 velocidade. A maioria dos carros elétricos, usam uma caixa de marcha de 1 velocidade, e esse é o caso do Mirai;
- **WH_SMCAR**: Define os parâmetros de pneu, roda e montagem do eixo;
- **ACC_HYBRID**: Define dados padrão de carga de acessórios para uso com um híbrido;
- **PTC_FUELCELL**: Define todos os parâmetros de controle do trem de força, incluindo caixa de câmbio, embreagem, controles híbridos e do motor, para um híbrido em série usando uma estratégia de controle com termostato;
- **rear wheel drive**: Seleção de tração na roda traseira.

FIGURA 6. Configuração do Toyota Mirai no ambiente Advisor.

Vehicle Input



Fonte: Autores (2024).

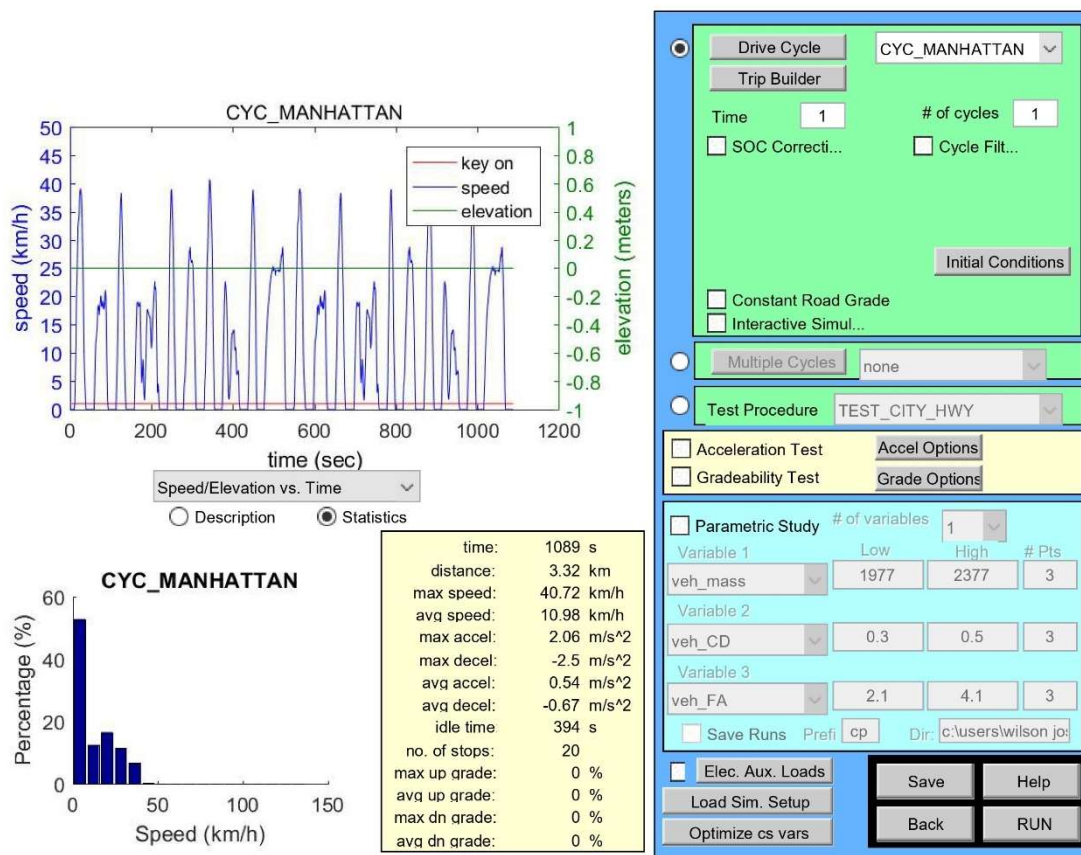
b) Especificação do ciclo de condução no ambiente Advisor

Uma vez especificado o veículo, deve-se escolher o percurso a ser realizado e para o qual os parâmetros de desempenho serão avaliados.

A Figura 7 apresenta a interface de configuração da simulação. Esta tela é a segunda das três opções oferecidas pela Interface Gráfica do Usuário do Advisor. A principal decisão para o usuário nesta tela é escolher um circuito de condução do veículo e depois um executar um procedimento de teste, que irá abrir uma terceira tela, que trará os primeiros resultados da simulação.

Neste trabalho foi escolhido o ciclo de condução de Manhattan, é um ciclo de condução desenvolvido com base nos padrões de condução observados no trânsito urbano em Manhattan. Os dados foram registrados em ônibus híbrido-elétrico e obtidos pela equipe do Professor Nigel Clark da *West Virginia University*. Cada conjunto de dados foi dividido em microviagens, sendo cada microviagem uma partida da marcha lenta, aceleração para velocidade e desaceleração para marcha lenta. Deste modo, o ciclo de condução é caracterizado por paragens frequentes, com muitas acelerações e desacelerações (Advisor, 2022).

FIGURA 7. Detalhes do ciclo de condução no ambiente Advisor.



Fonte: Autores (2024).

3. RESULTADOS

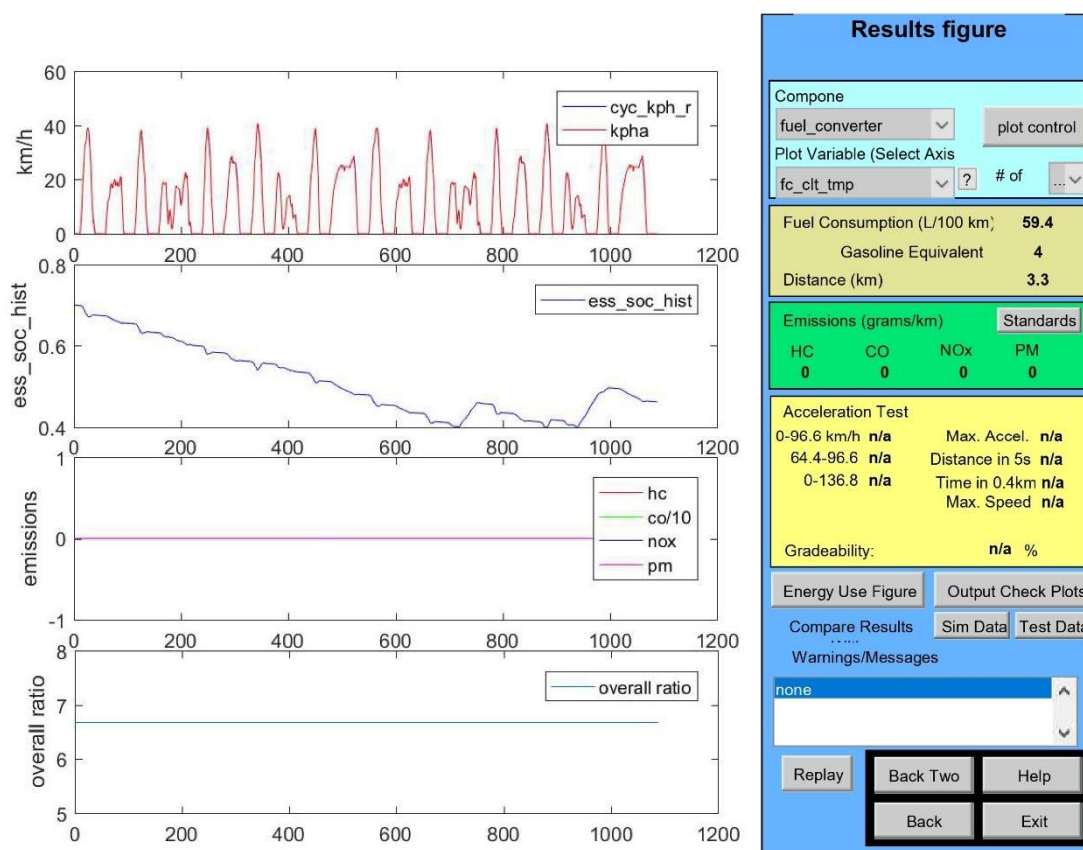
A Figura 8 permite examinar o desempenho do veículo ao longo do ciclo quanto instantaneamente em qualquer ponto do ciclo. Na parte direita da janela (“Results figure”), são fornecidos resultados resumidos, como consumo de combustível e emissões.

Na parte esquerda da referida figura a variação da velocidade do veículo ao longo dos 1089 s de tempo de teste é plotada. O veículo experimentou diversas acelerações e desacelerações, refletindo um ciclo de condução urbano típico com velocidades variando entre 0 e 40 km/h.

O segundo gráfico (“ess_soc_hist”) mostra o estado de carga (SOC) da bateria, que começa em 75% e cai para 50% ao longo do ciclo de condução, com um aumento momentâneo em 600 s e 850 s devido à regeneração durante a frenagem. O terceiro gráfico (“emissions”) indica emissões zero, consistentes com um veículo a célula de combustível. O quarto gráfico (“overall ratio”) mostra rotações constantes do motor, refletindo a única marcha do carro. O consumo de combustível foi de

59,4 L/100 km, equivalente a 4 L/100 km em gasolina. A distância total percorrida foi de 3,3 km, típica de um ciclo urbano de curta duração.

FIGURA 8. Detalhes do ciclo de condução no ambiente Advisor.

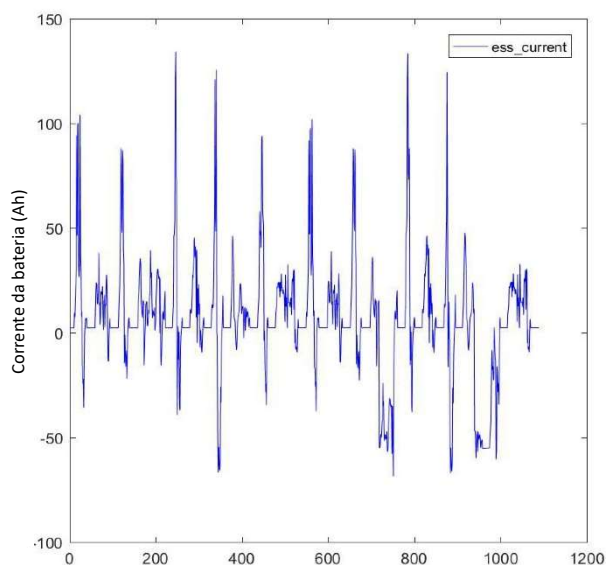


Fonte: Autores (2024).

O circuito de condução analisado é o urbano de Manhattan, Nova Iorque, USA, com variações de velocidade devido às arrancadas e frenagens. Arrancadas aumentam a saída de corrente da bateria, enquanto frenagens regenerativas geram energia armazenada na bateria. A Figura 9 ilustra o comportamento da bateria em ciclos de 1089 s, mostrando corrente elétrica negativa durante a regeneração ou produção pela célula de combustível.

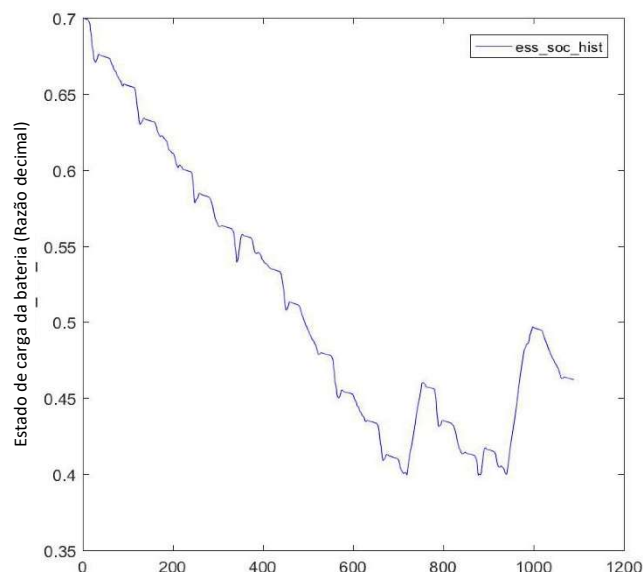
A Figura 10 apresenta o estado de carga da bateria ao longo do ciclo. Toda a energia para o motor é proveniente da bateria, a qual é carregada pela célula de combustível e durante a frenagem regenerativa. A carga da bateria diminui inicialmente, se estabiliza e aumenta quando a célula de combustível começa a gerar eletricidade. A comparação entre as Figuras 9 e 10 mostra que o maior aumento na carga da bateria coincide com a entrada de corrente elétrica.

FIGURA 9. Corrente da bateria ao longo do percurso, A h.



Fonte: Autores (2024).

FIGURA 10: Histórico do estado de carga da bateria.



Fonte: Autores (2024).

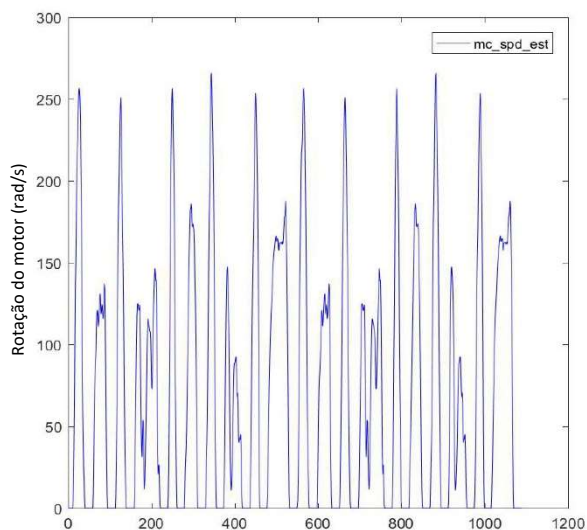
Veículos elétricos não possuem embreagem porque motores elétricos oferecem torque instantâneo e operam em uma ampla faixa de rotações, geralmente de 0 a 13.000 RPM. Em contraste, veículos a combustão, como o Toyota Corolla com torque máximo de 20,9 N·m a 4.400 RPM, precisam de uma caixa de marchas para transformar a potência do motor em força ou velocidade. Motores elétricos proporcionam arrancadas mais eficientes e uma aceleração suave sem trocas de marcha.

Na Figura 11, observa-se a rotação do veículo, em radianos por segundo (rad/s), durante o ciclo. A ausência de embreagem e a menor quantidade de peças móveis contribuem para uma maior eficiência do sistema. A rotação máxima registrada foi de aproximadamente 250 rad/s, equivalente a cerca de 2.387 RPM, consistente com o circuito urbano da simulação.

Já na Figura 12, é mostrado o torque disponível do motor ao longo do ciclo. O torque máximo no circuito ultrapassa 200 N·m, enquanto o torque máximo do Mirai é de 300 N·m (Toyota, 2021). O torque mínimo chega próximo a 100 N·m. O torque negativo indica que o veículo está em frenagem, com o motor atuando como um gerador de energia.

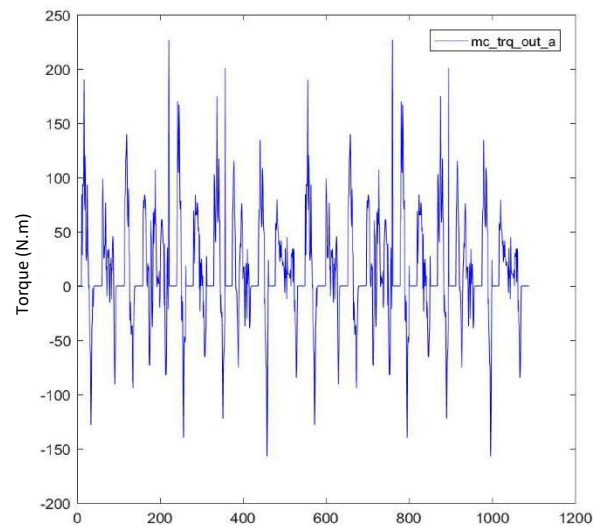
As Figuras 13 e 14, como era de se esperar, mostram que o aumento da potência gerada pela célula de combustível está diretamente ligado ao aumento do consumo de hidrogênio.

FIGURA 11: Vel. de rotação do motor, rad/s.



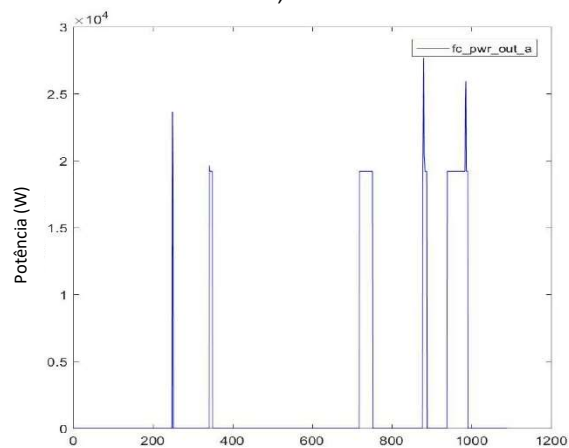
Fonte: Autores (2024).

FIGURA 12: Torque disponível do motor, N.m.



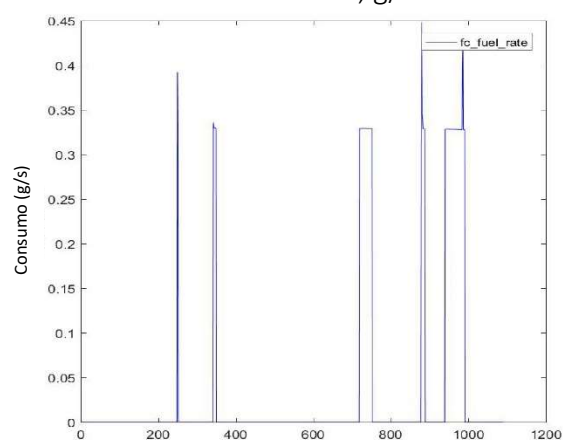
Fonte: Autores (2024).

FIGURA 13: Potência elétrica gerada pela célula de combustível, W.



Fonte: Autores (2024).

FIGURA 14: Consumo de hidrogênio da célula de combustível, g/s.



Fonte: Autores (2024).

4. CONCLUSÕES

O presente estudo investigou o desempenho do Toyota Mirai, um veículo híbrido com célula de combustível, utilizando o *software Advanced Vehicle Simulator* (Advisor) para simulações em condições de tráfego urbano.

Os resultados indicam que o Mirai apresenta uma elevada eficiência energética e emissões zero de poluentes durante a condução, alinhando-se às expectativas para veículos de tecnologia de célula de combustível.

O perfil de velocidade ao longo do ciclo de condução urbano típico demonstrou a capacidade do veículo em lidar com frequentes acelerações e desacelerações, enquanto o estado de carga da bateria revelou uma gestão eficaz da energia, inclusive com momentos de regeneração durante a frenagem.

Apesar do alto custo inicial e desafios relacionados à infraestrutura de abastecimento, os veículos de célula de combustível como o Toyota Mirai mostram-se promissores para a descarbonização do setor de transporte. A continuidade de pesquisas e a expansão da infraestrutura de hidrogênio são essenciais para superar os obstáculos à ampla adoção dessa tecnologia.

Este estudo, desenvolvido no âmbito do Grupo de Pesquisa em Produção e Processamento de Petróleo, Gás e Energias Renováveis – GPetro do Programa de Pós-graduação em Energia da Ufes, contribui para a compreensão do desempenho dos FCHEVs e reforça a viabilidade dos veículos movidos a hidrogênio como uma solução sustentável para o transporte urbano.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ADVISOR® Software and “Advanced Vehicle Simulator”, 2022

BONCI, M. Fuel Cell Vehicle simulation: an approach based on Toyota Mirai, 2021. DE ALMEIDA, S. C. A.; KRUCZAN, R. Effects of drivetrain hybridization on fuel economy, performance and costs of a fuel cell hybrid electric Vehicle. *International journal of hydrogen energy*, v. 46, p. 39404-39414, 2021.

DOS SANTOS, R.; ROMERO, O. J. Catalisando o futuro: o mundo na era do hidrogênio (a ser publicado). *Edição dos autores*, São Mateus, ES, Brasil, 95 p., 2024.

FAPESP – Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. *Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho*, 2007. (Technical report). Disponível em: <<https://fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>> Acesso em: 26 novembro 2023.

FU, Z; LI, Z; SI P; TAO, F. A hierarchical energy management strategy for fuel cellbatterysupercapacitor hybrid electric vehicles. International journal of hydrogen energy, 2019.

GBEP – German-Brazilian Energy Partnership. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro, 2021. Disponível em: <<https://energypartnership.com.br/media-elements/>> Acesso em: 20 junho 2024.

Hydrogen Council, 2017a. *How hydrogen empowers energy transition*. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>>. Acesso em: 26 novembro 2023.

Hydrogen Council, 2017b. *Hydrogen: scaling up*. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf>. Acesso em: 26 novembro 2023.

IEA – International Energy Agency, 2019. *The future of hydrogen: seizing today’s opportunities*. [pdf] Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf>. Acesso em: 26 novembro 2023.

IEA – International Energy Agency. [S. l.], 2023. Disponível em:< <https://www.iea.org/>>. Acesso em: 20 junho 2024.

INTERENERGY. Investigating energy transition pathways – interrelation between power-to-X, demand response and market coupling, 2023. Disponível em: < <https://interenergy.wp.fsb.hr/>>. Acesso em: 20 julho 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, 2021. (Technical report). Disponível em: <https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf>. Acesso em: 26 novembro 2023.

MARKEL, T.; BROOKER, A.; HENDRICKS, T.; JOHNSON, V.; KELLY, K.; KRAMER, B.; O’KEEFE, M.; SPRIK, S.; WIPKE, K. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling, Journal of Power Sources, v. 110, p. 255–266, 2002.

QUATRO RODAS. Toyota Mirai é o carro a hidrogênio que quer aproveitar nosso etanol, 2023. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/testes/toyota-mirai-e-o-carro-a-hidrogenio-que-quer-aproveitar-nosso-etanol/>>. Acesso em: 27 julho 2024.

RUSU, F. A.; BACIU, A. G.; LIVINT, G. Applicability of Fuel Cell in Electric Vehicles. *10th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 2018.

SILVA, F. B. DA; HUNT, J. D.; ROMERO, O. J. Análise multicritérios de diferentes tecnologias para veículos leves no Brasil, *Rio Oil & Gas Expo and Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022. DOI <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022.371>

SULAIMAN, N.; HANNAN, M. A.; MOHAMED, A.; KER, P. J.; MAJLAN, E. H.; WAN DAUD, W. R. Optimization of energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicles: Issues and recommendations. *Applied Energy*, v. 228, n. 15, p. 2061-2079, 2018.

TOYOTA. Corolla 2024. Disponível em <<https://media.toyota.com.br/1a3770f0-cadb-43d2-8fd1-9733aec5af85.pdf>>. Acessado em 26 de julho de 2024.

TOYOTA. Mirai 2024. Disponível em: <<https://www.toyota.com/mirai/>>. Acesso em: 16 julho 2024.

TOYOTA. Toyota Motor Corporation, manual do veículo Toyota Mirai, 2021.

TURKMEN, A. C.; SOLMAZ, S.; CELIK, C. Analysis of fuel cell vehicles with advisor software. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 1066–1071, 2017.

WIPKE, K. B.; CUDDY, M. R.; BURCH, S. D. ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach, *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, v. 48, n. 6, 1999.

ZULKIFLI, S. A.; DALI, M. A. M. Development of Vehicle Powertrain Simulation Module by Interfacing Matlab-ADVISOR to LabVIEW. *IEEE Conference on Systems, Process and Control*, 15–17 December 2017, Melaka, Malaysia, 2017.

AGRADECIMENTOS

A discente Isabel Aymara agradece o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Fapesp, e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI (PRH-ANP 53.1 Ufes). O Prof. Oldrich Joel agradece o suporte financeiro da Fapes – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo através do Edital Fapes Nº 6/2021 – Bolsa Pesquisador Capixaba, termo de outorga 356/2022.