



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO À CÉLULA A COMBUSTÍVEL: HYUNDAI NEXO

Rafael Maués de Avila Goulart

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Sílvio Carlos Aníbal de Almeida

Rio de Janeiro

Março 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ



SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO À CÉLULA A COMBUSTÍVEL: HYUNDAI NEXO

Rafael Maués de Avila Goulart

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICA.

Examinada por:

Prof. Silvio Carlos Anibal de Almeida; DSc (Orientador)

Profa. Anna Carla Monteiro de Araujo; DSc

Profa. Juliana Braga Rodrigues Loureiro; DSc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

Goulart, Rafael Maués de Avila

Simulação de um veículo à célula a combustível: Hyundai Nexo /
Rafael Maués de Avila Goulart. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola
Politécnica, 2019.

XI, 95 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Sílvio Carlos Aníbal de Almeida

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de
Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 92 – 95.

1. Introdução 2. Célula a combustível 3. ADVISOR 4. Simulação 5.
Fatores que impactam no consumo de combustível 6. Análise do
grau de hibridização 7. Análises paramétricas 8. Análise econômica
9. Conclusão I. de Almeida, Sílvio Carlos Aníbal. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia
Mecânica. III. Análise da variação de parâmetros e seus efeitos no
consumo de combustível de veículos movidos à célula a
combustível utilizando o software ADVISOR.

Agradecimentos

Agradeço antes de tudo a Deus por tudo que sou e tudo que recebi na minha vida até hoje, incluindo a oportunidade de estar terminando uma graduação em Engenharia Mecânica na UFRJ.

Agradeço também com grande carinho a todos os membros da minha família, especialmente minha mãe Carla a quem eu devo tudo na minha criação. Agradeço ao meu pai Carlos que sei que sempre olha por mim do céu. Agradeço também ao meu avô Osmar e minha falecida vó Maria da Glória, que foram muito importantes na minha vida, especialmente na minha infância. Agradeço também ao meu irmão Pedro e aos meus tios Ana Paula, Denise, Fernando e Victor por todos esses anos onde pude desfrutar de suas companhias nas nossas reuniões familiares. Por fim, agradeço ao meu padrinho Nival que compartilhou suas experiências da engenharia comigo e me ajudou na minha escolha.

Agradeço ainda a todos os amigos que fizeram parte da minha vida, em especial nesses anos de graduação. Na UFRJ, agradeço particularmente aos meus amigos Caio, Carlos Eduardo, Luma, Pedro e Yuri pelo tempo que passamos juntos e aulas compartilhadas, e também a todos os outros que conheci durante essa graduação. Aos meus amigos de infância, agradeço todos os grandes momentos que vivi na minha vida que me ajudaram a ser quem sou hoje e também a relaxar durante os períodos difíceis na graduação. Agradeço especialmente aos meus amigos Daniel, Lucas, João Gabriel e Pedro que nesta segunda metade da minha vida foram certamente meus amigos mais próximos.

Agradeço ainda à minha melhor amiga e namorada, Júlia. Meu muito obrigado por esses últimos meses e por toda a força e paciência que teve comigo nos dias difíceis de pesquisa para esse projeto. Sem você sei que tudo teria sido mais difícil.

Por fim, agradeço a todos os professores da UFRJ que me ajudaram nessa graduação, em especial meu orientador Sílvio Carlos. Obrigado pela paciência e pelas correções rápidas.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânica.

SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO À CÉLULA A COMBUSTÍVEL: HYUNDAI NEXO

Rafael Maués de Avila Goulart

Março/2019

Orientador: Sílvio Carlos Aníbal de Almeida

Curso: Engenharia Mecânica

A pesquisa e desenvolvimento de veículos à célula a combustível tem crescido cada vez mais nos últimos anos numa busca por veículos com menos emissões e maior eficiência. Os veículos elétricos são os veículos alternativos mais populares atualmente, porém encontram dificuldades principalmente na autonomia e no tempo de recarga da bateria. Os veículos à célula a combustível possuem uma autonomia consideravelmente maior e com um tempo de abastecimento muito baixo, então podem ser utilizados em conjunto para formar um veículo híbrido com menos desvantagens. O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito de diversas variáveis no consumo de combustível de um veículo. Para isso, um modelo do Hyundai Nexó foi criado no ADVISOR para que os dados pudessem ser analisados. A modelagem é validada e então são feitas análises variando o grau de hibridização, o coeficiente de arrasto e a massa. Para o grau de hibridização, foi possível melhorar o consumo de combustível em 5% para um número alto de ciclos. Além disso, há ainda uma análise econômica para ver quanto custa esse tipo de veículo para o consumidor comparado a um veículo que utiliza gasolina.

Palavras-chave: Célula a combustível, Simulação veicular, veículos híbridos, ADVISOR

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

SIMULATION OF A FUEL CELL VEHICLE: HYUNDAI NEXO

Rafael Maués de Avila Goulart

March/2019

ADVISOR: Sílvio Carlos Aníbal de Almeida

Department: Mechanical Engineering

The research and development of fuel cell vehicles has been increasing in recent years in a search for vehicles with less emissions and more efficiency. The electric vehicles are the most popular alternative vehicles currently but find difficulties mainly in the driving range and battery recharge time. The fuel cell vehicles have a considerably longer driving range and a very low fueling time, so they can be used together to form a hybrid vehicle with fewer disadvantages. The purpose of this work is to evaluate the effect of several variables on the fuel economy of a vehicle. For this, a Hyundai Nexo model was created on ADVISOR so the data could be analysed. The modeling is validated and then analyses are performed varying the degree of hybridization, the drag coefficient and the mass. For the degree of hybridization, it was possible to improve fuel consumption by 5% for a high number of cycles. Furthermore, there is an economic analysis to see how much this type of vehicle costs for the consumer compared to a gasoline vehicle.

Keywords: Fuel Cell, Vehicle simulation, hybrid vehicles, ADVISOR

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Lista de figuras | ix |
| Lista de tabelas | xi |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1. Veículos zero emissões..... | 12 |
| 1.2. História da célula a combustível | 14 |
| 1.3. Objetivo do trabalho | 15 |
| 1.4. Descrição dos capítulos | 15 |
| 2. CÉLULA A COMBUSTÍVEL | 17 |
| 2.1. Funcionamento da célula a combustível..... | 17 |
| 2.2. Componentes de um sistema de célula a combustível | 17 |
| 2.3. Classificações de célula a combustível | 18 |
| 2.3.1. Célula a combustível com membrana trocadora de prótons (PEFC)..... | 19 |
| 2.3.2. Célula a combustível alcalina (AFC) | 20 |
| 2.3.3. Célula a combustível alcalina (AFC) | 21 |
| 2.3.4. Célula a combustível de carbonato fundido (MCFC) | 21 |
| 2.3.5. Célula a combustível alcalina (AFC) | 22 |
| 2.4. Análise da performance de uma célula a combustível – Performance ideal | 23 |
| 2.5. Análise da performance de uma célula a combustível – Performance real..... | 26 |
| 2.5.1. Perda por ativação..... | 27 |
| 2.5.2. Perda ôhmica | 27 |
| 2.5.3. Perda por transporte de massa..... | 28 |
| 2.5.4. Efeito das perdas acumuladas | 29 |
| 2.6. Fornecimento de combustíveis para veículos movidos à célula a combustível | 30 |
| 2.7. Configuração de um veículo híbrido célula a combustível e elétrico | 31 |
| 2.8. Grau de hibridização..... | 33 |
| 3. ADVISOR | 35 |
| 3.1. Softwares de simulação de veículos..... | 35 |
| 3.1.1. Sobre o ADVISOR..... | 35 |
| 3.1.2. Simulação de veículos usando o ADVISOR | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 4. SIMULAÇÃO..... | 44 |
| 4.1. Especificações do Hyundai Nexo..... | 44 |
| 4.2. Escolha dos componentes..... | 46 |
| 4.3. Alteração das variáveis | 48 |
| 4.4. Parâmetros de simulação | 50 |
| 4.5. Validação do modelo | 53 |
| 5. FATORES QUE IMPACTAM NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL..... | 56 |
| 5.1. Direção agressiva..... | 56 |
| 5.2. Massa | 56 |
| 5.3. Coeficiente de arrasto..... | 57 |
| 5.4. Grau de hibridização..... | 57 |
| 5.5. Densidade energética..... | 58 |
| 6. ANÁLISE DO GRAU DE HIBRIDIZAÇÃO..... | 60 |
| 6.1. Definindo os valores de potências | 60 |
| 6.2. Alterando os valores das potências no ADVISOR..... | 61 |
| 6.3. Restrições dos graus de hibridização | 65 |
| 6.4. Análise da simulação | 67 |
| 7. ANÁLISES PARAMÉTRICAS | 74 |
| 7.1. Análise do coeficiente de arrasto..... | 74 |
| 7.2. Análise da massa..... | 76 |
| 8. ANÁLISE ECONÔMICA | 80 |
| 8.1. Escolha dos veículos para a comparação..... | 80 |
| 8.2. Definição dos parâmetros de simulação | 81 |
| 8.3. Comparação dos veículos..... | 83 |
| 9. CONCLUSÕES..... | 90 |
| Referências bibliográficas..... | 92 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Expectativa de vendas globais de veículos movidos à célula a combustível [3]..... | 13 |
| Figura 2: Representação esquemática de uma célula a combustível [7] | 17 |
| Figura 3: Tensão x temperatura na célula a combustível [4] | 25 |
| Figura 4: Efeito dos três tipos de perda na célula a combustível [4]..... | 26 |
| Figura 5: Configuração de um veículo híbrido célula a combustível e elétrico [10] | 32 |
| Figura 6: Tela inicial do ADVISOR | 37 |
| Figura 7: Tela de entrada de dados do veículo | 38 |
| Figura 8: Tela de definição dos parâmetros de simulação | 41 |
| Figura 9: Resultados da simulação..... | 43 |
| Figura 10: Tela de entrada de dados com componentes do modelo do Nexo..... | 46 |
| Figura 11: Variáveis alteradas no ADVISOR | 48 |
| Figura 12: Velocidade x tempo do ciclo UDDS no ADVISOR..... | 52 |
| Figura 13: Velocidade x tempo do ciclo HWFET no ADVISOR..... | 53 |
| Figura 14:Resultado da simulação no ciclo UDDS..... | 54 |
| Figura 15:Resultado da simulação no ciclo HWFET..... | 55 |
| Figura 16: Potência x estado de carga da bateria no ADVISOR | 61 |
| Figura 17: Variação da temperatura do módulo durante o ciclo UDDS | 62 |
| Figura 18: Consumo de combustível x grau de hibridização para os ciclos UDDS, HWFET, combinado e constante | 68 |
| Figura 19: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização do ciclo UDDS | 69 |
| Figura 20: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização do ciclo HWFET ... | 70 |
| Figura 21: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização do ciclo constante .. | 70 |
| Figura 22: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização para 10 ciclos UDDS | 71 |
| Figura 23: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização para 10 ciclos HWFET | 72 |
| Figura 24: Consumo de combustível x grau de hibridização para 10 ciclos..... | 73 |
| Figura 25: Consumo de combustível x coeficiente de arrasto..... | 75 |
| Figura 26: Consumo de combustível x massa..... | 76 |
| Figura 27: Variação do estado de carga para o ciclo UDDS com massa valendo 1035,7 kg .. | 78 |
| Figura 28: Variação do estado de carga para o ciclo UDDS com massa valendo 1129,8 kg .. | 78 |

| | |
|---|----|
| Figura 29: Trajeto percorrido no ciclo UDDS | 78 |
| Figura 30: Divisão dos custos da célula a combustível..... | 84 |
| Figura 31: Divisão dos custos do empilhamento | 84 |
| Figura 32: Custos anuais de combustível (US\$) do Santa Fe e do Nexo..... | 85 |
| Figura 33: Custos anuais acumulados de combustível (US\$) do Santa Fe e do Nexo..... | 86 |
| Figura 34: Custos anuais acumulados de combustível (US\$) do Santa Fe e do Nexo até 2030 com três meses grátis de combustível para o Nexo..... | 87 |
| Figura 35: Custo total (US\$) do Santa Fe e do Nexo até 2030 | 89 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Comparativo entre os veículos movidos à célula a combustível no mercado [2] | 13 |
| Tabela 2: Comparação entre as principais classificações de célula a combustível [8] [9]..... | 19 |
| Tabela 3: Reações no anodo e no catodo para as classificações de célula a combustível [4].. | 22 |
| Tabela 4: Dados termodinâmicos para algumas reações químicas a 25°C e 1 atm [4]..... | 24 |
| Tabela 5: Características de diferentes tipos de veículos híbridos [13] | 34 |
| Tabela 6: Dados do Hyundai Nexso [18]..... | 45 |
| Tabela 7: Componentes do ADVISOR para o modelo do Nexso..... | 47 |
| Tabela 8: Dados de performance do Nexso | 50 |
| Tabela 9: Equivalências de um galão de gasolina [22] | 51 |
| Tabela 10: Dados do ciclo UDDS | 52 |
| Tabela 11: Dados do ciclo HWFET | 52 |
| Tabela 12: Comparação dos resultados reais com a simulação..... | 53 |
| Tabela 13: Energia por massa e por volume das principais fontes de energia de veículos [27] | 59 |
| Tabela 14: Potência da bateria e da célula a combustível para diferentes graus de hibridização | 60 |
| Tabela 15: Simulação alterando número de módulos da bateria..... | 64 |
| Tabela 16: Simulação alterando o fator da capacidade da bateria | 65 |
| Tabela 17: Variação da inclinação com o grau de hibridização..... | 67 |
| Tabela 18: Variação do consumo de combustível com o coeficiente de arrasto..... | 75 |
| Tabela 19: Variação do consumo de combustível com a massa | 77 |
| Tabela 20: Distância anual média percorrida em milhas [36]..... | 81 |
| Tabela 21: Dados da análise econômica..... | 82 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Veículos zero emissões

Com o desenvolvimento da indústria ao longo das últimas décadas, a quantidade de energia produzida necessária aumenta cada vez mais para atender as necessidades da população. Segundo o *World Energy Resources* [1], cerca de 86% da energia gerada no mundo em 2015 foi de petróleo, carvão e gás natural. A alta dependência do uso de combustíveis fósseis para a geração de energia no mundo resultou em dois principais problemas que estimulam o desenvolvimento de uma energia mais limpa: o risco do fim dos recursos fósseis e a poluição ambiental.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos [2], 51% das emissões de CO₂ de um típico lar americano vem dos veículos automotivos. Para diminuir as emissões dos veículos, é necessária uma troca para combustíveis mais limpos e veículos com melhor consumo de combustível. Para que isso seja possível, foi criado na Califórnia um programa para pesquisa e desenvolvimento de veículos zero emissões (*Zero Emission Vehicle – ZEV*). Originalmente essas emissões que seriam zeradas se referiam apenas às emissões da operação do veículo. Porém, os esforços nos últimos anos tem sido para zerar não apenas as emissões na operação do veículo, mas também as emissões originadas da geração de energia para o veículo.

Entre os veículos zero emissões em desenvolvimento e produção no mercado atualmente temos os veículos elétricos e os veículos movidos à célula a combustível. Quanto às emissões do veículo apenas, tanto a bateria quanto a célula a combustível cumprem o requisito de não emitir poluentes. Entretanto, ainda é necessária uma mudança no método de geração tanto da eletricidade para os veículos elétricos (utilizando energia renovável e não mais recursos fósseis) quanto para o hidrogênio utilizado na célula a combustível (utilizando eletrólise e não mais reforma a vapor do metano).

Nesse trabalho será mais aprofundado os veículos movidos à célula a combustível. Na tabela 1 temos um comparativo com os três principais veículos dessa categoria no mercado atualmente.

Tabela 1: Comparativo entre os veículos movidos à célula a combustível no mercado [2]

| Parâmetro | Honda Clarity | Hyundai Nexa | Toyota Mirai |
|---|-----------------|-----------------|--------------|
| Consumo equivalente de combustível (MPGe) | 68 | 61 | 67 |
| Autonomia (km) | 589 | 612 | 502 |
| Classe do veículo | Médio | SUV pequeno | Subcompacto |
| Potência do motor (kW) | 130 | 95 | 113 |
| Bateria | 346 V íon lítio | 240 V íon lítio | 245 V NiMH |

O MPGe (*Miles per gallon gasoline equivalent*) é uma medida criada para comparar o consumo de combustível dos veículos alternativos com os veículos convencionais movidos à gasolina utilizando o valor energético equivalente a um galão de gasolina para cada tipo de fonte de energia alternativa. Esse conceito será mais detalhado no capítulo 4.

Na figura 1 temos uma previsão da *Information Trends* [3] para a quantidade de veículos movidos à célula a combustível vendidos por ano no mundo. Esse crescimento se deve principalmente aos incentivos governamentais e à maior aceitação no mercado quando a infraestrutura necessária para o reabastecimento desses veículos estiver mais desenvolvida no mundo.

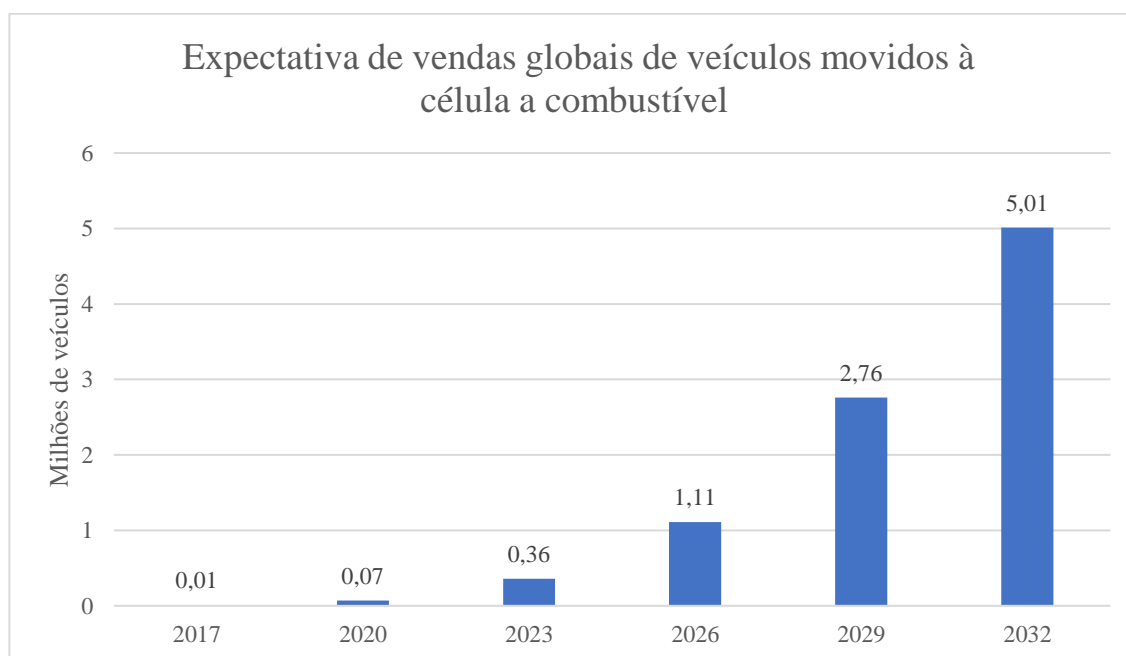


Figura 1: Expectativa de vendas globais de veículos movidos à célula a combustível [3]

1.2. História da célula a combustível

Células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química do combustível em energia elétrica com alta eficiência e baixo impacto ambiental. Por não terem as etapas de produção de calor e trabalho mecânico comum aos outros geradores de energia, as células a combustível não possuem limitações termodinâmicas das máquinas de calor, como a eficiência de Carnot. E como não há combustão, não há emissão de gases poluentes durante a geração de energia. [4]

As células a combustível podem utilizar uma variedade de combustíveis e oxidantes diferentes, mas o de maior interesse atualmente são as células a combustível que utilizam hidrogênio como combustível e ar do ambiente como oxidante. Diferente das baterias, nas células a combustível tanto o combustível quanto o oxidante precisam ser continuamente fornecidos para os dois eletrodos da célula.

Foi descoberta em 1839 quando o Sir William Grove descobriu que era possível gerar eletricidade revertendo a eletrólise da água. Porém, foi apenas em 1889 que o termo célula a combustível foi utilizado pela primeira vez pelos dois pesquisadores Charles Langer e Ludwig Mond. No início do século XX, várias tentativas foram feitas para o desenvolvimento de uma célula a combustível que convertesse carvão em eletricidade, mas a chegada dos motores de combustão interna interrompeu as pesquisas nessa área.

A primeira célula a combustível que funcionava corretamente foi desenvolvida por Francis Bacon em 1932, com uma célula de hidrogênio-oxigênio utilizando eletrólito alcalinos e eletrodos de níquel. Entretanto, devido a problemas técnicos, foi somente em 1959 que um sistema de 5 kW utilizando essa célula a combustível pode ser demonstrado. Por volta da mesma época, a tecnologia da célula a combustível atraiu o interesse da NASA para uso em missões espaciais que patrocinou diversas pesquisas na área. [5]

Nas últimas décadas, devido à maior preocupação com o meio-ambiente e com a escassez de recursos naturais, a célula a combustível atraiu um grande interesse da indústria automobilística, pois é uma tecnologia que permite manter a potência dos veículos vendidos atualmente, mas sem emissão de gases poluentes. Contudo, existe várias dificuldades a serem melhoradas ainda, especialmente na questão da produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio. [6]

1.3. Objetivo do trabalho

Esse trabalho tem como objetivo avaliar um modelo de veículo movido à célula a combustível que será modelado no ADVISOR para entender como varia o consumo de combustível alterando algumas variáveis.

Esse trabalho também faz uma análise dos custos de um veículo movido à célula a combustível comparado a um veículo convencional. Os veículos movidos à célula a combustível ainda precisam superar diversas barreiras para entrar no mercado, como redução do preço do hidrogênio, redução do preço do sistema da célula a combustível e criação de uma rede de abastecimento de hidrogênio para o consumidor.

O modelo de veículo movido à célula a combustível escolhido para a modelagem apresentada foi o Hyundai Nexu. Os custos do Nexu foram comparados com o de um veículo convencional: o Hyundai Santa Fe. Os custos analisados foram os de combustível (hidrogênio para o Nexu e gasolina para o Santa Fe) e o preço base do veículo comercializado na Califórnia. O custo anual do combustível para os dois veículos foi calculado (com e sem incentivos governamentais) para prever quanto o consumidor pode economizar a longo prazo comprando um veículo movido à célula a combustível.

1.4. Descrição dos capítulos

O capítulo 2 apresenta o conceito de célula a combustível, seu funcionamento, as classificações existentes, a performance ideal e real e os tipos de fornecimento de combustível. Apresenta ainda a configuração de um veículo híbrido elétrico e célula a combustível e uma definição de grau de hibridização.

No capítulo 3 o software de simulação utilizado nesse trabalho, o ADVISOR, é apresentado e seu funcionamento é explicado detalhadamente.

O capítulo 4 apresenta os dados técnicos para a modelagem do Hyundai Nexu no ADVISOR e detalha o processo de inserção dos dados no programa. No fim, o modelo é validado.

No capítulo 5 é feita uma análise sobre o grau de hibridização do modelo. Vários graus de hibridização são calculados e depois simulados no ADVISOR para avaliar o impacto no consumo de combustível.

No capítulo 6 são feitas duas análises paramétricas variando coeficiente de arrasto e massa no ADVISOR para avaliar o impacto no consumo de combustível.

No capítulo 7 é feita uma análise econômica comparando os custos para se manter um veículo movido à célula a combustível utilizando o modelo do Hyundai Nexso comparado ao custo de se manter um veículo convencional usando os dados do Hyundai Santa Fe.

Por fim, no capítulo 8 são feitas conclusões sobre todas as análises realizadas e sugestões para novos estudos.

2. CÉLULA A COMBUSTÍVEL

2.1. Funcionamento da célula a combustível

Como já explicado na introdução, a célula a combustível converte energia química diretamente em energia elétrica. A célula unitária consiste em dois eletrodos porosos separados por um eletrólito conectados por meio de um circuito externo, como podemos ver na figura 2.

O combustível (nesse caso, hidrogênio) penetra o anodo, se dissolve no eletrólito e reage na superfície do anodo, liberando elétrons e formando prótons. Esses elétrons liberados chegam ao catodo através do circuito externo e participam da reação de redução do oxidante (oxigênio). Os prótons formados na superfície do anodo são transportados pelo eletrólito até o catodo, onde reagem formando água, o produto da reação global do sistema.

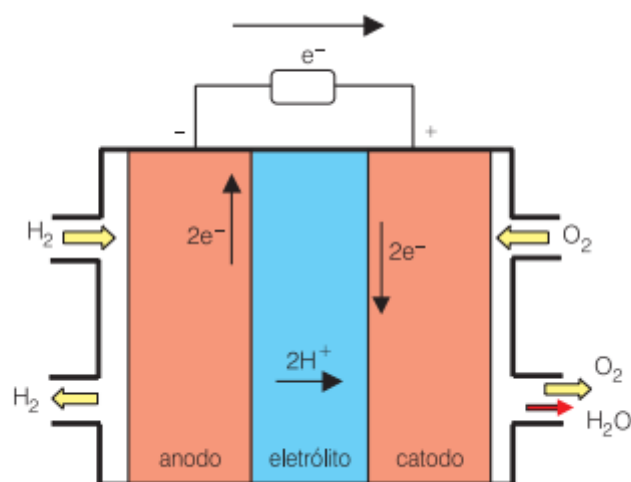


Figura 2: Representação esquemática de uma célula a combustível [7]

2.2. Componentes de um sistema de célula a combustível

Para que uma aplicação utilizando célula a combustível funcione na prática são necessárias várias células a combustível além de alguns outros sistemas auxiliares. Vamos analisar os componentes mais importantes para o funcionamento de um sistema de célula a combustível:

- Empilhamento (stack): Para que o sistema funcione é necessário que se combine diversas células unitárias para se atingir os altos níveis de tensão e potência da maioria das aplicações práticas. Essa união de células unitários é chamado de empilhamento e as células são geralmente conectadas em série. O arranjo geralmente é planar com as células divididas por placas, mas pode ser tubular no caso de altas temperaturas ou alguma outra geometria diferente dependendo da utilização. [4]

- Preparação de combustível: Sistema necessário para preparação de combustíveis que não sejam puros, como remoção de impurezas ou um algum tipo de processamento do combustível, como a reação desse combustível com um oxidante para formar uma mistura rica no anodo.

- Fornecimento de ar: Na maioria dos sistema, compressores e filtros de ar.

- Controle térmico: Sistema para controlar a temperatura do empilhamento no sistema de célula a combustível.

- Controle da água: Água é necessária em algumas partes da célula a combustível ao mesmo tempo em que é um dos produtos da reação. Por isso, é necessário um sistema que gerencie essa água para que não seja necessário fornecer água externamente no sistema.

- Equipamento de condicionamento de energia elétrica: É necessário um tratamento na tensão de saída das células a combustível, pois é uma tensão variável que não pode ser utilizada diretamente (conversão DC para AC).

2.3. Classificações de célula a combustível

Existem diversos tipos de células a combustível e que o tipo de classificação mais comum é pelo tipo de eletrólito utilizado, sendo dividido desse modo em: Célula a combustível com membrana trocadora de prótons (PEFC – *Polymer electrolyte fuel cell*), célula a combustível alcalina (AFC – *Alkaline fuel cell*), célula a combustível ácido fosfóricas (PAFC – *Phosphoric acid fuel cell*), célula a combustível de carbonato fundido (MCFC – *Molten carbonate fuel cell*) e célula a combustível de óxido sólido (SOFC – *Solid oxide fuel cell*). A tabela 2 fornece um comparativo entre essas principais classificações de célula a combustível e a tabela 3 mostra as reações que acontecem no anodo e no catodo para cada uma das células a combustível.

Tabela 2: Comparação entre as principais classificações de célula a combustível [8] [9]

| Parâmetro | PEFC | AFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|-------------------------|--|---|---|---|--|
| Eletrólito | Polímero ácido orgânico poli-perfluorsulfônico | Solução aquosa alcalina de hidróxido de potássio | Ácido fosfórico estabilizado | Solução de carbonato líquido fundido | Membrana de cerâmica |
| Eletrodo | Carbono | Metal de transição | Carbono | Níquel e óxido de níquel | Perovskita |
| Catalisador | Platina | Platina | Platina | Material do eletrodo | Material do eletrodo |
| Temperatura de operação | 40 – 80 °C | 65 – 220 °C | 205 °C | 650 °C | 600 – 1000 °C |
| Aplicação | Veículos, espaçonaves e mobilidade | Espaçonaves e aplicações militares | Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) e cogeração | Unidades estacionárias (algumas centenas de kW) e cogeração | Unidades estacionárias (10 kW a algumas centenas de kW) e cogeração |
| Vantagens | Alta densidade e operação flexível | Alta eficiência | Maior desenvolvimento tecnológico | Tolerância a CO/CO ₂ e eletrodos à base de níquel | Alta eficiência e a reforma do combustível pode ser feita na célula |
| Desvantagens | Custo da membrana e contaminação do catalisador com CO | Sensível a CO ₂ e sem reforma do combustível | Controle da porosidade do eletrodo, sensível a CO e eficiência limitada pela corrosão | Problema de materiais, necessidade de reciclagem de CO ₂ | Problema de materiais, expansão térmica e necessidade de pré-reforma |

2.3.1. Célula a combustível com membrana trocadora de prótons (PEFC)

O eletrólito desse tipo de célula a combustível é um polímero ácido perfluorsulfônico (também conhecido como Nafion) que é um excelente condutor de prótons e os eletrodos

(tanto anodo quanto catodo) são de carbono com platina de catalisador. O único líquido nessa célula é a água, então os problemas de corrosão são mínimos.

O gerenciamento de água é essencial para o bom funcionamento dessa célula a combustível, pois a membrana precisa ser hidratada. Outro ponto essencial é uma maior atenção no processamento de combustível, já que devido à sua faixa de operação inferior a 100°C, a presença de substâncias como CO são extremamente tóxicas e, portanto, o combustível precisa ser o mais puro possível. É ainda necessária uma grande utilização de platina como catalisador, mais que a quantidade utilizada nas PAFC.

A PEFC são as mais usadas para veículos movidos a célula combustível, e por isso o investimento nesse tipo de célula a combustível no começo do século foi muito maior que o de todos os outros tipos combinados [4]. Essa preferência da PEFC em veículos se deve principalmente à três vantagens: baixa temperatura de operação, alta densidade energética, uso de um eletrólito sólido e baixa corrosão. Porém, como já dito, é necessária uma grande quantidade de metal nobre para o catalisador que pode ser facilmente contaminado.

2.3.2. Célula a combustível alcalina (AFC)

O eletrólito dessa célula é uma solução de hidróxido de potássio que pode ser mais concentrada (85% de percentual de massa) ou menos concentrada (entre 35% a 50% de percentual de massa). No caso mais concentrado, a temperatura de operação fica em 200°C. No caso menos concentrado, a temperatura é de no máximo 120°C. Uma grande variedade de catalisadores pode ser utilizada para essa célula, como níquel e prata. Também para as células AFC, CO é extremamente tóxico. Além disso, CO₂ deve ser evitado pois reage com o hidróxido de potássio (KOH) formando K₂CO₃, alterando o eletrólito e prejudicando o funcionamento da célula. Por isso, geralmente hidrogênio é o combustível preferencial para esse tipo de célula.

As AFC foram uma das primeiras células a serem desenvolvidas devido à sua aplicação em espaçonaves. Mais especificamente, sua aplicação no começo era para fornecer energia elétrica a bordo da espaçonave Apollo. Porém, devido ao problema da sensibilidade a CO₂, as aplicações terrestres das células AFC são um desafio maior.

2.3.3. Célula a combustível alcalina (AFC)

O Ácido fosfórico concentrado é utilizado como eletrólito dessa célula, com temperatura de operação na faixa de 200°C. Por ter uma estabilidade considerável comparado a outros ácidos, essa célula pode operar numa faixa de temperatura considerada alta para os ácidos, superando as dificuldades que viriam em baixas temperaturas. Nessas condições, o ácido fosfórico não é um bom condutor iônico e o CO é mais tóxico, contaminando o catalisador de platina.

Esse tipo de célula foi a primeira a ser comercializada para auxiliar na produção (total ou parcial) da energia elétrica de hospitais, hotel e bases militares. Porém, a PAFC não possui um bom potencial para o uso em veículos devido aos problemas de temperatura. A temperatura do ácido fosfórico precisa ser mantida acima de 42°C, que é o seu ponto de congelamento. Para que isso seja possível, seria necessário um equipamento extra, adicionando complexidade, custo e peso ao veículo.

2.3.4. Célula a combustível de carbonato fundido (MCFC)

O eletrólito dessa célula é uma combinação de carbonatos alcalinos retidos numa matriz cerâmica de LiAlO_2 . A faixa de temperatura de operação dessa célula é consideravelmente maior que as outras já descritas, operando entre 600 e 700°C, quando os carbonatos alcalinos formam um sal fundido altamente condutivo, com os íons do carbonato provendo condução iônica. Por isso, não é necessário o uso de metais nobres para sua operação, pois o níquel do anodo e o óxido de níquel do catodo são adequados e suficientes para promover a reação e não existe uma preocupação excessiva com a contaminação por CO, também devido ao uso de altas temperaturas nessa célula. Por último, as altas temperaturas permitem um processamento quase direto de hidrocarbonetos como combustíveis, pois a alta temperatura permite a decomposição deles em hidrogênio nos eletrodos. De fato, o combustível utilizado nessas células é hidrocarboneto, e não hidrogênio.

Porém, as altas temperaturas de operação possuem uma desvantagem: o carbonato alcalino é extremamente corrosivo em altas temperaturas. Além disso, para a aplicação na indústria automobilística, é um grande problema de segurança um equipamento grande

operando em temperaturas altíssimas. Ainda é necessária uma fonte de CO₂ para formar o íon do carbonato, o que aumenta a complexidade e o custo do sistema.

A aplicação do MCFC tem sido em unidades estacionárias e também aplicações marítimas, já que seu tamanho grande e seu alto peso, além das altas temperaturas já mencionadas, não são considerados grandes problemas nesses casos.

2.3.5. Célula a combustível alcalina (AFC)

Uma membrana de cerâmica é utilizada como eletrólito dessa célula. A faixa de temperatura de operação dessa célula é a mais alta entre todos os tipos aqui descritos, podendo chegar a 1000°C. Essa alta temperatura se deve à limitação na condutividade dos eletrólitos sólidos, mas conforme a tecnologia vai se desenvolvendo, a temperatura de operação vai abaixando devido às melhorias na condutividade.

Como no MCFC, as altas temperaturas permitem a utilização de hidrocarbonetos, pois não há preocupação com corrosão por parte do CO. Uma outra vantagem dessa célula é que não há partes móveis, pois, o eletrólito é sólido.

Assim como o SOFC compartilha algumas vantagens do MCFC, possui também algumas desvantagens em comum, devido às altas temperaturas. Uma outra desvantagem considerável dessa célula é que a membrana de cerâmica é muito frágil, o que atrapalha sua utilização em aplicações com muita vibração, como em veículos. Por isso, a aplicação do SOFC é também, principalmente, unidades estacionárias para geração de energia.

Tabela 3: Reações no anodo e no catodo para as classificações de célula a combustível [4]

| Tipo | Reação no anodo | Reação no catodo |
|-------------|---|--|
| PEFC e PAFC | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ |
| AFC | $H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ |
| MCFC | $H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$ | $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^-$ |
| SOFC | $H_2 + O^= \rightarrow H_2 + 2e^-$ $CO + O^= \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^= \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$ | $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^=$ |

2.4. Análise da performance de uma célula a combustível – Performance ideal

A reação química que ocorre numa célula a combustível é similar à que ocorre numa bateria. A energia liberada na reação da célula é dada pela mudança na energia livre de Gibbs

$$\Delta G = \sum_{\text{Produtos}} G_i - \sum_{\text{Reagentes}} G_j \quad (2-1)$$

onde G_i é a energia livre dos produtos e G_j é a energia livre dos reagentes. Essa mudança na energia livre de Gibbs é também o máximo trabalho elétrico de uma célula a combustível, e pode ser escrito como

$$W_{el} = \Delta G = -nFE \quad (2-2)$$

onde n é o número de elétrons participando da reação, F é a constante de Faraday (96.487 coulombs/mol) e E é a tensão ideal da célula. A mudança na energia livre de Gibbs ainda pode ser calculada por

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2-3)$$

onde ΔH é a variação de entalpia e ΔS é a variação de entropia. A quantidade de energia térmica disponível é representada pelo ΔH e a quantidade de energia indisponível resultante da mudança de entropia no sistema é representado pelo $T\Delta S$.

A eficiência ideal de uma célula a combustível reversível é definida como

$$\eta_{ideal} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{\Delta S}{\Delta H} T \quad (2-4)$$

Na tabela 4 temos os dados termodinâmicos para algumas reações químicas. É curioso notar que para os casos de oxidação direta do carbono, ΔG é maior que ΔH , resultando numa eficiência maior que 100% através dessa definição.

Tabela 4: Dados termodinâmicos para algumas reações químicas a 25°C e 1 atm [4]

| Reação | ΔH°_{298} (kJ/mol) | ΔS°_{298} (kJ/mol K) | ΔG°_{298} (kJ/mol) | n | E° (V) | η_{ideal} (%) |
|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|--------|-----------------------|
| $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(l)$ | -286,2 | -0,1641 | -237,3 | 2 | 1,23 | 83 |
| $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(g)$ | -242 | -0,045 | -228,7 | 2 | 1,19 | 94 |
| $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO(g)$ | -116,6 | 0,087 | -137,4 | 2 | 0,71 | 124 |
| $C + O_2 \rightarrow CO_2(g)$ | -393,8 | 0,003 | -394,6 | 4 | 1,02 | 100 |
| $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2(g)$ | -279,2 | -0,087 | -253,3 | 2 | 1,33 | 91 |

Uma outra forma de se escrever a mudança na energia livre de Gibbs é

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln \frac{\prod [fugacidade\ dos\ reagentes]}{\prod [fugacidade\ dos\ produtos]} \quad (2-5)$$

onde ΔG° é a mudança na energia livre de Gibbs padrão nas condições normais de temperatura e pressão. Substituindo a equação (2-5) na equação (2-2), temos:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod [fugacidade\ dos\ reagentes]}{\prod [fugacidade\ dos\ produtos]} \quad (2-6)$$

onde E° é a tensão ideal padrão calculada com ΔG° . A equação (2-6) é conhecida como equação de Nernst. Essa equação ainda pode ser aproximada para células a combustível, já que elas operam geralmente em baixas pressões e a fugacidade pode ser aproximada pelas pressões parciais.

A equação de Nernst nos fornece uma relação entre a tensão ideal padrão e a tensão ideal da reação que ocorre na célula. Nessa equação, podemos notar que a tensão ideal cresce com o aumento da pressão parcial dos reagentes e com a queda da pressão parcial dos produtos.

Outra relação interessante é a da tensão ideal com a temperatura. A tensão na célula cai linearmente conforme a temperatura da célula aumenta, como podemos ver na figura 3 para a reação do hidrogênio com água na forma gasosa como produto.

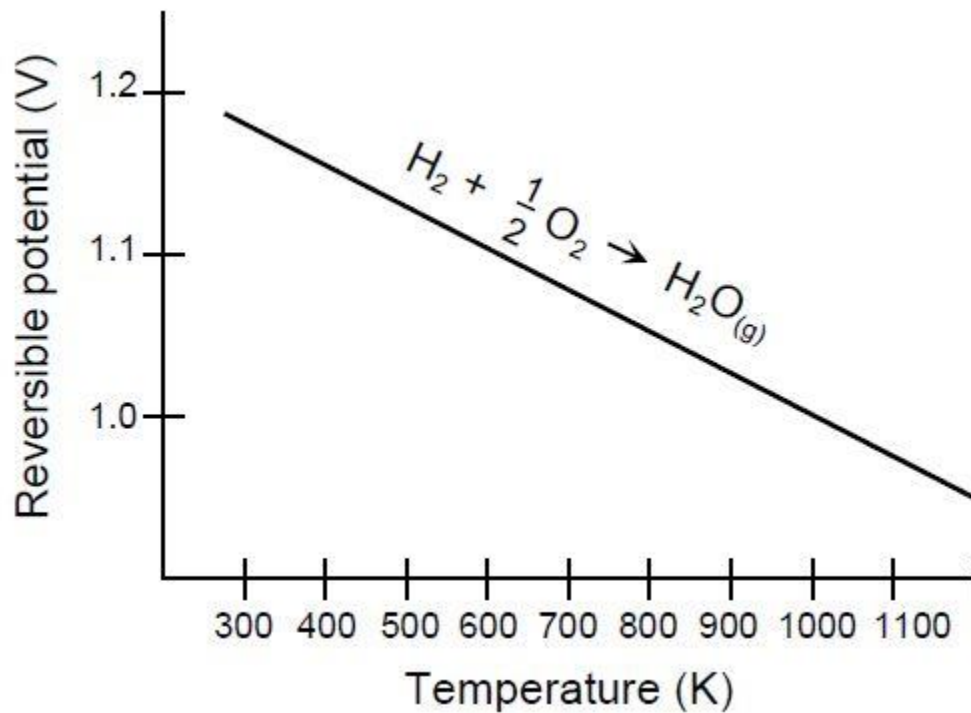


Figura 3: Tensão x temperatura na célula a combustível [4]

A tensão ideal da célula a combustível ainda possui uma forte influência da concentração dos reagentes. Quanto mais puro estiverem os reagentes tanto no catodo quanto no anodo, maior a tensão ideal. Em casos onde o ar do ambiente é diretamente alimentado no sistema ou o combustível é diferente de hidrogênio puro, a tensão da célula será reduzida.

Por fim, como já explicado nas classificações de célula a combustível, as células a combustível que atuam em baixas temperaturas (PEFC, AFC e PAFC) requerem metais nobres como catalisadores para altas taxas de reação no anodo e no catodo, e hidrogênio é o único combustível aceitável. Para células a combustível que atuam em altas temperaturas (MCFC e SOFC), não é necessário o uso de metais nobres e outros tipos de combustíveis podem ser utilizados.

2.5. Análise da performance de uma célula a combustível – Performance real

A tensão real que existe na célula é menor que a tensão ideal analisada anteriormente devido às perdas irreversíveis. Essas perdas podem estar em três categorias:

- Perda por ativação: É causada pela energia de ativação da reação nos eletrodos. Essa perda depende da reação, do material do catalisador e da atividade dos reagentes.
- Perda ôhmicas: É causada pela resistência iônica presente no eletrólito e nos eletrodos e resistência elétrica nos eletrodos e conectores. Essa perda é proporcional à densidade de corrente e depende da escolha dos materiais, da geometria do empilhamento e da temperatura.
- Perda por transporte de massa: É causada pela limitação nas taxas de transferência de massa dos reagentes. Essa perda depende fortemente da densidade de corrente, da atividade do reagente e da estrutura do eletrodo.

Na figura 4 podemos ver de que forma cada uma dessas perdas impacta para células a combustível em baixas temperaturas num gráfico V-I.

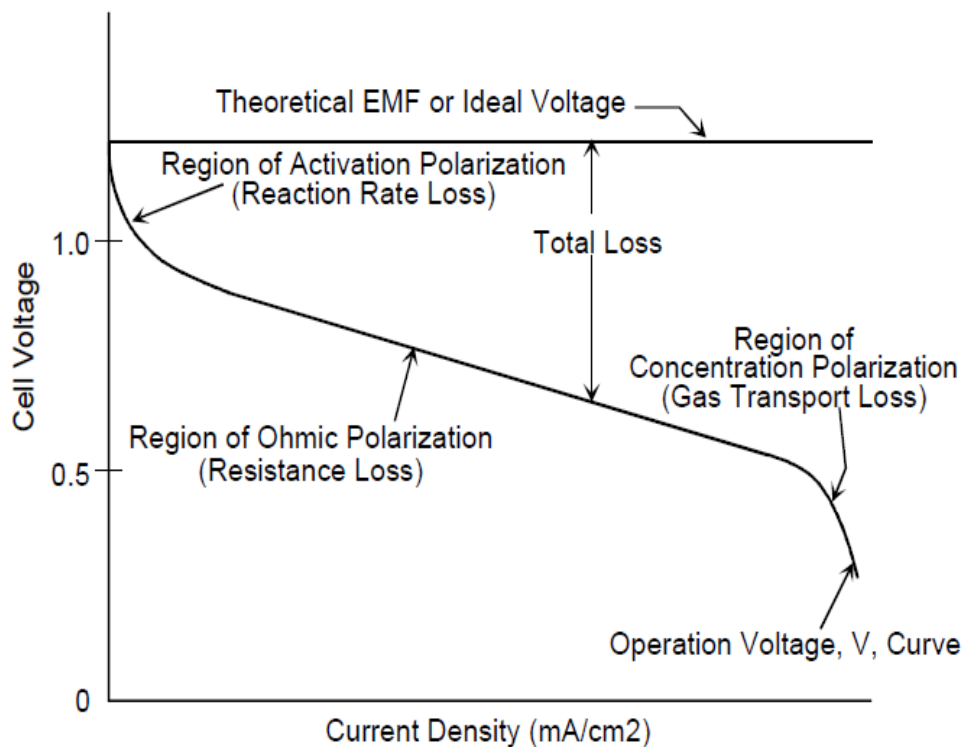


Figura 4: Efeito dos três tipos de perda na célula a combustível [4]

2.5.1. Perda por ativação

Numa reação química é necessário que uma energia, chamada de energia de ativação, seja alcançada para que a reação ocorra. As perdas causadas nesse processo são resultados de etapas da reação eletroquímica que são bastante complexas, com cada um tendo sua própria taxa de reação e energia de ativação. Os valores de taxa de reação e energia de ativação das etapas da reação limitante geralmente controlam a queda na tensão causada pelas perdas. Em alguns casos onde a perda é maior que 50 mV, é possível aproximar a queda na tensão devido às perdas pela equação.

$$\eta_{ativação} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (2-7)$$

onde α é o coeficiente de transferência de elétrons da reação no eletrodo e i_0 é a densidade de corrente da troca. Essa equação é conhecida como equação de Tafel. Essa descrição desse tipo de perda não considera alguns processos que ocasionam o aumento da perda por ativação como absorção de espécies reagentes, transferência de elétrons pelas camadas e a natureza da superfície do eletrodo.

2.5.2. Perda ôhmica

Essa é a perda causada pela resistência ao fluxo de íons no eletrólito e pela resistência ao fluxo de elétrons através do eletrodo. A maior parte da perda ôhmica é reduzida diminuindo a separação dos eletrodos e melhorando a condutividade iônica do eletrólito. Pela lei de Ohm, a perda ôhmica pode ser escrita como

$$\eta_{ohm} = iR \quad (2-8)$$

onde i é a corrente que atravessa a célula e R é a resistência total da célula, que inclui resistência eletrônica, iônica e de contato:

$$R = R_{eletrônica} + R_{iônica} + R_{contato} \quad (2-9)$$

Dependendo da classificação da célula, algumas dessas resistências domina a resistência total da célula.

Um parâmetro importante da célula a combustível relacionado a essa perda é a Resistência Específica à Área (ASR). Esse parâmetro é obtido normalizando a resistência ôhmica pela área ativa da célula. O ASR é uma função da construção da célula, escolha de material, técnica de manufatura e condições de operação. É especialmente importante para células a combustível de altas temperaturas, onde as perdas ôhmicas dominam a perda total da célula.

2.5.3. Perda por transporte de massa

A taxas de transferência de massa na célula limitam o fornecimento de novos reagentes e a evacuação de produtos durante a reação eletroquímica no eletrodo. Com isso, se forma um gradiente de concentração que conduz o processo de transporte de massa. No caso de uma célula a combustível com reagentes e produtos na fase gasosa somente (como no SOFC), os processos de difusão de gás controlam a transferência de massa. Em outras células, fluxo multifásico nos eletrodos porosos tem um impacto significativo (como no PEFC). No caso de uma célula a combustível de hidrogênio, a evacuação do produto é geralmente mais limitante que o fornecimento de combustível devido à diferença entre a difusividade do hidrogênio e do vapor de água.

Esse tipo de perda não seria relevante em casos onde a densidade de corrente é baixa e há alta concentração de reagente, mas em condições reais onde há alta densidade de corrente e baixa concentração de ar e combustível essa perda possui uma contribuição notória na perda da célula.

A perda por transporte de massa pode ser definida como

$$\eta_{massa} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (2-10)$$

onde i é definido como

$$i = \frac{nFD(C_B + C_S)}{\delta} \quad (2-11)$$

onde D é o coeficiente de difusão do reagente, C_B é a concentração do meio (eletrodo), C_S é a concentração da superfície do eletrodo e δ é a espessura da camada de difusão. E i_L é definido como

$$i_L = \frac{nFD C_B}{\delta} \quad (2-12)$$

A equação (2-11) é conhecida como primeira lei da difusão de Fick e calcula a taxa de transporte de massa para a superfície de um eletrodo, enquanto i_L é a corrente limitante, que é uma medida da taxa máxima a qual o reagente pode ser fornecido ao eletrodo.

2.5.4. Efeito das perdas acumuladas

Definidos os três tipos de perda, podemos calcular o impacto dessas perdas na tensão da célula a combustível. Em cada um dos eletrodos, podemos somar as perdas de massa e de ativação que ocorrem dentro dos eletrodos:

$$\eta_{eletrodo} = \eta_{ativação} + \eta_{massa} \quad (2-13)$$

E essas perdas influem na tensão ideal dos eletrodos da seguinte forma:

Para o anodo

$$V_{anodo} = E_{anodo} + \eta_{anodo} \quad (2-14)$$

Para o catodo

$$V_{catodo} = E_{catodo} - \eta_{catodo} \quad (2-15)$$

sendo V_{anodo} e V_{catodo} as tensões reais dos eletrodos. As perdas causam um aumento da tensão no anodo e uma perda na tensão do catodo, causando perda na tensão da célula.

Para chegarmos na tensão real da célula, incluímos junto com as tensões reais dos eletrodos a perda ôhmica

$$V_{célula} = V_{catodo} - V_{anodo} - iR \quad (2-16)$$

ou substituindo as equações (2-14) e (2-15) na (2-16)

$$V_{célula} = \Delta E_e - \eta_{catodo} - \eta_{anodo} - iR \quad (2-17)$$

onde $\Delta E_e = E_{catodo} - E_{anodo}$.

O grande desafio do desenvolvimento das células a combustível é trabalhar de forma que essas perdas sejam reduzidas e a tensão real se aproxime da tensão ideal. Esse objetivo tem sido trabalhado através de modificações na construção da célula a combustível e nas condições de operação. Porém, alterando as condições de operação para condições muito severas (aumento da pressão do gás, aumento de temperatura) podem resultar em perda de durabilidade e estabilidade da célula.

2.6. Fornecimento de combustíveis para veículos movidos à célula a combustível

Um dos grandes desafios para os veículos movidos a célula a combustível é o fornecimento de combustível. Para esse tipo de aplicação, o hidrogênio é o melhor combustível possível. Porém, a produção e o armazenamento de hidrogênio são dois problemas a serem considerados na construção do veículo. Existem duas formas de se fornecer hidrogênio para a célula a combustível: a primeira é produzindo o hidrogênio externamente e somente armazenar o hidrogênio dentro do veículo, enquanto a segunda é produzir o hidrogênio dentro do veículo e alimentar diretamente a célula a combustível.

Existem três principais formas de se armazenar hidrogênio em um veículo: hidrogênio comprimido num container à temperatura ambiente, hidrogênio líquido à baixa temperatura e o método do metal híbrido. O método do metal híbrido é a utilização de certos metais que se combinam com o hidrogênio formando componentes estáveis nas CNTP e são capazes de liberar o hidrogênio quando for necessário alterando a pressão e a temperatura.

Quanto à produção de hidrogênio no veículo, é feita geralmente por reforma catalítica, que é uma operação química que extrai hidrogênio de hidrocarbonetos, que podem ser

preferencialmente gasolina, metano ou metanol pois reformam mais facilmente. Existem três principais métodos de reforma catalítica: reforma catalítica a vapor, reforma catalítica por meios térmicas e reforma catalítica por oxidação parcial. A reforma catalítica a vapor pode ser usada para gasolina, metano ou metanol, porém as outras duas reformas catalíticas são geralmente usadas apenas para gasolina.

2.7. Configuração de um veículo híbrido célula a combustível e elétrico

Como já explicado, as células a combustível são uma grande fonte de energia limpa e uma das maiores apostas na indústria automobilística para geração de energia sem emissões com alta eficiência quando comparados com os veículos convencionais com motor de combustão interna. Entretanto, veículos a célula a combustível possuem algumas desvantagens como uma unidade de potência pesada, demorado tempo de arranque e baixa potência de saída em conduções de baixa velocidade.

Uma solução para superar essas desvantagens é a hibridização do veículo movido à célula a combustível utilizando uma fonte secundária de energia. A configuração de um veículo híbrido célula a combustível e elétrico é mostrado na figura 5.

Nessa configuração híbrida, a célula a combustível é a fonte primária de energia e há uma fonte secundária fornecida pelo sistema de armazenamento de energia (normalmente uma bateria) que auxilia em momentos específicos como em picos de potência. De acordo com a necessidade de potência e torque que vem dos pedais de aceleração e de frenagem, o controlador do veículo controla a quantidade de potência e torque de saída entre essas duas fontes de energia. Em casos de pico, como em aceleração rápidas, tanto a célula a combustível quanto a bateria fornecem energia para o motor elétrico. Durante a frenagem, o motor elétrico atua como gerador e converte uma parte da energia de frenagem em energia elétrica, armazenando na bateria. Por fim, quando as exigências de potência forem abaixo da potência nominal da célula a combustível, ela pode recarregar a bateria para que não seja necessária uma recarga externa, sendo que a potência nominal da célula a combustível não é a potência máxima, mas sim a potência ótima.

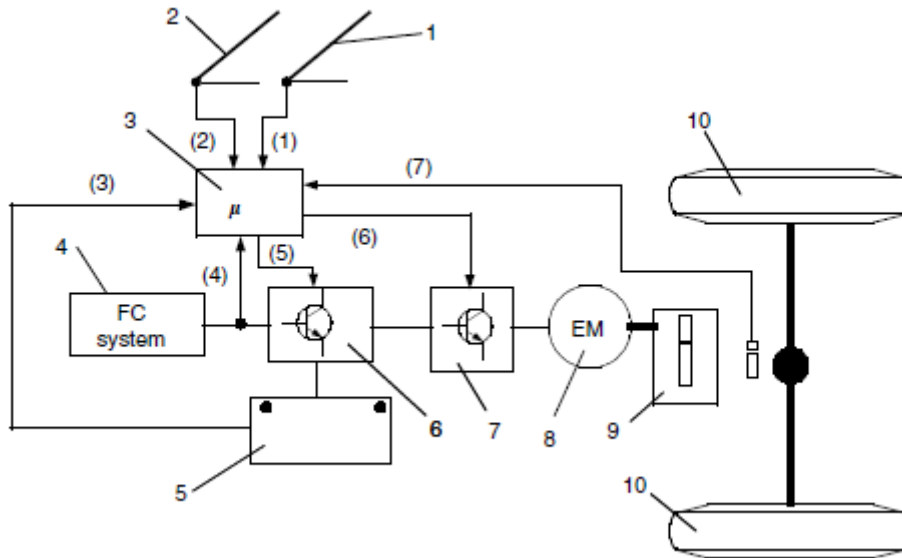


Figura 5: Configuração de um veículo híbrido célula a combustível e elétrico [10]

1: pedal do acelerador; 2: pedal do freio; 3: controlador do veículo; 4: sistema da célula a combustível; 5: sistema de armazenamento de energia; 6: interface eletrônica; 7: controlador do motor; 8: motor elétrico de tração; 9: transmissão; 10: rodas. (1): sinal do comando de tração; (2): sinal do comando de freio; (3): sinal do sistema de armazenamento de energia; (4): sinal de potência da célula a combustível; (5): sinal de controle da interface eletrônica; (6): sinal de controle do motor; (7): sinal de velocidade.

Como acontecerá esse fluxo de energia entre a célula a combustível, a bateria e as rodas é determinado pela estratégia de controle configurada no controlador do veículo. Essa estratégia precisa garantir três pontos:

1. A potência de saída do motor elétrico sempre atende as demandas de potência
2. O nível de energia na bateria é sempre mantido em sua região ótima
3. A célula a combustível opera na sua faixa de operação ótima

E para isso, existem três principais estratégias de controle para diferentes situações:

1. Modo estático: Nem a célula a combustível e nem a bateria fornecem potência para as rodas.
2. Modo de frenagem: A célula a combustível não opera e a bateria absorve a energia regenerativa recuperada através da frenagem pelo motor elétrico.

3. Modo de tração:

- Se a potência requerida for maior que a potência nominal da célula a combustível, o modo híbrido é utilizado em que a célula a combustível opera na sua potência nominal e a potência restante necessária é fornecida pela bateria.
- Se a potência requerida for menor que a potência mínima da célula a combustível e a bateria precisa ser recarregada, a célula a combustível opera com sua potência nominal e a potência extra que não vai para as rodas vai para recarregar a bateria. Se a bateria não precisa de recarga, a célula a combustível não opera e a bateria sozinha opera o veículo.
- Se a potência requerida estiver entre a potência mínima e a potência nominal da célula a combustível e a bateria não precisar ser recarregada, a célula a combustível opera sozinha o veículo. Se a bateria precisar ser recarregada, a célula a combustível opera em sua potência nominal e a potência extra que não vai para as rodas vai para recarregar a bateria.

2.8. Grau de hibridização

De acordo com cada estratégia de controle e com cada necessidade de potência do veículo, existem diversas combinações de potência fornecida entre a célula a combustível e a bateria. Por isso, foi criado um parâmetro que relaciona essas potências que se chama grau de hibridização (DOH). Esse parâmetro pode ser definido tanto usando como base a potência da célula a combustível [11] ou a potência da bateria [12]. Nesse estudo, utilizaremos como base a potência da bateria e podemos escrever.

$$DOH = \frac{p_{bat}}{p_{fc} + p_{bat}} \quad (2-18)$$

onde p_{bat} é a potência nominal da bateria e p_{fc} é a potência nominal da célula a combustível. De acordo com HUANG, M., et al. [11], a faixa normal de DOH é entre 0,177 e 0,661.

Existem alguns tipos padrões de veículos híbridos de acordo com a faixa do grau de hibridização. Na tabela 5 temos os diferentes tipos de híbridos com as características que possuem.

Tabela 5: Características de diferentes tipos de veículos híbridos [13]

| Tipo | Sistema Start-Stop | Freio regenerativo e auxílio elétrico | Modo Charge-Depleting | Recarregável |
|------------------|---------------------------|--|------------------------------|---------------------|
| Híbrido micro | Sim | Não | Não | Não |
| Híbrido leve | Sim | Sim | Não | Não |
| Híbrido completo | Sim | Sim | Sim | Não |
| Híbrido plug-in | Sim | Sim | Sim | Sim |

- **Híbrido micro:** esses veículos são conhecidos como “start-stop”, pois desligam o motor quando o carro está parado e ligam quando necessitados pelo motorista. Possuem uma bateria para realizar essa operação intensa de liga e desliga, mas tecnicamente não são híbridos reais pois não utilizam duas fontes de energia diferente.
- **Híbrido leve:** são veículos que utilizam uma bateria para auxílio do motor convencional ou para aproveitar a energia recuperada do freio regenerativo. Porém, esse tipo de híbrido não é capaz de uma propulsão totalmente elétrica.
- **Híbrido completo:** são veículos que além de contarem com as vantagens de um híbrido leve, possuem uma bateria com potência suficiente para operar sozinha em determinadas condições.
- **Híbrido plug-in:** são veículos híbridos completos que, pela grande capacidade da bateria, capaz de viajar longas distâncias, podem ser recarregados externamente, e não apenas pelo motor convencional em momentos onde a potência requerida é menor que a potência nominal.

3. ADVISOR

3.1. Softwares de simulação de veículos

Com todas as vantagens das células a combustível já discutidas aqui e observando o enorme potencial que possui, o número de pesquisas nessa área tem aumentado cada vez mais ultimamente. Em 2018, por exemplo, o Departamento de Energia dos Estados Unidos anunciou um investimento de 39 milhões de dólares para a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias na em célula a combustível. [14]

Para analisar novos modelos de veículos movidos à célula a combustível, é necessário o uso de um software que possa estimar a performance desses veículos. Atualmente, não existe uma grande variedade de softwares disponíveis para o público em geral que modelem veículos a célula a combustível. Um dos mais simples e populares é o ADVISOR (ADvanced VehIcle SimulatOR) do Instituto de Energia Renovável Nacional (*National Renewable Energy Institute* – NREL). Estima-se que entre seu lançamento no final de 1994 e 2002, mais de 4500 pessoas baixaram o ADVISOR, sendo um terço desses downloads vindo de universidades e dois terços vindo da indústria. [15] Entre algumas empresas famosas de usuários do ADVISOR temos a DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Corp., Delphi Automotive Systems, Visteon entre várias outras.

3.1.1. Sobre o ADVISOR

O ADVISOR é um simulador de veículos que funciona no ambiente do Matlab/Simulink desenvolvido para uma análise rápida de performance e consumo de combustível de veículos convencionais, elétricos, híbridos e célula a combustível. Ele foi primeiramente desenvolvido em novembro de 1994 com o objetivo de ajudar o Departamento de Energia dos Estados Unidos com o programa de veículos híbridos elétricos a entender melhor os desafios técnicos presentes na construção desses veículos.

Com essa missão de ajudar no programa de veículos híbridos elétricos, o ADVISOR foi construído inicialmente para cumprir certos requisitos. O programa precisava ser: acurado para permitir a comparação entre diferentes configurações de sistemas de transmissão, rápido para garantir análises de veículos e estudos paramétricos multidimensionais em altas

velocidades, flexível para avaliar veículos com diferentes estratégias de controle e combinações de componentes, público para compartilhar com potenciais colaboradores e promover uma maior compreensão dos veículos híbridos elétricos para o público, capaz de modelar veículos de qualquer tipo e de fácil utilização. [16]

Em geral, o usuário passa por duas etapas para fazer a simulação: definir o veículo usando componentes medidos ou estimados e dados do veículo e escolher um ciclo de direção para o veículo percorrer. O ADVISOR vai então calcular o desempenho do veículo durante o ciclo.

O ADVISOR utiliza o que se chama simulação “backward-facing”. O programa recebe a velocidade desejada ou requerida como entrada e determina os torques, velocidades e potências que o sistema precisa para atingir essa velocidade, ou seja, o fluxo de informação é ao contrário, saindo das rodas para o eixo para a caixa de marchas e assim por diante. O contrário desse tipo de simulação seria a chamada “forward-facing”, em que um modelo de motorista é incluído, que percebe a velocidade requerida e responde com uma posição do acelerador ou do freio, a qual o sistema responde com um torque. Essa simulação é útil para a construção de sistemas de controle, mas tem a desvantagem de demorar muito mais para rodar.

Como o ADVISOR utiliza esse modo de simulação, seus modelos de componentes são praticamente estáticos e incapazes de prever fenômenos numa escala de tempo menor que um décimo de segundo. Vibrações físicas, oscilações de campo elétrico e outras dinâmicas não podem ser calculadas através do ADVISOR e por isso não são levados em consideração.

Porém, os modelos de componentes do ADVISOR podem ser ampliados ou melhorados de forma relativamente fácil devido à sua construção, mas é necessária uma familiaridade com o ambiente do Matlab/Simulink. E para resolver a questão do estudo de efeitos transientes ignorados pelo ADVISOR, já existem algumas ferramentas acopladas ao ADVISOR que fazem um estudo mais detalhado como Saber, Simplorer e Sinda/Fluint.

3.1.2. Simulação de veículos usando o ADVISOR

O ADVISOR pode ser utilizado tanto através de sua interface gráfica quanto através de comandos no Matlab. Nesse trabalho, todas as simulações foram obtidas utilizando a interface gráfica do ADVISOR. Para abrir o programa é necessário selecionar a pasta do

ADVISOR no Matlab e digitar “ADVISOR” na janela de comando. Ao fazer isso, a tela inicial do ADVISOR aparece, conforme mostrado na figura 6.



Figura 6: Tela inicial do ADVISOR

Nessa tela já é possível selecionar a unidade entre métrica e americana, mas esse dado pode ser alterado facilmente depois dentro do programa. O “help” contido nessa tela é extremamente útil e necessário para entender melhor como usar o programa.

Clicando em “start”, chegamos na tela de entrada dos dados do veículo, conforme mostrado na figura 7. Nessa tela o usuário pode escolher entre opções salvas do próprio programa um modelo de veículo pré-definido e ir alterando os componentes individualmente. Vamos passar por cada uma das configurações alteráveis dessa tela.

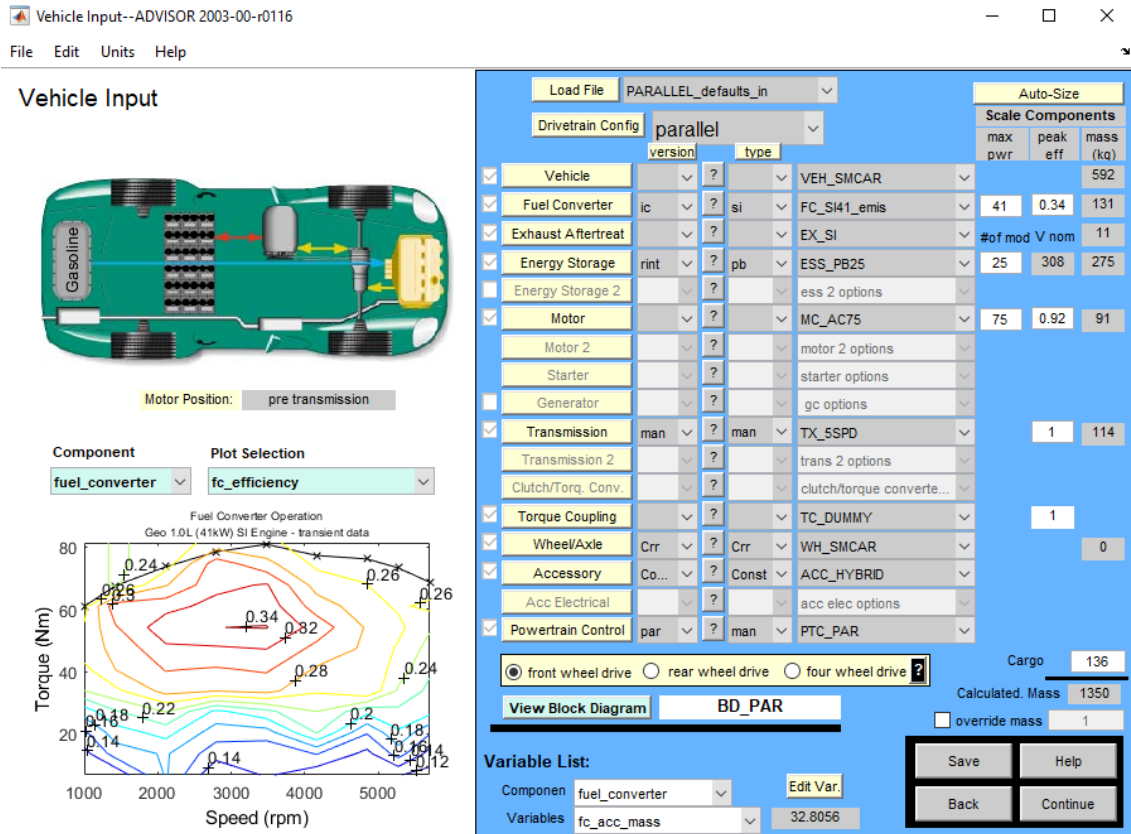


Figura 7: Tela de entrada de dados do veículo

- **Drivetrain Config:** Define a configuração do sistema de transmissão do veículo, que contém os elementos de propulsão do sistema que produzem e transmitem potência para as rodas. Pode ser convencional, paralelo, em série, célula a combustível, veículo elétrico ou algumas opções de veículos existentes no mercado. Os sistemas de transmissão no ADVISOR são organizados em diagramas de bloco, e é possível criar um diagrama de bloco próprio na opção custom. Uma mudança nessa opção altera a figura do veículo na parte esquerda da tela e altera os componentes disponíveis para definição embaixo.
- **Version e type:** Representam respectivamente a versão e o tipo do componente escolhido. Cada entrada tem diferentes grupos de possibilidade de escolha que o ADVISOR chama de versão, e para cada versão podem existir subgrupos que o ADVISOR chama de tipo. Para o Powertrain Control, por exemplo, existem 7 versões. Em uma delas, convencional, existem três tipos diferentes: transmissão manual, automática ou continuamente variável.

- **Vehicle:** Modelo de veículo utilizado na simulação. Essa escolha altera valores de massa, coeficiente de arrasto, área frontal, altura do centro de gravidade entre outros dados do veículo.
- **Fuel Converter:** Modelo que simula a fonte de energia para o veículo. No caso de um motor de combustão interna, é o dispositivo que converte combustível em energia utilizável para o sistema de transmissão. No caso da célula a combustível, é o dispositivo eletroquímico que converte combustível em energia utilizável para o sistema de transmissão. É um dos pontos mais importantes para a simulação e define diversas características do sistema.
- **Exhaust Afttreat:** Modelo que simula o sistema de exaustão e o tratamento dos gases de escape. A principal saída desse modelo é o valor da emissão do escapamento de HC, CO, NO_x e PM em gramas por segundo, mas também define a temperatura tanto dos componentes do sistema como dos gases de escape. Esse dado se aplica apenas aos veículos que possuem motores de combustão interna.
- **Energy Storage:** Modelo que simula o banco de baterias do sistema para veículos híbridos e elétricos. É um dos componentes mais difíceis de ser modelado e no ADVISOR existem 4 versões diferentes de modelo disponíveis: RC model (modelo de capacitância de resistência, inclui efeitos transientes na bateria), Rint model (modelo de resistência interna da bateria, modela a bateria com uma fonte de tensão e uma resistência interna), Fundamental Lead Acid Model (modelo baseado nos processos físico-químicos que ocorrem na carga e descarga, incluindo também variação de performance e propriedades do material com a temperatura) e Neural Network Model (modelo de rede neural criado com potência, tensão, corrente elétrica e estado de carga de um teste específico da University of Colorado).
- **Motor:** Modelo do motor elétrico do veículo híbrido ou elétrico, responsável por transformar o torque e velocidade requisitados em energia elétrica e converter a entrada de energia elétrica em saída de torque e velocidade.
- **Generator:** Modelo que transforma o torque e a velocidade fornecidos por um motor térmico em energia elétrica, presente apenas nos carros híbridos em série.

- **Transmission:** Modelo de transmissão do torque do sistema para as rodas do veículo. Existem quatro versões diferentes no ADVISOR: manual, automático e duas versões de transmissão continuamente variáveis.
- **Torque Coupling:** Modelo do acoplador de torque, responsável por combinar duas fontes de torque para fornecer o torque resultante para a caixa de marchas. Só é necessário para os híbridos em paralelo.
- **Wheel/Axle:** Modelo do sistema de tração contendo rodas, pneus e eixo. Existem duas versões no ADVISOR: modelo de coeficiente constante de resistência ao rolamento e modelo usando parâmetros de resistência ao rolamento do SAE J2452.
- **Accessory:** Modelo de acessórios vinculados ao motor. Podem ser de quatro versões no ADVISOR: modelo de carga de acessórios de potência constante, modelo de carga de acessórios de potência variável e dois tipos diferentes de simulação (Saber e Sinda/Fluint).
- **Powertrain Control:** Define tanto o controle do motor quanto o controle da embreagem. Suas versões incluem os diferentes tipos de sistemas de transmissão e seus tipos incluem as formas de transmissão.
- **Traction Control:** Logo abaixo das opções do veículo em que é possível escolher versão e tipo, existe uma caixa amarela com as opções “front wheel drive”, “rear wheel drive” e “four wheel drive”. Isso é a escolha do controle de tração do veículo, podendo ser apenas em duas rodas (rodas dianteiras ou traseiras) ou nas quatro rodas.
- **Variable List:** Nessa parte da tela é possível ver e editar as variáveis de cada um dos componentes selecionados. Clicando em “Edit Var.” abre uma caixa onde é possível escrever o nome do valor da variável enquanto embaixo é mostrado o valor default. Nessa caixa é possível ver todos os valores alterados das variáveis. Para a massa, é possível editar o valor da massa calculada somando as massas dos componentes clicando na caixa do “override mass” no canto inferior direito e colocando o valor desejado ao lado.

Após definir os dados de entrada, o usuário pode então avançar para a próxima tela, mostrada na figura 8. Essa tela é a de definição dos parâmetros de simulação. No lado esquerdo, é mostrado um gráfico de velocidade/elevação por tempo do ciclo selecionado e embaixo aparecem estatísticas e dados desse ciclo. No lado direito, temos algumas opções que vamos abordar separadamente:

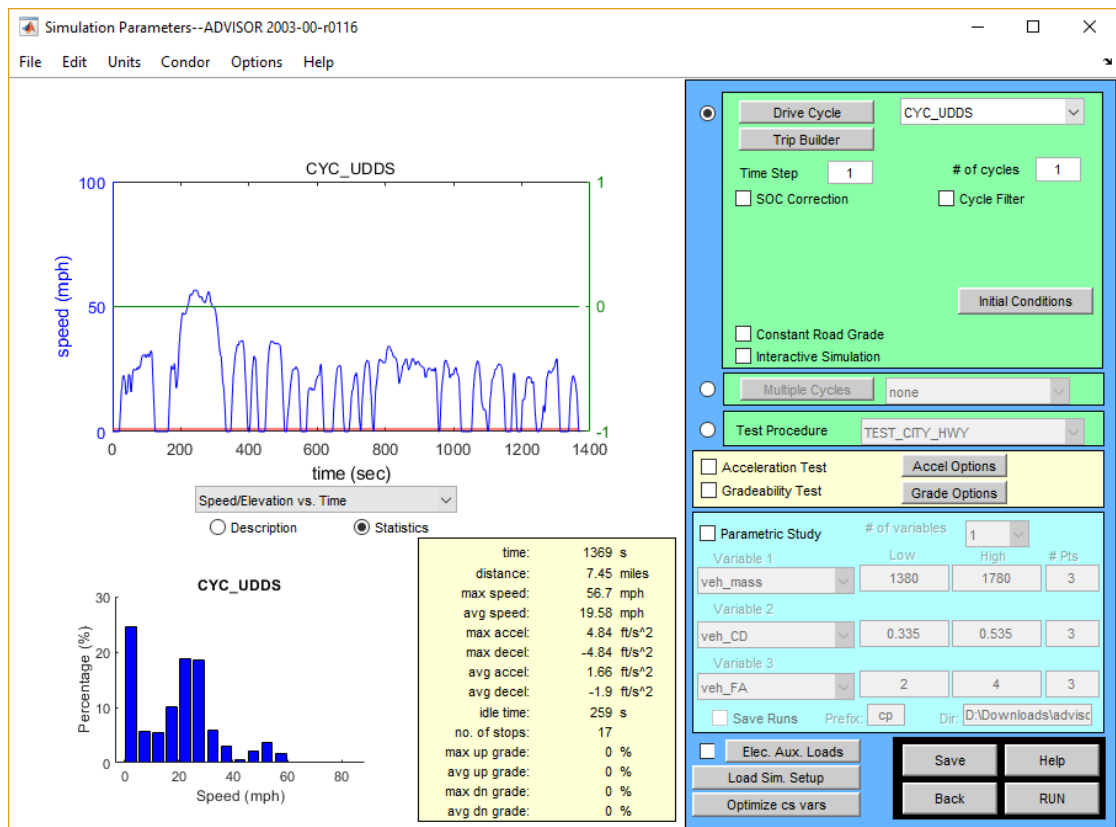


Figura 8: Tela de definição dos parâmetros de simulação

- Cycle options: Nas caixas verdes, o usuário pode controlar de várias formas o ciclo que será utilizado na simulação. É possível escolher três opções: Drive Cycle, Multiple Cycles e Test Procedure.

Na primeira caixa, o usuário pode escolher dentre as opções pré-definidas algum ciclo para a simulação. Caso o usuário queira um ciclo diferente, ele pode criar um novo combinando ciclos utilizando Trip Builder. Além da escolha do ciclo, é possível fazer pequenas alterações e ajustes nele, como número de ciclos, correção para o estado de carga, condições iniciais do ambiente, entre outros. É possível ainda adicionar uma inclinação constante no ciclo já que o padrão, como mostrado na figura, é uma elevação nula do terreno. A última opção dessa primeira caixa permite ao usuário rodar uma simulação interativa em tempo real, podendo alterar os parâmetros durante a simulação e vendo na hora as alterações que isso causa nos resultados.

Na segunda caixa, o usuário pode rodar diversos ciclos com as mesmas condições iniciais em sequência. É um modo de agilizar o processo se o usuário pretende rodar vários

ciclos em sequência, pois o ADVISOR roda cada um separadamente e salva os resultados, diferente do Trip Builder que faz um único ciclo juntando diferentes ciclos.

Na terceira caixa, o usuário pode escolher entre as opções pré-definidas de testes que já combinam alguns dos ciclos disponíveis na primeira caixa, além dos testes de aceleração e ladeira.

- Tests: Na caixa amarela, é possível incluir logo após o ciclo escolhido testes de aceleração e de ladeira. Essa opção só fica disponível se a primeira caixa verde estiver escolhida, já que marcando a segunda a simulação só rodará vários ciclos em sequência e marcando a terceira a simulação será apenas um teste, podendo ser inclusive um desses dois testes como já mencionado no item anterior. Funciona como testes complementares à simulação do ciclo escolhido anteriormente.

- Parametric Study: Na caixa azul, permite ao usuário escolher até três variáveis para ver o impacto dela no veículo. O usuário escolhe o número de variáveis e, para cada uma delas, escolhe um valor mínimo, um valor máximo e o número de pontos desejado no resultado. Com isso, será simulado um número de vezes suficiente para cobrir toda a matriz de pontos dados das variáveis.

Enfim, após definir também os parâmetros de simulação, o usuário pode rodar as simulações desejadas. Na figura 9 vemos a tela de resultados. Na parte esquerda temos alguns gráficos da simulação que podem ser definidos no canto superior direito. Por fim, temos os valores de consumo de combustível, emissões de poluentes, resultados dos testes de aceleração e ladeiras se foram selecionados na tela anterior e é ainda possível gerar uma figura com o uso de energia de cada componente durante o ciclo.

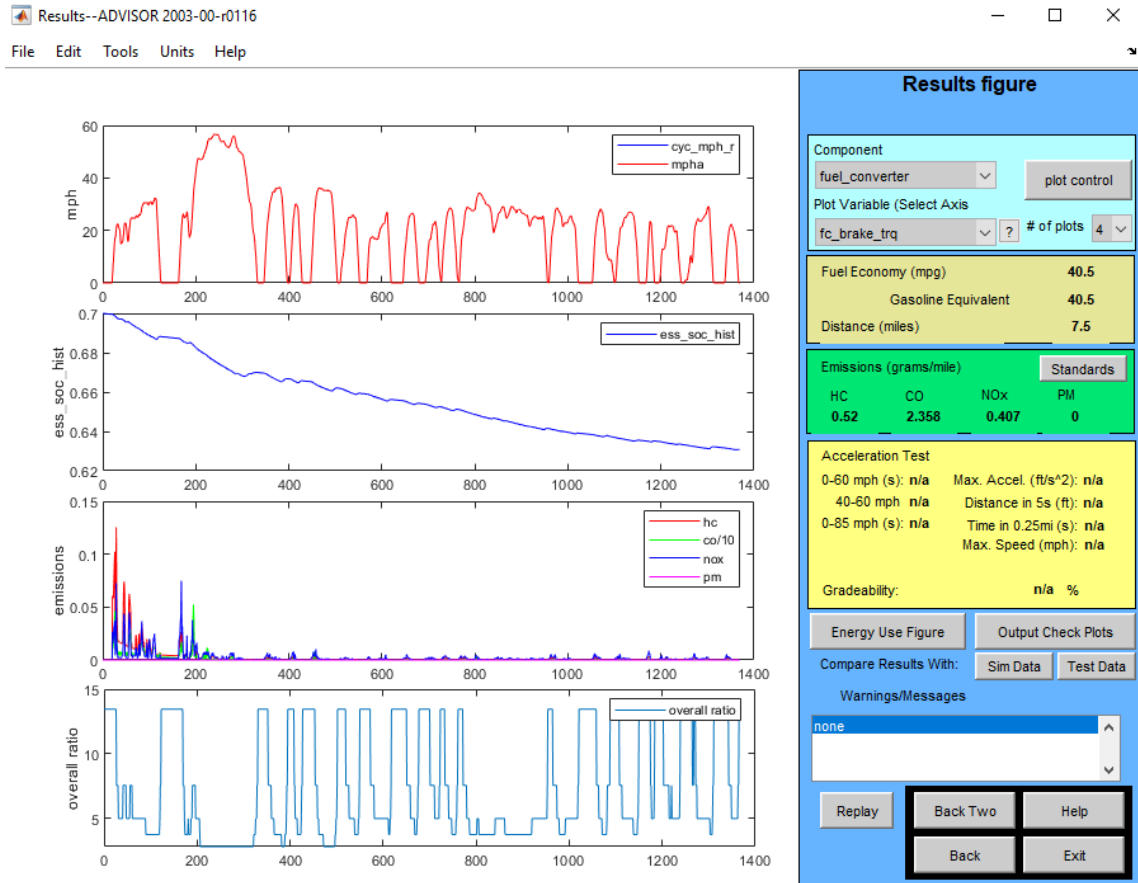


Figura 9: Resultados da simulação

4. SIMULAÇÃO

4.1. Especificações do Hyundai Nexo

O objetivo desse trabalho é apresentar uma simulação do Hyundai Nexo, o novo veículo da Hyundai movido à célula a combustível que conta ainda com um banco de baterias de íon lítio como fonte auxiliar de energia. A Hyundai tem sido uma das pioneiras no desenvolvimento de tecnologia da célula a combustível começando suas pesquisas em 1998. Em 2013, a Hyundai lançou no mercado o ix35 Fuel Cell, primeiro veículo movido à célula a combustível produzido em massa. É também a montadora com mais veículos movidos à célula a combustível registrados no mercado europeu até 2017. [17]

Uma característica relevante do Hyundai Nexo, ecologicamente falando, é que, além de não emitir gases poluentes, ele purifica o ar ao seu redor enquanto funciona. Para que a célula a combustível opere corretamente, o ar que entra do ambiente precisa ser purificado. A Hyundai garante que ao filtrar o material particulado à sua volta, 99,9% dos particulados são purificados. O ar purificado que não é utilizado pela célula a combustível é expelido, deixando o ar ao redor do veículo mais limpo. [17]

Outra característica relevante é o tempo de abastecimento. Só são necessários 5 minutos para abastecer completamente o tanque do Nexo, o que é uma ótima vantagem comparando com o alto tempo gasto para recarregar a bateria de um veículo elétrico.

Na tabela 6 abaixo, temos alguns dados relevantes do veículo obtidos através de dados da própria Hyundai.

Tabela 6: Dados do Hyundai Nexso [18]

| <i>Hyundai Nexso</i> | | |
|-----------------------------------|------------------------------|----------------|
| <i>Nome</i> | <i>Valor</i> | <i>Unidade</i> |
| Célula a combustível | | |
| Tipo | PEFC | - |
| Potência | 95 | kW |
| Bateria | | |
| Tipo | Íon Lítio | - |
| Potência | 40 | kW |
| Capacidade | 1,56 | kWh |
| Tensão | 240 | V |
| Massa do empilhamento | 89 | kg |
| Motor | | |
| Tipo | Motor de ímã permanente | - |
| Potência máxima | 120 | kW |
| Torque máximo | 395 | Nm |
| Tanque | | |
| Combustível | Hidrogênio gasoso comprimido | - |
| Capacidade | 156,6 | L |
| Pressão | 700 | bar |
| Características do veículo | | |
| Coefficiente de arrasto | 0,329 | - |
| Comprimento | 4670 | mm |
| Largura | 1860 | mm |
| Altura | 1630 | mm |
| Distância entre eixos | 2790 | mm |
| Massa | 1873 | kg |
| Tração | Dianteira | - |
| Transmissão | Automática | - |
| Área frontal | 2,52 | m ² |
| Raio do pneu | 0,351 | m |
| Performance | | |
| Velocidade máxima | 179 | km/h |
| Aceleração 0-100 km/h | 9,2 | s |
| Aceleração 80-120 km/h | 7,4 | s |
| Emissão de CO2 | 0 | g/km |

4.2. Escolha dos componentes

Tendo esses dados do veículo, podemos então começar a modificar os dados de entrada do ADVISOR para fazer a simulação. Na figura 10 temos a imagem da tela de entrada de dados com os dados selecionados para o Nexo. Na tabela 7 temos a escolha dos componentes alterados no ADVISOR com o nome do arquivo do ADVISOR e a descrição deles pelo ADVISOR também. Segue uma explicação para cada escolha:

The screenshot shows the ADVISOR software interface for vehicle input. The window title is "Vehicle Input--ADVISOR 2003-00-r0116". The interface is divided into several sections:

- Vehicle Input:** A 3D model of a car with a hydrogen fuel cell system, showing the flow of hydrogen and electricity.
- Component and Plot Selection:** A dropdown menu for "Component" is set to "fuel_converter" and "Plot Selection" is set to "fc_efficiency". Below this is a graph titled "Fuel Converter Operation" showing Efficiency (%) on the y-axis (0 to 60) and Power (kW) on the x-axis (0 to 100). The graph shows a curve that rises sharply from 0 to about 50% efficiency at 10 kW, then levels off and peaks at approximately 58% efficiency around 40 kW, before gradually declining.
- Component Selection Table:** A table with columns for component name, version, type, and mass. The components are:

| Component | version | type | max pwr | peak eff | mass (kg) |
|--------------------|---------|--------------|---------|----------|------------------|
| Vehicle | ? | VEH_smallSUV | | | 1141 |
| Fuel Converter | fcell | net | 95 | 0.6 | 358 |
| Exhaust Aftertreat | ? | EX_FUELCELL | | | #of mod V nom 25 |
| Energy Storage | rint | li | 23 | 245 | 28 |
| Motor | ? | MC_PM58 | 120 | 0.92 | 145 |
| Transmission | man | man | | | 1 50 |
| Wheel/Axle | Crr | Crr | | | 0 |
- Scale Components Table:** A table with columns for component name, max pwr, peak eff, and mass. The components are:

| Component | max pwr | peak eff | mass (kg) |
|----------------|---------|----------|-----------|
| Vehicle | | | 1141 |
| Fuel Converter | 95 | 0.6 | 358 |
| Motor | 120 | 0.92 | 145 |
| Transmission | | | 1 50 |
| Wheel/Axle | | | 0 |
- Drive Configuration:** Radio buttons for "front wheel drive" (selected), "rear wheel drive", and "four wheel drive".
- Masses:** "Cargo" is 136, "Calculated Mass" is 1883, and "override mass" is 1.
- Variable List:** A section for defining variables, with "fuel_converter" and "fc_acc_mass" (value 25) listed.
- Buttons:** "Save", "Help", "Back", and "Continue" buttons are located at the bottom right.

Figura 10: Tela de entrada de dados com componentes do modelo do Nexo

Tabela 7: Componentes do ADVISOR para o modelo do Nexo

| <i>Componente</i> | <i>Nome ADVISOR</i> | <i>Descrição</i> |
|--------------------|---------------------|--|
| Vehicle | VEH_smallSUV | Real small SUV |
| Fuel converter | FC_ANL50H2.m | ANL Model - 50kW (net) Ambient Pressure Hydrogen FC System |
| Exhaust Aftertreat | EX_FUELCELL | Default catalyst for fuel cell |
| Energy Storage | ESS_LI7_temp.m | 6 Ah Saft Lithium Ion battery |
| Motor | MC_PM58 | 58 kW (continuous), permanent magnet motor/controller |
| Transmission | TX_1SPD | 1-speed transmission |
| Wheel/Axle | WH_SUV | Wheel/axle assembly for sport utility (SUV) |
| Accessory | ACC_HYBRID | 700-W constant electric load |
| Powertrain control | PTC_FUELCELL | Powertrain control - hybrid w/thermostat cs |

- Vehicle: Foi escolhido esse modelo para representar o Hyundai Nexo já que é também um modelo menor de SUV para estimar alguns dados que não foram fornecidos de forma mais precisa, mas a maioria dos dados do veículo foram modificados posteriormente para representar melhor o modelo real do Nexo.
- Fuel converter: Foi escolhido esse modelo por ser a opção de célula combustível utilizando hidrogênio como o Nexo. Como a única opção utilizando hidrogênio era essa com 50kW de potência, foi necessária uma alteração depois.
- Exhaust Aftertreat: Foi escolhido esse modelo por ser o padrão para veículos com célula combustível e não foi encontrada nenhuma informação específica sobre o sistema de exaustão do Nexo que o diferenciasse dos demais.
- Energy Storage: Foi escolhido esse modelo por representar uma bateria de íon lítio que é a bateria do Nexo. Depois foi alterada a quantidade de módulos de modo a chegar o mais próximo da voltagem nominal da bateria.
- Motor: Foi escolhido esse modelo por ser uma das opções de motor de ímã permanente utilizado no Nexo. O ADVISOR fornece várias opções alterando a potência, mas como nenhuma fornecia a mesma potência do Nexo foi necessária uma alteração após a escolha.
- Transmission: Foi escolhido esse modelo por ser a opção permitida pelo ADVISOR de acordo com as outras configurações e ser uma transmissão de velocidade única como o Nexo.

- Wheel/Axle: Foi escolhido esse modelo por ser a opção que melhor se adequava para um veículo SUV. Como na escolha do veículo, essa escolha garante uma maior precisão usando estimativas do ADVISOR para alguns dados que não serão fornecidos, mas os dados mais importantes e disponibilizados ao público foram alterados depois.
- Accessory: Foi escolhido esse modelo por representar melhor a carga de um modelo híbrido.
- Powertrain control: Foi escolhido esse modelo por ser o modelo mais padrão de controle para veículos célula combustível pela falta de informação disponível sobre o controle utilizado no Nexø.

4.3. Alteração das variáveis

Depois de alterar os componentes, ainda são necessárias mudanças em algumas variáveis de modo a deixar o mais fiel possível ao Nexø com as informações disponíveis. Na figura 11 temos uma imagem do ADVISOR das variáveis que foram alteradas, com a informação do novo valor delas e o valor default do programa. Segue abaixo também uma explicação para a alteração de cada variável e o que ela significa:

| Name | new value | default |
|----------------|-----------|---------|
| fc_pwr_scale | 1.9 | 1 |
| fc_trq_scale | 1.9 | 1 |
| mc_trq_scale | 2.0647 | 1 |
| fc_max_pwr | 95 | 50 |
| wh_radius | 0.3509 | 0.343 |
| veh_CD | 0.329 | 0.35 |
| veh_FA | 2.52 | 2.4 |
| veh_wheelbase | 2.79 | 2.62 |
| ess_module_num | 23 | 0 |
| ess_cap_scale | 1.06 | 1 |

Figura 11: Variáveis alteradas no ADVISOR

- fc_pwr_scale e fc_trq_scale: São os fatores escalares de potência e de torque da célula a combustível. Esses valores foram alterados de forma automática pelo ADVISOR quando a potência de 95 kW da célula combustível do Nexø foi alterada, de acordo com as informações fornecidas pela Hyundai.

- `mc_trq_scale`: É o fator escalar do torque do motor. Esse valor foi alterado de forma automática pelo ADVISOR quando a potência de 120 kW do motor foi alterada, de acordo com as informações fornecidas pela Hyundai.
- `fc_max_pwr`: É a potência máxima da célula a combustível. Esse valor foi alterado apenas para confirmar a mudança da potência da célula combustível para 95 kW que já tinha sido alterado pela interface gráfica do ADVISOR, mas apesar da mudança nos valores do primeiro item dessa seção, esse valor ainda estava no default.
- `wh_radius`: É o raio do pneu. Esse valor foi alterado para ser condizente com o raio de um pneu R17, que é utilizado pelo Nexo. O Nexo pode utilizar tanto R17 quanto R19 de acordo com a Hyundai, mas o R17 foi o escolhido para a análise.
- `veh_CD`: É o coeficiente de arrasto do veículo. Esse valor foi alterado para o valor do coeficiente de arrasto ficar igual ao valor fornecido para o Nexo pela Hyundai.
- `veh_FA`: É a área frontal do veículo. Essa informação não foi disponibilizada pela Hyundai, então o valor alterado foi por um valor encontrado num site especializado em automóveis. [19]
- `veh_wheelbase`: É a distância entre os eixos do veículo. Esse valor foi alterado para que o valor da distância entre os centros das rodas dianteiras e traseiras seja igual ao valor fornecido pela Hyundai.
- `ess_module_num`: É o número de módulos da bateria. Esse valor foi alterado de forma a se chegar o mais próximo do valor da voltagem nominal de 240V fornecido pela Hyundai.
- `ess_cap_scale`: É o fator escalar da capacidade da bateria. Esse valor foi alterado de forma a fazer com que a bateria de 6 Ah do ADVISOR tivesse 6,5 Ah de capacidade como o Nexo.

Foi mantido o valor default do programa, mas é interessante ressaltar os valores de `cs_hi_soc` e `cs_low_soc`, os limites do estado de carga da bateria. O estado de carga representa a capacidade disponível da bateria em relação ao seu máximo. Para veículos híbridos em que a bateria auxilia uma fonte principal de energia é aconselhável que os limites inferior e superior do estado de carga sejam em torno de 0,5 e 0,8 respectivamente. [12] Nessa simulação, será mantido os valores padrões do ADVISOR, que são de 0,4 e 0,8. Essa escolha de valores é importante na prática também para evitar o desgaste na bateria, que nesse tipo de veículo é uma bateria com baixa capacidade.

Por fim, alterando todas as variáveis e com a escolha dos componentes, a massa calculada obtida pelo ADVISOR é de 1883 kg. Como essa massa é muito próxima à massa do veículo, deixou-se a massa calculada pelo programa. Porém, a massa dos componentes individuais possui um valor defasado devido ao ADVISOR usar dados antigos. A célula a combustível, por exemplo, tem uma massa calculada pelo ADVISOR como 3 vezes o valor da potência da célula, enquanto somente o empilhamento possui uma massa de 2,5 vezes o valor da potência. O valor encontrado para o empilhamento do Hyundai Nexu num site especializado foi de 89 kg [20], enquanto o valor calculado pelo ADVISOR seria de 237,5 kg. Os valores de massas dos componentes individuais não foram alterados e foi validado apenas o valor final da massa.

4.4. Parâmetros de simulação

Depois de definir os componentes e alterar as variáveis, é necessário escolher os parâmetros de simulação. Para a validação do modelo antes das análises do veículo, decidiu-se comparar os valores simulados com alguns valores de performance e de consumo de combustível. Na tabela 8 esses valores de referência são apresentados. Os valores de consumo de combustível foram retirados do site da EPA (United States Environmental Protection Agency), a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos. [21]

Tabela 8: Dados de performance do Nexu

| Teste | Resultado |
|--------------------------|-------------------|
| MPGe combinado | 61 (3,86 L/100km) |
| MPGe cidade | 65 (3,62 L/100km) |
| MPGe estrada | 58 (4,06 L/100km) |
| Tempo 0-100 km/h (s) | 9,2 |
| Tempo 80-120 km/h (s) | 7,4 |
| Velocidade máxima (km/h) | 179 |

Antes de continuar, é importante definir o que é o MPGe. A eficiência dos combustíveis é definida em termos de milhas por galões (MPG) no sistema americano. Porém, essa medida não é útil para veículos elétricos ou movidos à célula a combustível, já que os combustíveis nesses veículos não são vendidos em galão, tornando difícil a comparação de consumo de combustível entre veículos convencionais e veículos alternativos. Para isso, foi criado o conceito de galão de gasolina equivalente, que é o valor de cada combustível

alternativo equivalente energeticamente a um galão de gasolina. Na tabela 9 temos alguns tipos de combustíveis e suas equivalências com a energia de um galão de gasolina. [22] Utilizando esses valores de conversão é criado o MPGe, que seria o MPG equivalente

Tabela 9: Equivalências de um galão de gasolina [22]

| Tipo de combustível | Galão de gasolina equivalente |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Gasolina | 1 galão |
| Diesel | 1,13 galões |
| Gás natural comprimido | 2,57 kg |
| Gás natural liquefeito | 2,44 kg |
| Hidrogênio | 1 kg |
| Eletricidade | 33,7 kWh |

O cálculo do consumo de combustível em MPGe pode ser feito em diversos tipos de ciclos de condução. O normalmente utilizado pelo EPA é o MPGe combinado, que é uma média dos valores de MPGe da cidade e da estrada, com peso de 55% para a cidade e 45% para a estrada, de modo a tentar representar uma média da direção de todos os motoristas. [23] Essa média do MPGe é uma média harmônica pela definição da EPA, [24] então pode ser escrito como

$$MPGe_{COMB} = \frac{1}{\frac{0,55}{MPGe_{UDDS}} + \frac{0,45}{MPGe_{HWFET}}} \quad (4-1)$$

onde $MPGe_{COMB}$ é o MPGe combinado, $MPGe_{UDDS}$ é o MPGe da cidade e $MPGe_{HWFET}$ é o MPGe da estrada. Esses índices representam os nomes dos ciclos escolhidos para representarem os trajetos da cidade e da estrada. Nas tabelas 10 e 11 e nas figuras 12 e 13 temos dados desses dois ciclos e os gráficos de velocidade por tempo do ADVISOR.

Tabela 10: Dados do ciclo UDDS

| <i>Ciclo UDDS</i> | | |
|-------------------|--------------|------------------|
| Grandeza | Valor | Unidade |
| Tempo | 1369 | s |
| Distância | 11,99 | km |
| Velocidade máxima | 91,25 | km/h |
| Velocidade média | 31,51 | km/h |
| Aceleração máxima | 1,48 | m/s ² |
| Tempo parado | 259 | s |
| Número de paradas | 17 | - |

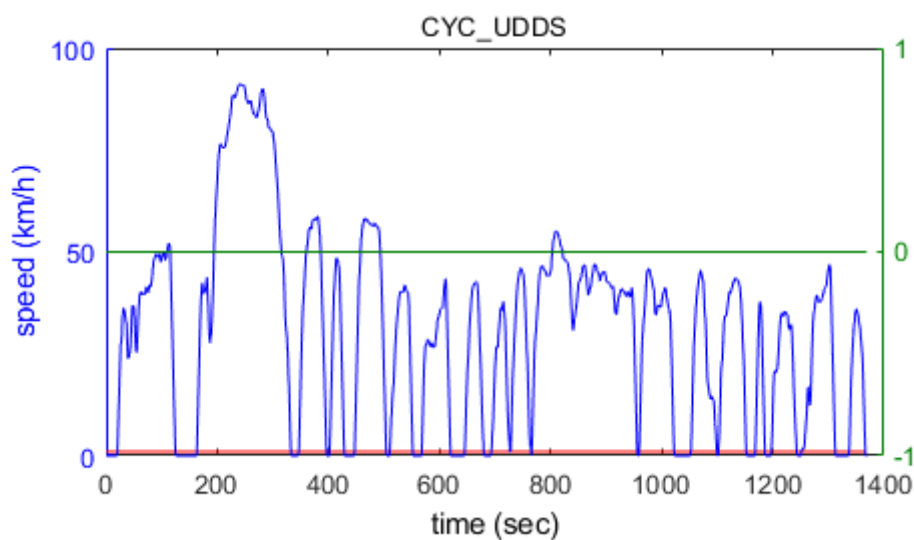


Figura 12: Velocidade x tempo do ciclo UDDS no ADVISOR

Tabela 11: Dados do ciclo HWFET

| <i>Ciclo HWFET</i> | | |
|--------------------|--------------|------------------|
| Grandeza | Valor | Unidade |
| Tempo | 765 | s |
| Distância | 16,51 | km |
| Velocidade máxima | 96,40 | km/h |
| Velocidade média | 77,58 | km/h |
| Aceleração máxima | 1,43 | m/s ² |
| Tempo parado | 6 | s |
| Número de paradas | 1 | - |

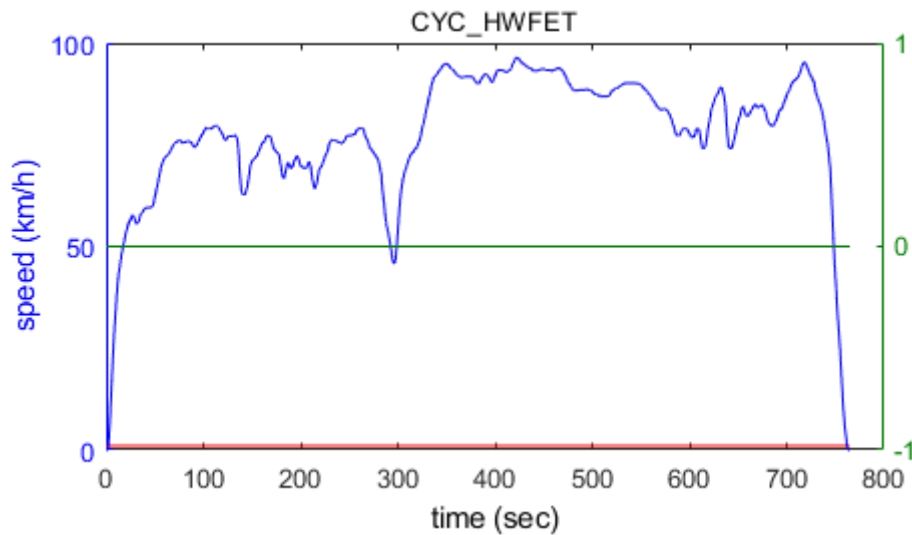


Figura 13: Velocidade x tempo do ciclo HWFET no ADVISOR

Um último parâmetro relevante alterado: o estado de carga inicial. O valor que vem do ADVISOR é de 0,7, mas foi alterado nessas simulações para 0,8 de modo que considere que o veículo comece seu percurso com a bateria no estado máximo permitido.

4.5. Validação do modelo

Definidos os componentes do veículo, alteradas as variáveis e escolhidos os parâmetros de simulação, podemos enfim simular o modelo de Nexo criado e comparar com os valores reais. Nas figuras 14 e 15 temos o resultado dos ciclos UDDS e HWFET, com os valores do teste de aceleração em ambos. Na tabela 12 temos a comparação dos resultados obtidos com os valores reais.

Tabela 12: Comparação dos resultados reais com a simulação

| Teste | Resultado | Simulação | Erro |
|--------------------------|-----------|-----------|------|
| MPGe _{COMB} | 61 | 61,1 | 0% |
| MPGe _{UDDS} | 65 | 61,3 | -6% |
| MPGe _{HWFET} | 58 | 60,9 | 5% |
| Tempo 0-100 km/h (s) | 9,2 | 14,4 | 57% |
| Tempo 80-120 km/h (s) | 7,4 | 10,6 | 43% |
| Velocidade máxima (km/h) | 179 | 150,9 | -16% |

Para os valores de MPGe, vemos que a simulação apresentou um resultado excelente. Apesar de um valor de erro de aproximadamente 0% para o $MPGe_{COMB}$, é importante ressaltar que existe um pequeno erro na simulação, já que esse valor se deve a um pequeno erro de aproximadamente 5% para mais e para menos para os $MPGe_{HWFET}$ e $MPGe_{UDDS}$ respectivamente.

Contudo, para os valores do teste de aceleração, os erros foram mais altos, especialmente para os tempos de aceleração 0-100 km/h e 80-120 km/h. Isso provavelmente se deve à falta de alguns dados mais técnicos e específicos do veículo não disponibilizados pela Hyundai. Como o foco das análises desse trabalho está nos valores de MPGe, o modelo pode ser considerado consistente se tratando do consumo de combustível.

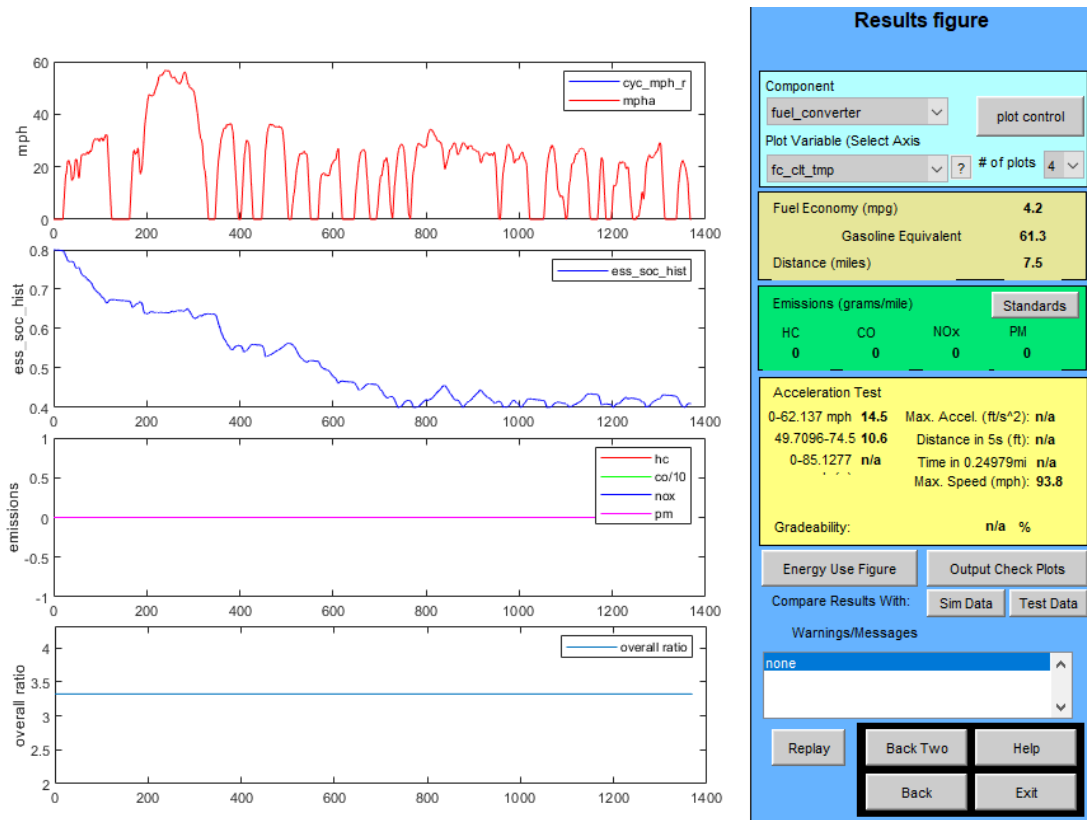


Figura 14:Resultado da simulação no ciclo UDDS

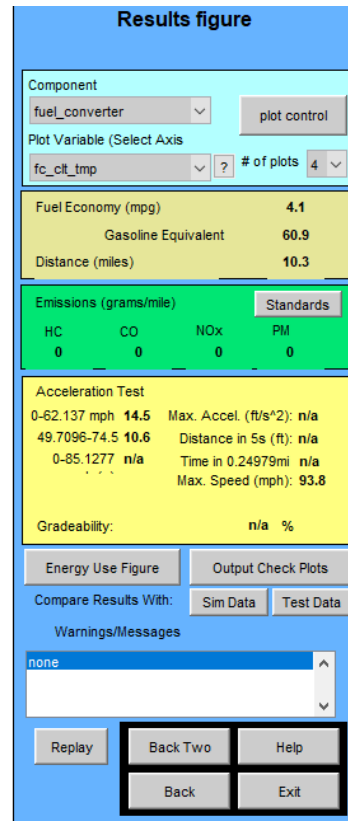
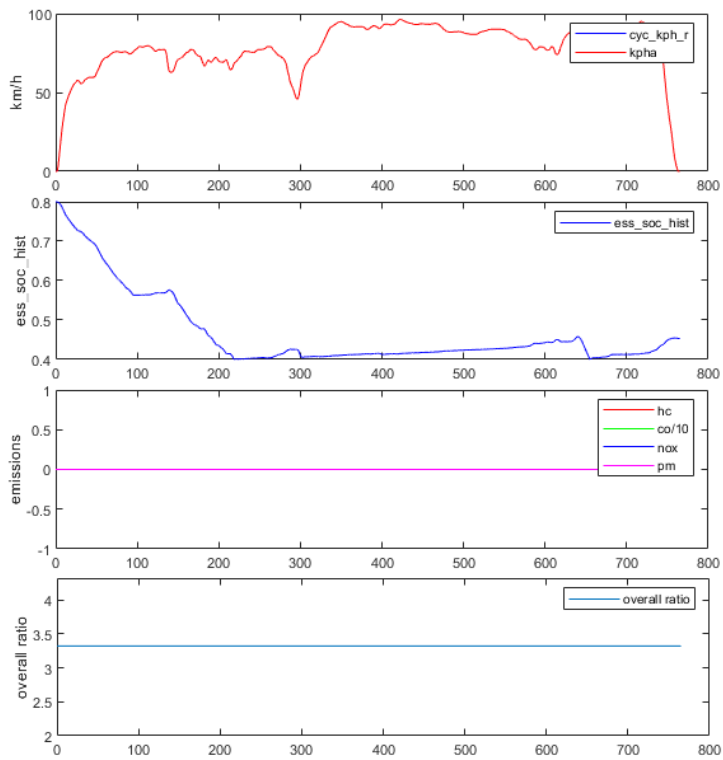


Figura 15:Resultado da simulação no ciclo HWFET

5. FATORES QUE IMPACTAM NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Nos próximos dois capítulos serão feitas análises para se avaliar o impacto de alguns parâmetros no consumo de combustível do modelo do Hyundai Nexu construído no ADVISOR. Antes disso, serão detalhados nesse capítulo alguns dos principais fatores que impactam no consumo de combustível de um veículo.

5.1. Direção agressiva

O modo como o veículo é conduzido tem um impacto significativo no consumo de combustível. A chamada direção agressiva é uma direção associada à altas velocidades e acelerações e frenagens rápidas. Segundo THOMAS et al., [25], a direção agressiva em ciclos de direção urbanos de baixa velocidade pode causar um aumento do consumo de combustível entre 25% e 68% comparado com o consumo com uma direção normal. Para os ciclos de estrada com velocidade moderada, o aumento do consumo de combustível fica entre 20% e 46% para veículos convencionais e valores levemente maiores para veículos híbridos elétricos.

Ainda segundo THOMAS et al. [25], outro ponto interessante sobre a direção agressiva é mostrado: os veículos híbridos elétricos podem possuir maior sensibilidade no consumo de combustível ao modo como o veículo é conduzido, tanto para os ciclos urbanos quanto para os ciclos de estrada. Apesar dos valores de consumo serem menores em absoluto nesses veículos, o aumento percentual é maior comparado aos veículos convencionais. Isso se deve às limitações do sistema de freio regenerativo.

5.2. Massa

A massa tem impacto direto no consumo de combustível já que um veículo com maior massa resulta numa maior energia necessária para acelerar o carro e com isso um maior consumo de combustível. A EPA [21] diz que um aumento de 45 kg na massa total do veículo

pode resultar numa redução de cerca de 1% do MPGe, afetando mais veículos leves. Por isso, além do esforço da indústria automobilística em produzir veículos com materiais mais leves, o motorista deve também evitar carga extra desnecessária com itens pesados dentro do veículo para melhorar o consumo. Se a carga extra for uma carga externa, a redução no MPGe é ainda maior devido ao impacto no coeficiente de arrasto do veículo.

O impacto no consumo de combustível da variação da massa no modelo do Hyundai Nexu será analisado separadamente no capítulo 7.

5.3. Coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto, como a massa, impacta diretamente no consumo de combustível, pois um maior coeficiente de arrasto resulta numa maior força de arrasto atuando sobre o veículo, também aumentando a energia necessária para propelir o veículo. Uma redução no coeficiente de arrasto em 0,01 pode diminuir o consumo de combustível em aproximadamente 0,2 MPGe para o ciclo combinado. [26] O coeficiente de arrasto tem um impacto maior em ciclos onde há maiores velocidades devido ao peso do componente da velocidade na força de arrasto.

Essa variável também terá seu impacto no consumo de combustível analisada no capítulo 7.

5.4. Grau de hibridização

No caso de um veículo híbrido, o percentual da potência da bateria em relação à potência total do sistema (potência da bateria e potência da célula a combustível para veículos que utilizam célula a combustível como fonte principal de energia) impacta no desempenho do veículo. A inclusão de um banco de baterias em um veículo movido à célula a combustível possibilita a recuperação de energia para o sistema através do freio regenerativo, que causa uma redução no consumo de combustível.

Veículos totalmente elétricos possuem valores maiores de MPGe comparados com veículos movidos à célula a combustível, porém possuem alguns problemas como alto tempo de recarga e baixa autonomia.

Essa variável será analisada no próximo capítulo em maiores detalhes.

5.5. Densidade energética

Cada tipo de combustível ou fonte de energia possui uma quantidade de energia por unidade de volume ou massa. Quanto maior essa quantidade de energia, menor o consumo de combustível do veículo. No caso de veículos convencionais, a utilização de gasolina formulada ou com adição de etanol (no Brasil em cada litro de gasolina comum há 27% de álcool anidro) aumenta o consumo de combustível devido a uma redução na densidade energética.

Para o caso de veículos elétricos, a escolha do tipo de bateria (chumbo-ácido, íon lítio, níquel hidreto metálico, entre outros) impacta no consumo equivalente de combustível já que cada tipo possui uma densidade energética diferente. A energia armazenada pela bateria pode ser analisada de forma análoga à energia de um veículo convencional de forma que fique possível a comparação do consumo de um veículo elétrico e um convencional.

Se um tipo de bateria possui maior densidade energética que outro, a massa do banco de baterias é menor e por consequência a massa total do veículo é menor, melhorando o consumo equivalente de combustível.

Em se tratando de energia por unidade de massa, várias opções de combustíveis têm maior densidade energética que a gasolina, incluindo o hidrogênio da célula a combustível. Porém, analisando energia por unidade de volume, a gasolina, e também o diesel, possuem os melhores valores. O hidrogênio possui uma grande quantidade de energia por massa, mas no caso do Nexo, que utiliza hidrogênio comprimido, a quantidade de energia por volume se torna mais baixa. Já as baterias possuem baixa quantidade de energia tanto por massa quanto por volume. Na tabela 13 temos dados de energia por volume e por massa das principais fontes de energia dos veículos atualmente.

Tabela 13: Energia por massa e por volume das principais fontes de energia de veículos [27]

| Combustível | MJ/kg | MJ/L |
|-------------------------|--------------|-------------|
| Hidrogênio comprimido | 142 | 9,17 |
| Diesel | 48 | 35,8 |
| GLP | 46,4 | 26 |
| Gasolina | 46,4 | 34,2 |
| Bateria de íon lítio | 0,36 - 0,875 | 0,9 - 2,63 |
| Bateria de chumbo ácido | 0,17 | 0,56 |

6. ANÁLISE DO GRAU DE HIBRIDIZAÇÃO

Neste capítulo será feita uma análise sobre o grau de hibridização do modelo validado do Hyundai Nexu apresentado anteriormente para analisar a influência do DOH no consumo equivalente de combustível de um veículo movido à célula a combustível. O DOH, como descrito na equação (2-18), é um valor entre 0 e 1 que representa o percentual da potência da bateria em relação à potência total do sistema de propulsão (bateria e célula a combustível). Quanto maior seu valor, maior a potência da bateria e menor a potência da célula a combustível. Será detalhado nas próximas seções como foi feita essa análise, os problemas encontrados, as hipóteses tomadas e soluções encontradas nesse processo.

6.1. Definindo os valores de potências

Primeiramente, foi feito o cálculo do DOH do Hyundai Nexu, mostrado na tabela 14.

Tabela 14: Potência da bateria e da célula a combustível para diferentes graus de hibridização

| DOH | P _{bat} | P _{cel} |
|------|------------------|------------------|
| 0,05 | 6,75 | 128,25 |
| 0,1 | 13,5 | 121,5 |
| 0,15 | 20,25 | 114,75 |
| 0,2 | 27 | 108 |
| 0,25 | 33,75 | 101,25 |
| 0,3 | 40 | 95 |
| 0,35 | 47,25 | 87,75 |
| 0,4 | 54 | 81 |
| 0,45 | 60,75 | 74,25 |
| 0,5 | 67,5 | 67,5 |
| 0,55 | 74,25 | 60,75 |
| 0,6 | 81 | 54 |
| 0,65 | 87,75 | 47,25 |
| 0,7 | 94,5 | 40,5 |
| 0,75 | 101,25 | 33,75 |
| 0,8 | 108 | 27 |
| 0,85 | 114,75 | 20,25 |
| 0,9 | 121,5 | 13,5 |
| 0,95 | 128,25 | 6,75 |

Como o DOH é definido pela relação entre a potência da bateria e a potência total, o DOH do Hyundai Nexó é 0,29 (arredondado para 0,3), já que a potência da bateria do Nexó é de 40 kW e a potência da célula a combustível é de 95 kW. Foram alteradas então as potências da bateria e da célula combustível de forma a manter constante a potência total do sistema de propulsão Nexó para obter valores de DOH variando de 0 a 1 com incremento de 0,05.

Com esses valores calculados, foi necessário descobrir o método para alterar esses parâmetros no ADVISOR, que será discutido na próxima seção.

6.2. Alterando os valores das potências no ADVISOR

Para alterar o valor da potência da célula combustível só é necessário alterar na própria interface gráfica do ADVISOR. Porém, para alterar a potência da bateria, é necessário mexer em outros parâmetros que influenciam na potência. Dois parâmetros que podem ser modificados pelo usuário definem a potência da bateria: o número de módulos da bateria e uma variável chamada “ess_cap_scale” que é um fator escalar que altera a capacidade máxima da bateria em Ah. Alterando algum desses dois valores, a potência no ADVISOR era também alterada. Essa mudança na potência da bateria era visualizada em um gráfico por estado de carga disponível na tela inicial do ADVISOR, mostrado na figura 16.

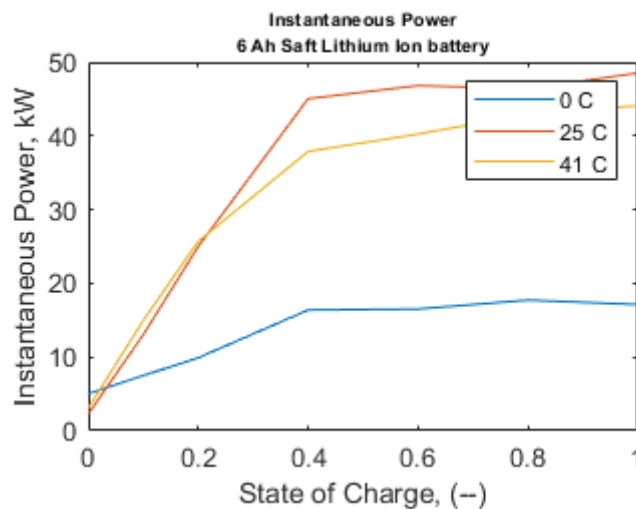


Figura 16: Potência x estado de carga da bateria no ADVISOR

Vendo esse gráfico, primeiro foi necessário tomar algumas decisões: qual das três curvas de temperatura utilizar e qual SOC utilizar para definir o valor exato da potência da bateria. Foi definido utilizar a curva de temperatura mais alta, no caso 41°C, por representar a temperatura que os módulos se aproximam durante o ciclo, como mostrado na figura 17 para o ciclo UDDS.

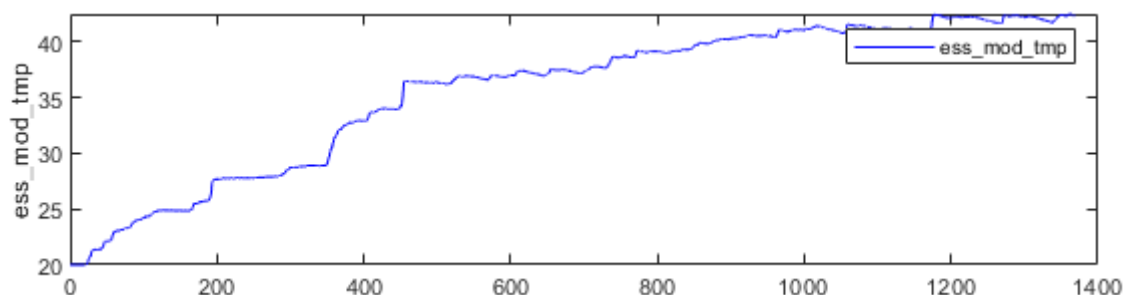


Figura 17: Variação da temperatura do módulo durante o ciclo UDDS

Já quanto ao valor de SOC, como foi definido 0,4 como valor mínimo de SOC e 0,8 como valor máximo de SOC para não desgastar a bateria, foi-se utilizado o valor médio de 0,6 como ponto x do gráfico para chegar na potência da bateria. [28]

Assumindo a curva de temperatura utilizada como a curva 41°C e o SOC médio como 0,6, o valor da potência do modelo nas condições iniciais encontrado através da figura 16 é de 40 kW, que é justamente o valor de potência do Hyundai Nexa, validando as hipóteses assumidas.

Definido onde será visto no gráfico o valor de potência para cada um dos DOH, foi necessário decidir o método para alterar os parâmetros para alcançar os valores desejados. Como é possível alterar dois valores (número de módulos e fator escalar da capacidade da bateria), é preciso saber como alterar cada um desses parâmetros.

Na primeira vez, foi alterado principalmente o número de módulos e o fator da capacidade foi utilizado como um ajuste fino já que o número de módulos, por ser um número inteiro, às vezes mexia demais na potência da bateria e não era possível chegar no valor certo.

Um dos motivos de modificar principalmente o número de módulos da bateria era para deixar o valor da massa do veículo sendo calculado livremente pelo ADVISOR e considerar

as alterações de massa do veículo conforme as potências da bateria e da célula combustível eram alteradas. Porém, ao aumentar o valor da potência da bateria, aumentando o número de módulos e por isso a massa, o valor da massa total do veículo diminuía, já que a perda de massa total causada pela diminuição da potência da célula combustível era mais significativa que o acréscimo de massa causado pelo aumento do número de módulos. Isso se deve a como o ADVISOR calcula a massa da célula a combustível, que é multiplicando por 3 o valor da potência.

Pesquisando dados de células a combustível mais atuais no mercado, o valor de 3 kW/kg para uma célula a combustível com aplicação na indústria automobilística foi encontrado no catálogo da Intelligent Energy [29]. Com esse valor, a variação entre o menor DOH de 0,05 e o maior DOH de 0,95 da tabela 12 resultariam numa variação de massa de apenas 40,5 kg, enquanto pelo cálculo do ADVISOR resultaria numa variação de massa de 364,5 kg, o que explica a perda de massa total para o ADVISOR quando a potência da célula a combustível é diminuída, mas que não é correta para os valores atuais.

Como tanto os valores de massa da célula a combustível quanto da bateria estão defasados, decidiu-se manter o valor da massa fixo nessa análise. Esse procedimento é inclusive bastante utilizado em análises encontradas em diversos artigos científicos quando o DOH para que a massa não interfira no resultado e os efeitos do grau de hibridização sejam analisados isoladamente [28] [30].

Na segunda vez, o número de módulos da bateria foi mantido fixo e apenas o fator da capacidade foi alterado. Como esse fator aceita qualquer valor, é mais fácil de alterá-lo para chegar no valor desejado de potência da bateria.

Nas tabelas 15 e 16 são mostrados respectivamente os valores de $MPGe_{UDDS}$, $MPGe_{HWFET}$, $MPGe_{COMB}$, tempo de aceleração 0-100 km/h, tempo de aceleração 80-120 km/h e velocidade máxima para os dois casos.

Tabela 15: Simulação alterando número de módulos da bateria

| DOH | MPGe_{UDDS} | MPGe_{HWFET} | MPGe_{COMB} | Tempo 0-100 | Tempo 80-120 | Velocidade máxima |
|------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|
| 0,05 | 19,5 | 41,7 | 25,6 | - | - | 97 |
| 0,1 | 20,1 | 41,5 | 26,2 | 32 | 36,3 | 132,4 |
| 0,15 | 39,1 | 47,5 | 42,5 | 21,4 | 16,8 | 149,2 |
| 0,2 | 49,4 | 52,6 | 50,8 | 16,3 | 11,1 | 150,9 |
| 0,25 | 57 | 57,9 | 57,4 | 16,1 | 12,8 | 150 |
| 0,3 | 61,3 | 60,9 | 61,1 | 14,5 | 10,6 | 150,9 |
| 0,35 | 59,7 | 64,4 | 61,7 | 13,4 | 9,3 | 152 |
| 0,4 | 55,9 | 69,1 | 61,2 | 12,5 | 8,7 | 152,7 |
| 0,45 | 55,5 | 73,3 | 62,3 | 11,8 | 8,1 | 153 |
| 0,5 | 55 | 77,7 | 63,3 | 11,3 | 7,7 | 153,2 |
| 0,55 | 51,9 | 65,9 | 57,4 | 10,9 | 7,4 | 153,3 |
| 0,6 | 52,7 | 67,5 | 58,5 | 10,5 | 7,2 | 153,2 |
| 0,65 | 52,8 | 68,2 | 58,8 | 10,2 | 6,9 | 153,2 |
| 0,7 | 51,9 | 69,8 | 58,7 | 10 | 6,8 | 153,2 |
| 0,75 | 52,3 | 70,7 | 59,2 | 9,9 | 6,8 | 153,3 |
| 0,8 | 55,9 | 71,5 | 62,0 | 9,9 | 6,8 | 153,4 |
| 0,85 | 64,7 | 74,8 | 68,9 | 9,8 | 6,8 | 153,5 |
| 0,9 | 75,9 | 87,4 | 80,7 | 9,8 | 6,8 | 153,5 |
| 0,95 | 102,6 | 150,4 | 119,7 | 9,7 | 6,8 | 153,6 |

Tabela 16: Simulação alterando o fator da capacidade da bateria

| DOH | MPGe _{UDDS} | MPGe _{HWFET} | MPGe _{COMB} | Tempo 0-100 | Tempo 80-120 | Velocidade máxima |
|------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------|--------------|-------------------|
| 0,05 | 28,2 | 43,2 | 33,4 | 18,6 | 14,3 | 149,8 |
| 0,1 | 33,8 | 45,5 | 38,2 | 17,4 | 13,1 | 150,1 |
| 0,15 | 41,6 | 47,5 | 44,1 | 16,4 | 12,3 | 150,3 |
| 0,2 | 51,4 | 52,1 | 51,7 | 15,6 | 11,6 | 150,5 |
| 0,25 | 57,5 | 58,5 | 57,9 | 15 | 11 | 150,7 |
| 0,3 | 61,3 | 60,9 | 61,1 | 14,5 | 10,6 | 150,9 |
| 0,35 | 59,7 | 64,6 | 61,8 | 14,1 | 10,2 | 151,1 |
| 0,4 | 60,2 | 68,6 | 63,7 | 13,8 | 10 | 151,3 |
| 0,45 | 55,8 | 74,3 | 62,8 | 13,5 | 9,5 | 152,2 |
| 0,5 | 55,4 | 77,8 | 63,6 | 13 | 9,3 | 152,1 |
| 0,55 | 56,3 | 66 | 60,3 | 12,5 | 9,2 | 152,1 |
| 0,6 | 51,8 | 67,6 | 57,9 | 12,3 | 9,2 | 152 |
| 0,65 | 53,2 | 68,3 | 59,1 | 12,3 | 9,2 | 151,8 |
| 0,7 | 51,8 | 69,9 | 58,6 | 13 | 11 | 151,3 |
| 0,75 | 53,7 | 70,9 | 60,3 | 12,7 | 10,5 | 151,1 |
| 0,8 | 56 | 71,6 | 62,1 | 12,4 | 10,1 | 150,9 |
| 0,85 | 61,3 | 68,2 | 64,2 | 12,2 | 9,7 | 150,4 |
| 0,9 | 76,1 | 87,5 | 80,8 | 12 | 9,5 | 150,7 |
| 0,95 | 103,1 | 152,7 | 120,7 | 11,8 | 9,2 | 151 |

Os valores de MPGe são parecidos em ambos os casos com algumas pequenas diferenças. Comparando os tempos de aceleração, o primeiro método apresenta uma melhora maior conforme o aumento do DOH, o que acaba aproximando mais do valor real do tempo de aceleração do Nexo. Além disso, os carros totalmente elétricos tendem a ter tempos de aceleração maiores que os híbridos célula a combustível. Por isso, será utilizado a simulação alterando o número de módulos da bateria apresentada na tabela 15.

6.3. Restrições dos graus de hibridização

Para continuar a análise, serão utilizadas algumas restrições para diminuir a quantidade de graus de hibridização válidos. Para isso, serão utilizados alguns critérios estabelecidos pela *Partnership for a New Generation of Vehicles* (PNGV).

O PNGV foi um programa criado pelo governo americano em 1993 que era composto principalmente por três grandes montadoras: Ford, GM e Chrysler. Esse programa tinha metas

agressivas com o objetivo de alcançar veículos com zero emissão principalmente através do desenvolvimento da célula a combustível e dos veículos plug-in.

O PNGV possui alguns critérios de performance para os veículos alternativos, alguns mostrados por GOLBUFF, S., [31]. O critério que será utilizado nesse trabalho para restringir o grau de hibridização é o critério chamado *gradeability*, que seria um teste de inclinação do veículo. Segundo o PNGV, para esse critério, o veículo tem que ser capaz de manter uma inclinação de 6,5% numa velocidade de 55 mph (88,5 km/h) por 20 minutos. Apesar do PNGV permitir a utilização das duas fontes de energia do veículo híbrido, será utilizado aqui o método proposto por AHLUWALIA, R. et al. [32] para veículos que operam com a célula a combustível como fonte primária de energia. Utilizando esse método, esse critério do PNGV tem que ser realizado somente pela célula a combustível.

Esse método garante que o veículo mantenha suas características de um veículo essencialmente movido pela célula a combustível, já que analisando apenas o consumo de combustível, um grau de hibridização alto poderia ser escolhido tornando o veículo bem mais elétrico. Dessa forma, esse critério se torna suficiente em limitar a quantidade de graus de hibridização possíveis na análise para que o consumo de combustível melhore, mas o veículo continue fiel ao que foi pensado pela Hyundai.

Na tabela 15 temos os valores de inclinação obtidos para cada um dos graus de hibridização calculados anteriormente. Com essa tabela vemos que os valores aceitáveis de DOH estão entre 0,15 e 0,6. Esses valores limites estão condizentes com os valores limites relatados em HUANG, M., et al. [11], já mencionado anteriormente na explicação do DOH, que diz que a faixa normal de DOH é entre 0,177 e 0,661.

Tabela 17: Variação da inclinação com o grau de hibridização

| DOH | Inclinação |
|------|------------|
| 0,05 | 0,9% |
| 0,1 | 4,9% |
| 0,15 | 8,9% |
| 0,2 | 13,0% |
| 0,25 | 16,0% |
| 0,3 | 15,1% |
| 0,35 | 13,8% |
| 0,4 | 12,4% |
| 0,45 | 11,0% |
| 0,5 | 9,6% |
| 0,55 | 8,5% |
| 0,6 | 7,1% |
| 0,65 | 5,7% |
| 0,7 | 4,3% |
| 0,75 | 3,1% |
| 0,8 | 1,6% |
| 0,85 | 0,3% |
| 0,9 | 0,0% |
| 0,95 | 0,0% |

6.4. Análise da simulação

Utilizando então os valores de MPGe da tabela 15 e apenas com os graus de hibridização que passaram pelo critério da inclinação do veículo mostrado na seção anterior, foi feita a figura 18 contendo os $MPGe_{UDDS}$, $MPGe_{HWFET}$ e $MPGe_{COMB}$ para cada DOH válido.

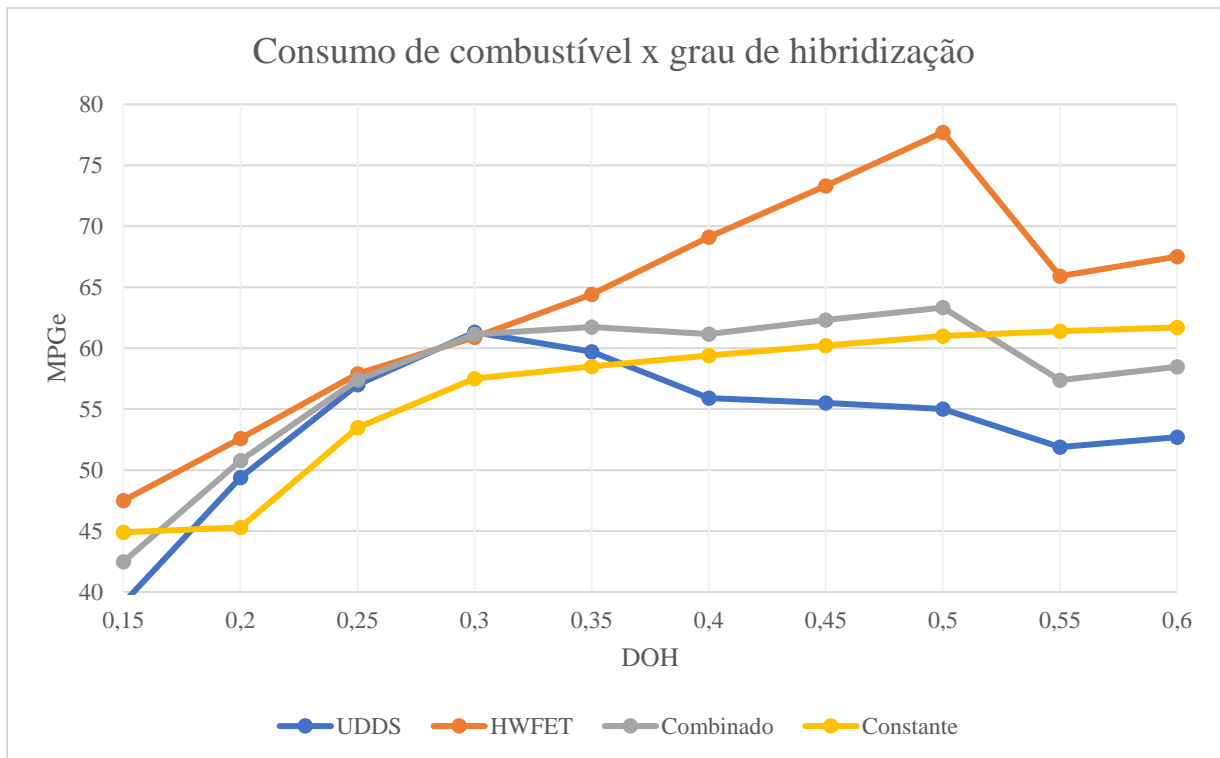


Figura 18: Consumo de combustível x grau de hibridização para os ciclos UDDS, HWFET, combinado e constante

Foi adicionado além dos MPG_e dos ciclos UDDS, HWFET e o MPG_e_{COMB}, um ciclo de velocidade constante para ajudar na análise. Nesse ciclo, o veículo percorre uma distância de 10,5 km numa velocidade de cerca de 105 km/h constante. Não existe aceleração nem paradas, logo não é afetado pelos efeitos do freio regenerativo.

Primeiramente, até o valor padrão do Nexo de DOH que é de 0,3, o MPG_e dos ciclos UDDS, HWFET e por consequência o ciclo combinado cresce. É possível afirmar então que do ponto de vista do consumo de combustível, não há vantagem em aumentar a potência da célula a combustível em relação à potência da bateria.

No ciclo HWFET há um crescimento inicial até um valor de DOH de 0,5. Como é um ciclo menos agressivo que o UDDS, não é necessário tanta potência da célula combustível e o crescimento da potência da bateria proporciona maior capacidade de energia recuperada através do freio regenerativo. O crescimento se deve também ao modo como a eficiência total do sistema cresce até o DOH de 0,5. Isso explica também a queda entre 0,5 e 0,55 de DOH já que a eficiência total cai nesse intervalo, como mostrado na figura 20.

Já o ciclo UDDS apresenta uma queda até o DOH de 0,4, se mantém estável até 0,5 e depois cai novamente até o DOH final de 0,6. Esse comportamento do ciclo UDDS está bastante relacionado com os efeitos da bateria num ciclo curto, como será mais detalhado adiante. Como no caso do ciclo HWFET, a eficiência total tem uma grande influência na variação do consumo de combustível, mas é possível ver que existem outros fatores pela figura 19.

Para efeito de comparação, o ciclo de velocidade constante mostra que, desconsiderando o efeito do freio regenerativo que melhora de acordo com o aumento da potência da bateria, já que não existe mudança de aceleração nesse ciclo para acumular energia, o MPGe é mais constante ao longo da sua curva, tirando a parte do crescimento inicial até o DOH de 0,3. Na maior parte do gráfico há um leve crescimento gradual do MPGe causado também, como nos outros ciclos, pela variação da eficiência total, que funciona basicamente como o único elemento que modifica o MPGe do ciclo constante, como podemos ver na figura 21.

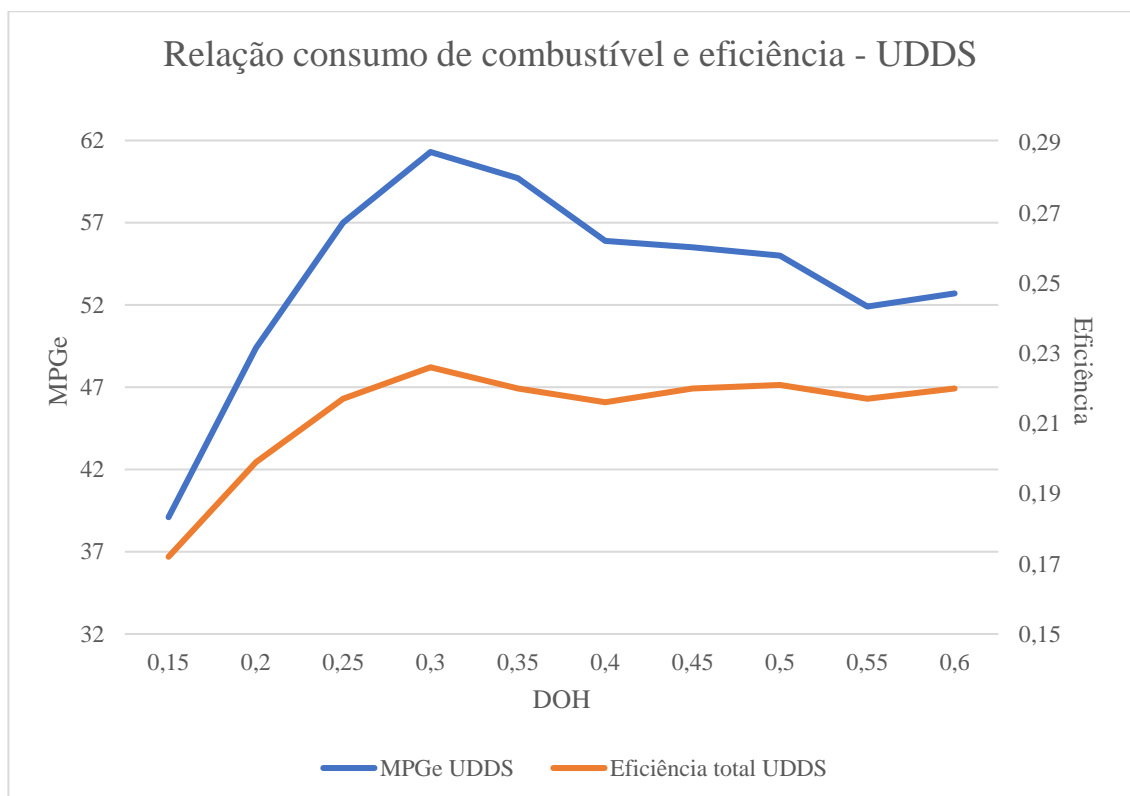


Figura 19: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização do ciclo UDDS

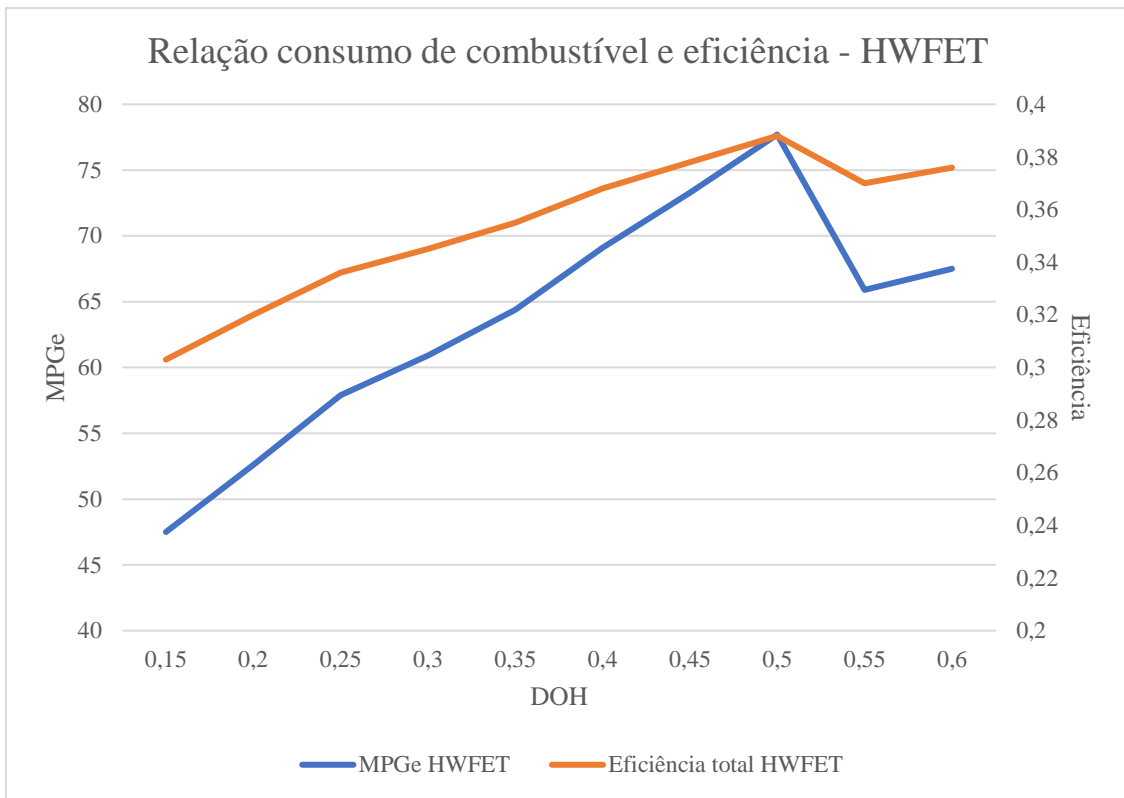


Figura 20: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização do ciclo HWFET

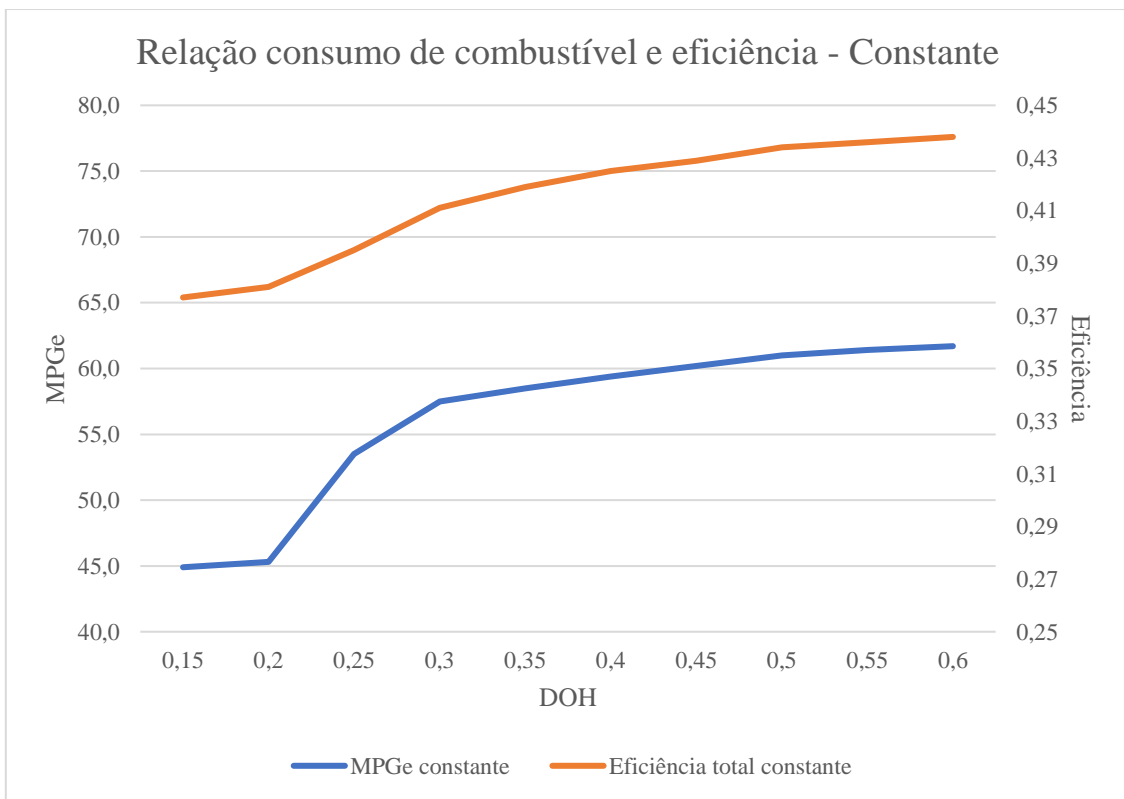


Figura 21: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização do ciclo constante

Ao simular os ciclos UDDS e HWFET várias vezes em sequência, percebe-se que o impacto da eficiência total no MPGe fica ainda maior, como visto nas figuras 21 e 22 onde os ciclos foram simulados dez vezes em sequência. Essa maior semelhança entre a curva do MPGe e da eficiência total nas figuras de 10 ciclos pode ser explicado por um menor impacto do efeito da bateria num intervalo de tempo maior. Essas figuras ajudam também a enxergar que as pequenas variações nas figuras 18 e 19 se devem provavelmente aos efeitos da bateria e a capacidade de recuperar energia através do freio regenerativo.

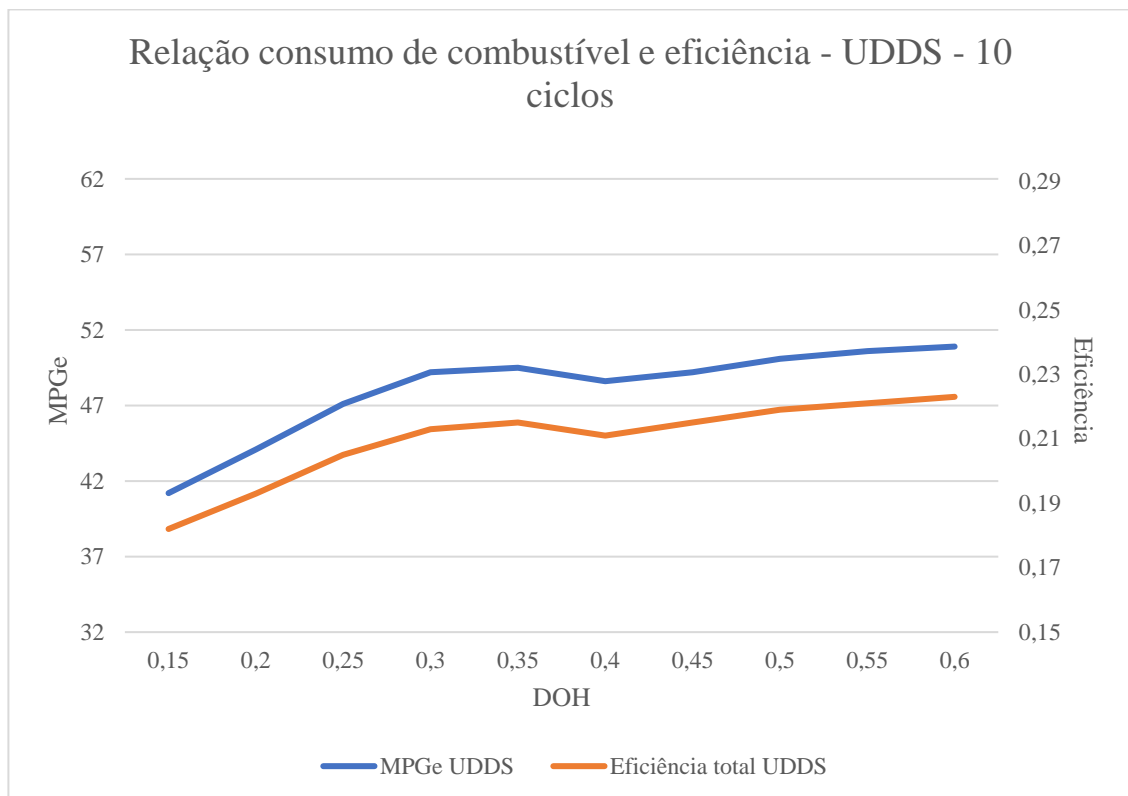


Figura 22: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização para 10 ciclos UDDS

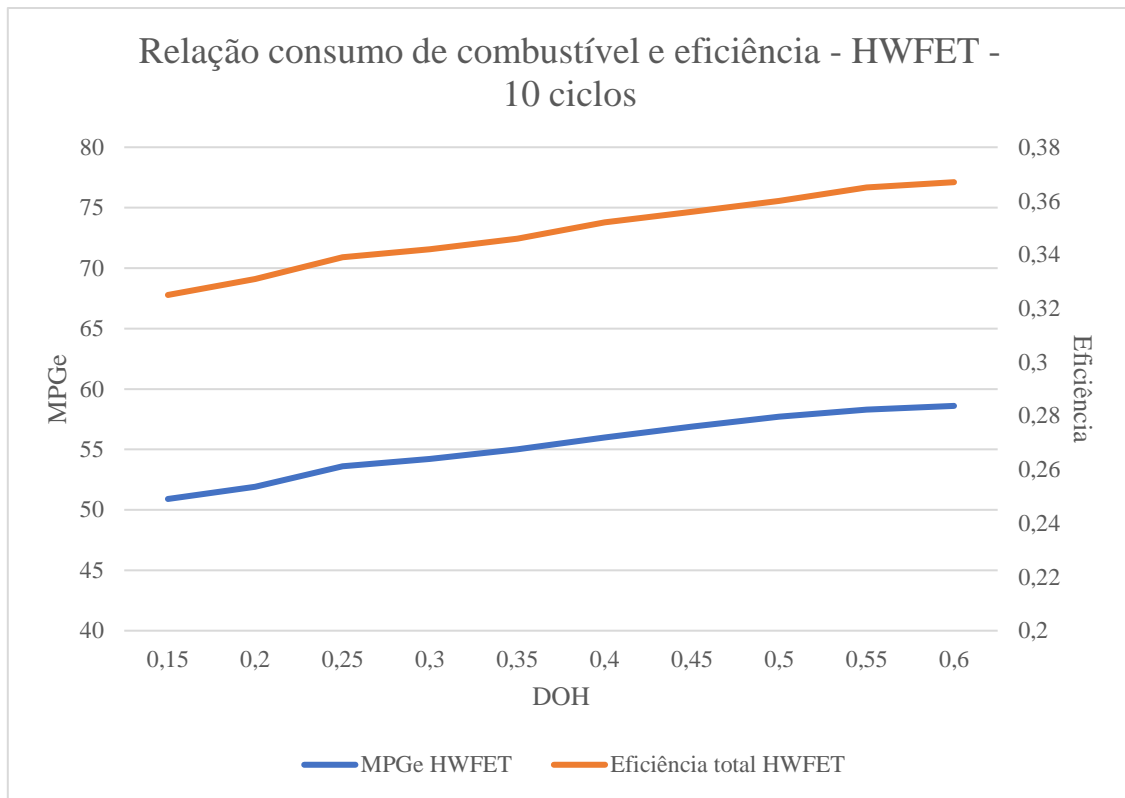


Figura 23: Consumo de combustível e eficiência x grau de hibridização para 10 ciclos HWFET

Por fim, temos na figura 24 as curvas de $MPGe_{UDDS}$, $MPGe_{HWFET}$ e $MPGe_{COMB}$ para dez ciclos em sequência.

Essa figura é mais significativa para avaliar a escolha do melhor grau de hibridização pois o período de dez ciclos se assemelha mais aos trajetos percorridos diariamente. Nessa figura é possível concluir que o aumento do grau de hibridização para o Nexo melhor o consumo de combustível em MPGe em cerca de 5% saindo do valor de fábrica para o valor máximo permitido pelo critério do PNGV adaptado para veículos híbridos, mantendo sua característica da célula a combustível ser a fonte primária de energia para o sistema.

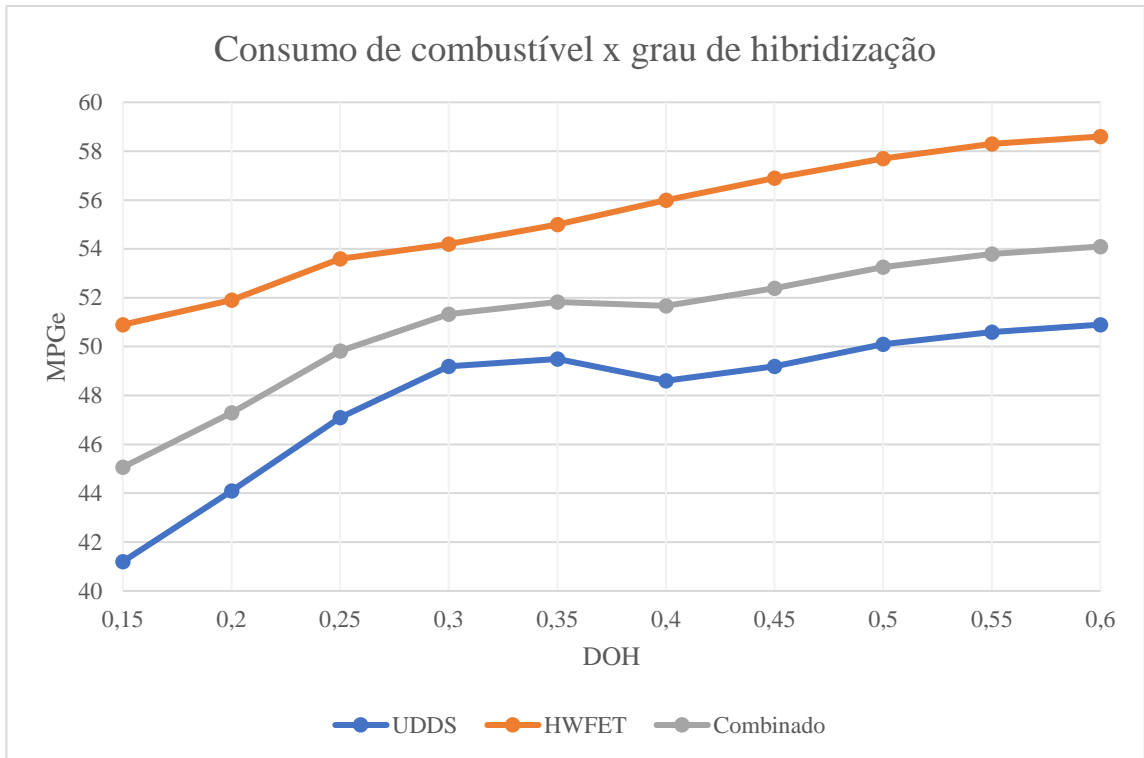


Figura 24: Consumo de combustível x grau de hibridização para 10 ciclos

7. ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Nesta análise foi utilizado o estudo paramétrico do ADVISOR na parte de simulação. Nessa simulação, até três variáveis podem ser escolhidas simultaneamente e o ADVISOR fará as simulações cobrindo toda a matriz de valores. O usuário escolhe o valor mínimo, máximo e número de pontos do elemento que será variado. Os parâmetros escolhidos foram o coeficiente de arrasto e a massa para obter os valores de $MPGe_{UDDS}$ e $MPGe_{HWFET}$.

O objetivo da análise é ver o quanto cada uma dessas variáveis impacta no $MPGe$, além de comparar a variação por ciclo. O valor mínimo e máximo de cada um desses dois parâmetros possuem o mesmo percentual de diferença para o valor inicial (1883 kg para massa e 0,329 para o coeficiente de arrasto) de forma que se possa comparar a variação do $MPGe$ entre elas e 20 pontos foram criados para cada parâmetro.

7.1. Análise do coeficiente de arrasto

Na figura 25 é apresentada a variação do $MPGe_{UDDS}$ e do $MPGe_{HWFET}$ de acordo com o coeficiente de arrasto. Na tabela 18 temos esses valores detalhados para todos os pontos de coeficiente de arrasto calculados. Nas duas últimas colunas são calculadas as variações entre cada valor de $MPGe$ e o valor original.

Esse mesmo estudo poderia ser feito para a área frontal já que possuem o mesmo peso na fórmula da força de arrasto. Como era esperado, os valores de $MPGe$ diminuem com o aumento do coeficiente de arrasto devido ao aumento da força de arrasto. Porém, é interessante notar que a variação é praticamente duas vezes maior para o ciclo HWFET comparado com o ciclo UDDS. Isso pode ser explicado pela diferença nos dois ciclos. O ciclo UDDS possui uma velocidade média de 31,51 km/h, enquanto o ciclo HWFET tem velocidade média de 77,58 km/h. Como o coeficiente de arrasto é proporcional ao quadrado da velocidade, a sensibilidade ao coeficiente de arrasto é maior no ciclo HWFET.

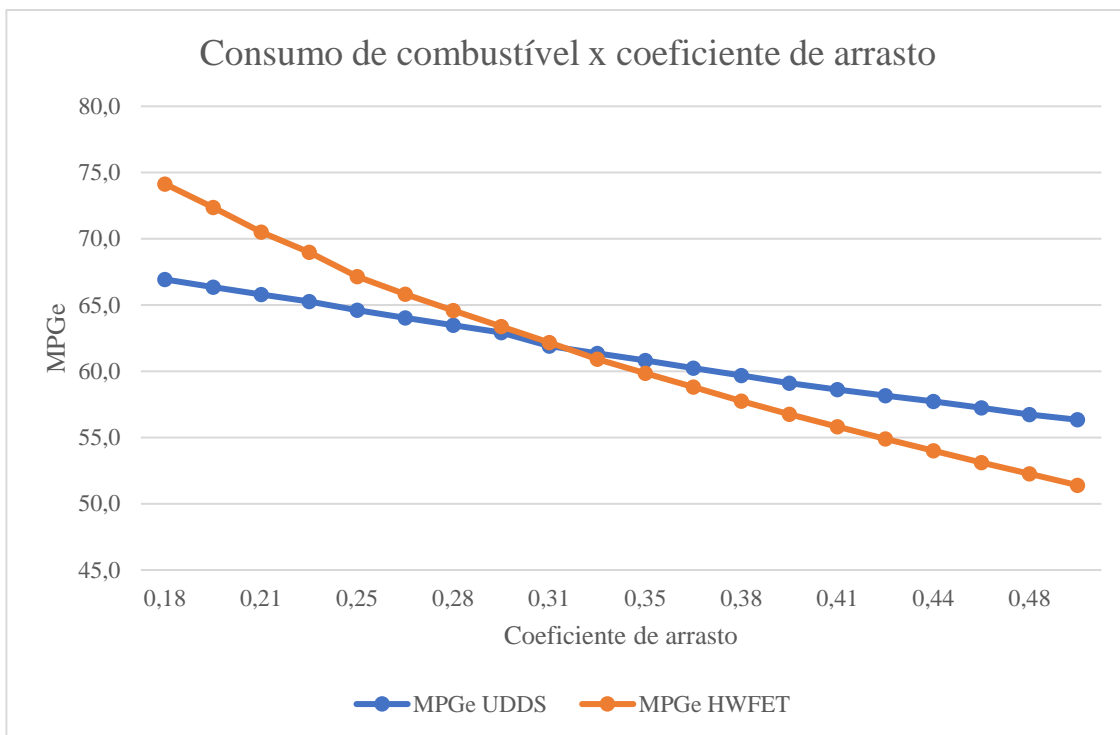


Figura 25: Consumo de combustível x coeficiente de arrasto

Tabela 18: Variação do consumo de combustível com o coeficiente de arrasto

| CD | MPGe UDDS | MPGe HWFET | Variação UDDS | Variação HWFET |
|--------|-----------|------------|---------------|----------------|
| 0,1810 | 66,9 | 74,1 | 9,1% | 21,7% |
| 0,1974 | 66,3 | 72,4 | 8,2% | 18,8% |
| 0,2139 | 65,8 | 70,5 | 7,2% | 15,7% |
| 0,2303 | 65,3 | 69,0 | 6,4% | 13,2% |
| 0,2468 | 64,6 | 67,1 | 5,3% | 10,2% |
| 0,2632 | 64,0 | 65,8 | 4,4% | 8,1% |
| 0,2797 | 63,5 | 64,6 | 3,5% | 6,0% |
| 0,2961 | 62,9 | 63,4 | 2,6% | 4,1% |
| 0,3126 | 61,9 | 62,2 | 0,9% | 2,1% |
| 0,329 | 61,3 | 60,9 | 0,0% | 0,0% |
| 0,3455 | 60,8 | 59,9 | -0,8% | -1,7% |
| 0,3619 | 60,2 | 58,8 | -1,8% | -3,4% |
| 0,3784 | 59,7 | 57,7 | -2,7% | -5,2% |
| 0,3948 | 59,1 | 56,8 | -3,6% | -6,8% |
| 0,4113 | 58,6 | 55,8 | -4,5% | -8,4% |
| 0,4277 | 58,2 | 54,9 | -5,2% | -9,9% |
| 0,4442 | 57,7 | 54,0 | -5,9% | -11,4% |
| 0,4606 | 57,2 | 53,1 | -6,7% | -12,8% |
| 0,4771 | 56,7 | 52,3 | -7,5% | -14,2% |
| 0,4935 | 56,3 | 51,4 | -8,2% | -15,6% |

7.2. Análise da massa

Na figura 26 é apresentada a variação do $MPGe_{UDDS}$ e do $MPGe_{HWFET}$ de acordo com a massa. Na tabela 19 temos esses valores detalhados para todos os pontos de massa calculados. Nas duas últimas colunas são calculadas as variações entre cada valor de $MPGe$ e o valor original.

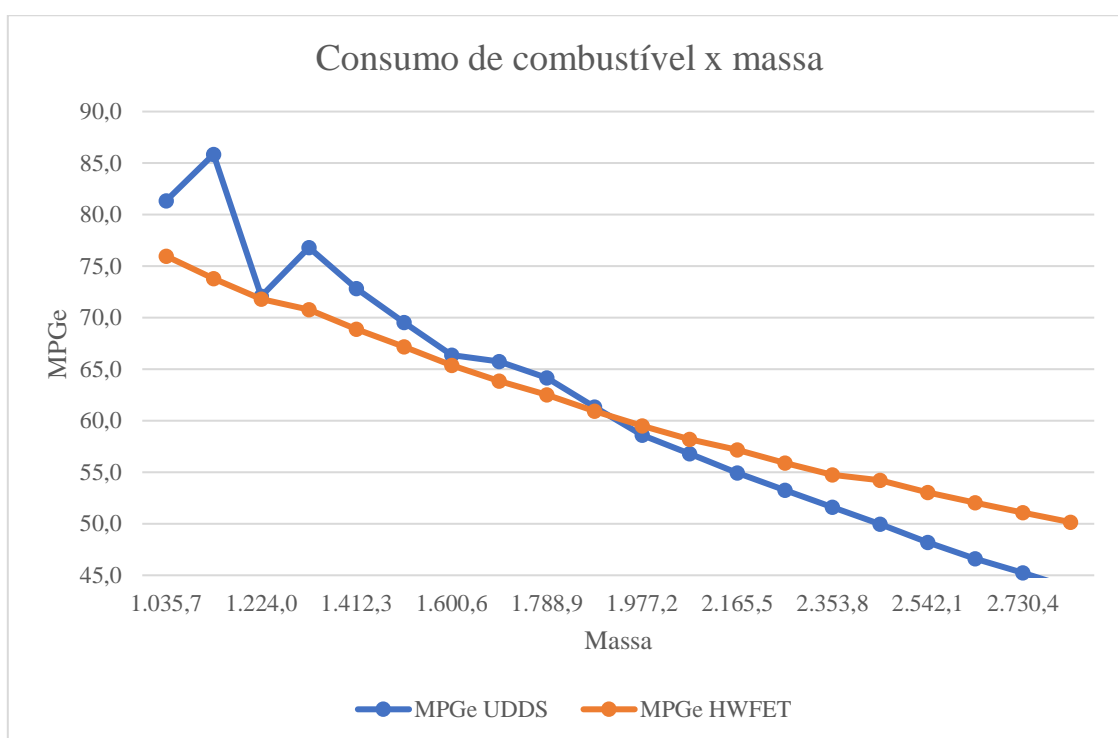


Figura 26: Consumo de combustível x massa

Tabela 19: Variação do consumo de combustível com a massa

| Massa (kg) | MPGe UDDS | MPGe HWFET | Variação UDDS | Variação HWFET |
|-------------------|------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 1035,7 | 81,3 | 76,0 | 32,6% | 24,7% |
| 1129,8 | 85,8 | 73,8 | 39,9% | 21,1% |
| 1224,0 | 72,1 | 71,8 | 17,5% | 17,9% |
| 1318,1 | 76,8 | 70,8 | 25,2% | 16,2% |
| 1412,3 | 72,8 | 68,9 | 18,7% | 13,1% |
| 1506,4 | 69,5 | 67,2 | 13,4% | 10,3% |
| 1600,6 | 66,4 | 65,4 | 8,2% | 7,3% |
| 1694,7 | 65,8 | 63,8 | 7,2% | 4,8% |
| 1788,9 | 64,2 | 62,5 | 4,6% | 2,6% |
| 1883 | 61,3 | 60,9 | 0,0% | 0,0% |
| 1977,2 | 58,6 | 59,5 | -4,5% | -2,3% |
| 2071,3 | 56,8 | 58,2 | -7,4% | -4,5% |
| 2165,5 | 54,9 | 57,2 | -10,4% | -6,1% |
| 2259,6 | 53,3 | 55,9 | -13,2% | -8,2% |
| 2353,8 | 51,6 | 54,8 | -15,9% | -10,1% |
| 2447,9 | 50,0 | 54,2 | -18,5% | -11,0% |
| 2542,1 | 48,2 | 53,0 | -21,5% | -12,9% |
| 2636,2 | 46,6 | 52,0 | -24,0% | -14,6% |
| 2730,4 | 45,2 | 51,1 | -26,3% | -16,1% |
| 2824,5 | 43,8 | 50,2 | -28,6% | -17,7% |

O comportamento da massa é um pouco diferente do que era imaginado. No ciclo HWFET, é possível ver que o aumento da massa resulta numa diminuição do MPGe, como era esperado.

Entretanto, no ciclo UDDS o veículo apresenta um comportamento um pouco diferente do esperado nos valores iniciais de massa. Primeiramente o MPGe aumenta para depois ter uma queda considerável e depois aumentar novamente para só depois permanecer em queda até o final.

Uma possível explicação para esse aumento do MPGe nos primeiros valores da tabela pode vir do comportamento do estado de carga da bateria durante o ciclo e das características do próprio ciclo UDDS. Nas figuras 27 e 28 temos a variação do estado de carga para o ponto onde a massa é igual a 1035,65 kg (MPGe_{UDDS} de 81,3) e para o ponto onde a massa é igual a 1129,9 kg (MPGe_{UDDS} de 85,8), respectivamente. Na figura 29 temos novamente o trajeto do ciclo UDDS.

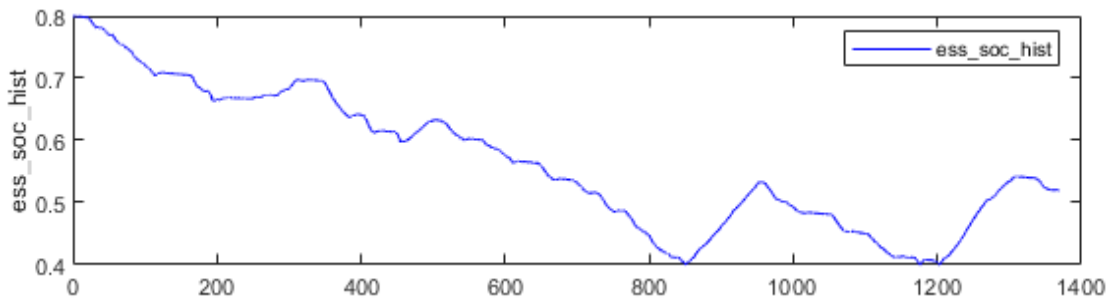


Figura 27: Variação do estado de carga para o ciclo UDDS com massa valendo 1035,7 kg

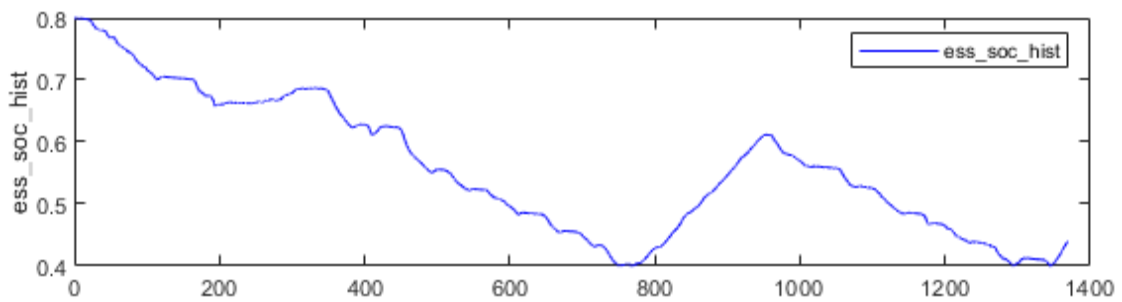


Figura 28: Variação do estado de carga para o ciclo UDDS com massa valendo 1129,8 kg

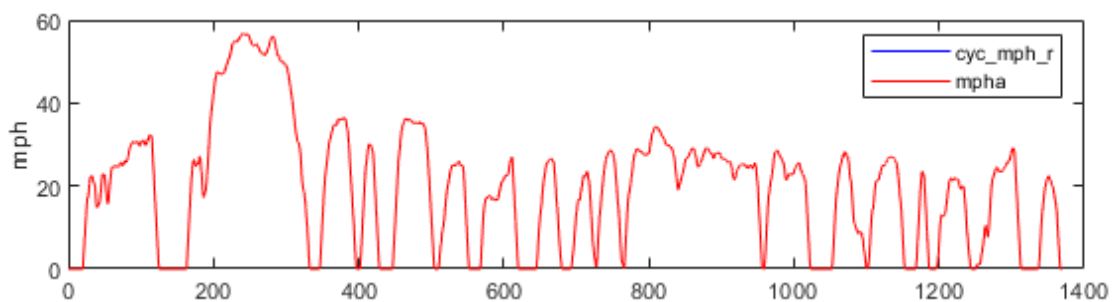


Figura 29: Trajeto percorrido no ciclo UDDS

Na figura 28, o estado de carga atinge seu valor mínimo aproximadamente na parte do ciclo UDDS onde existe uma maior concentração de frenagens como mostra a figura 29, causando uma maior recarga da bateria pelo freio regenerativo. Na figura 27, o estado de carga alcança seu valor mínimo um pouco depois desse momento, e é possível ver que a recarga da figura 28 é maior que da figura 27. Portanto, esse crescimento do MPGe com o aumento de massa se deve a um fator específico do ciclo UDDS, mas não deve ser levado em consideração para ciclos reais.

O único caso onde aumentar a massa poderia resultar numa redução do consumo combustível seria se esse acréscimo de massa fosse por causa de um aumento de efetividade do freio regenerativo (o que não é o caso nessa análise), já que esse aumento seria o equivalente a uma redução na massa do sistema [33]. No caso onde essa redução de massa equivalente fosse maior que o aumento da massa pela melhora da efetividade (aumentando o tamanho da bateria, por exemplo), o aumento de massa seria benéfico para a redução do consumo de combustível.

8. ANÁLISE ECONÔMICA

Nesse capítulo será conduzido uma análise econômica para avaliar se do ponto de vista do consumidor o Hyundai Nexo apresenta vantagens econômicas comparado a um veículo convencional. Existem dois caminhos de energia que podem ser analisados separadamente: a energia que sai do poço de produção até o tanque (WTT – “Well-to-tank”) e a energia que sai do tanque até as rodas (TTW – “Tank-to-wheel”).

No WTT, as eficiências da produção e distribuição da energia são levadas em consideração, além das emissões de gases poluentes durante esses processos. No TTW, as eficiências dos sistemas de fornecimento de energia dentro do veículo e as emissões decorrentes dos processos internos são considerados. Somando WTT e TTW temos o gasto energético e a emissão de poluentes total do sistema (WTW – “Well-to-wheels”). [34]

Para o caso de uma análise de emissões completa, é extremamente relevante considerar a emissão durante o processo de produção e distribuição da energia utilizada no veículo alternativo pois ainda que as emissões no TTW sejam menores que nos veículos convencionais, as emissões no WTT podem ser significativas e no fim, o veículo não representar uma melhoria consistente para o meio-ambiente.

Nessa análise, será apenas avaliado o custo anual de se manter um veículo movido à célula a combustível comparado com o custo de se manter um veículo convencional. Ou seja, somente o custo do TTW será avaliado nessa análise pois representa a parte que o consumidor paga.

8.1. Escolha dos veículos para a comparação

O veículo movido à célula a combustível escolhido será o Hyundai Nexo que já foi apresentado nesse trabalho. Para uma comparação justa com o veículo convencional, foi escolhido um modelo também SUV e também da Hyundai com valor de potência similar: o Hyundai Santa Fe. O último modelo desse veículo apresenta um valor de potência de 136 kW segundo a própria Hyundai, [35] que é um valor praticamente idêntico à potência de 135 kW do Nexo.

8.2. Definição dos parâmetros de simulação

Para calcular o gasto anual é necessário definir alguns valores, entre eles a distância anual média percorrida, o preço dos combustíveis e o consumo de combustível de cada veículo.

Primeiramente, é importante mencionar que esse estudo será feito para o consumidor americano, já que o Nexo ainda não é comercializado no Brasil e nosso país ainda não possui infraestrutura para a comercialização de veículos movidos à célula a combustível, como estações de hidrogênio para abastecimento. Além disso, se a análise fosse feita no Brasil, os valores dos impostos de importação teriam que ser levados em conta e isso está fora do escopo dessa análise pois seria um custo elevado não relativo à eficiência dos sistemas envolvidos e nem do custo dos combustíveis. Mais especificamente, os preços de combustível serão retirados das tabelas de preço da Califórnia, pois é o único lugar onde a Hyundai vende o Nexo nos Estados Unidos até então.

Na tabela 20 temos a distância anual em milhas e em quilômetros percorrida por faixa etária e dividida em homens e mulheres segundo o Departamento de Transporte dos Estados Unidos.

Tabela 20: Distância anual média percorrida em milhas [36]

| Idade | Homem (mi) | Homem (km) | Mulher (mi) | Mulher (km) | Total (mi) | Total (km) |
|-------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
| 16-19 | 8.026 | 12.917 | 6.873 | 11.061 | 7.624 | 12.270 |
| 20-34 | 17.976 | 28.930 | 12.004 | 19.319 | 15.098 | 24.298 |
| 35-54 | 18.858 | 30.349 | 11.464 | 18.450 | 15.291 | 24.608 |
| 55-64 | 15.859 | 25.523 | 7.780 | 12.521 | 11.972 | 19.267 |
| 65+ | 10.304 | 16.583 | 4.785 | 7.701 | 7.646 | 12.305 |
| Média | 16.550 | 26.635 | 10.142 | 16.322 | 13.476 | 21.688 |

O valor utilizado então para a distância percorrida anual média será uma aproximação para quilômetros da média total dessa tabela de 13.476 mi (21.500 km).

De acordo com a *California Fuel Cell Partnership*, o preço do hidrogênio varia entre US\$12,85 e pouco mais de US\$16 por quilograma, mas o preço mais comum é de US\$14k. [37] A NREL estima que o preço deve cair para a faixa de US\$10 a US\$8 entre 2020 e 2025,

o que seria necessário para fazer com o que os veículos movidos à célula a combustível fiquem competitivos no mercado.

O valor do preço da gasolina foi retirado da Administração das Informações de Energia dos Estados Unidos (EIA – *Energy Information Administration*). [38] No momento que a pesquisa era feita, o preço médio na Califórnia era de US\$3,296 por galão já incluindo impostos.

Finalmente, é preciso avaliar os valores de consumo de combustível para ambos os veículos. No caso do Nexo, antes de utilizarmos direto o consumo calculado na simulação, pode-se fazer uma nova validação utilizando as informações de autonomia e tamanho do tanque. Segundo o anúncio da Hyundai para a Califórnia, a autonomia média do Nexo é de cerca de 610 km. [39] Com três tanques de combustível que possibilitam o armazenamento de 6,3 kg de hidrogênio, temos um consumo de 0,010328 kg/km. Convertendo o valor de $MPGe_{COMB}$ encontrado para a simulação do Nexo, obtemos um consumo de 0,1017 kg/km, um valor extremamente próximo. Será utilizado então o valor obtido na simulação.

No caso do Santa Fe, o valor do consumo em $MPGe_{COMB}$ foi retirado dos dados do EPA. [2] O valor que consta é de 4,5 gal/100mi, ou 0,027962 gal/km (10,58 L/100km ou 0,1058 L/km).

Para complementar a análise, foram pesquisados os valores iniciais dos dois veículos no mercado americano. O valor do Hyundai Nexo utilizado será de US\$58.300 e do Santa Fe será de US\$25.750. Na tabela 21 temos um compilado de todas essas informações relevantes para a análise.

Tabela 21: Dados da análise econômica

| Parâmetro | Nexo | | Santa Fe | |
|-------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| | EUA | Brasil | EUA | Brasil |
| Preço base | US\$58.300 | R\$ 220.957,00 | US\$25.750 | R\$ 97.592,50 |
| Preço combustível | 14,00 US\$/kg | 53,06 R\$/kg | 3,296 US\$/gal | 3,300 R\$/L |
| Consumo | 0,01637 kg/mi | 0,01017 kg/km | 0,04500 gal/mi | 0,10584 L/km |
| Distância anual | 13.360 mi | 21.500 km | 13.360 mi | 21.500 km |

1 dólar americano (US\$) equivalente a 3,79 reais (R\$).

8.3. Comparação dos veículos

Com as informações de preço do combustível, consumo e distância anual é possível calcular o custo anual de cada um dos veículos. Multiplicando esses três parâmetros, encontramos o custo anual para o Nexo de US\$3.061,17 e para o Santa Fe de US\$1.981,50. Podemos ver que o valor para se manter um veículo movido à célula a combustível é praticamente 50% maior que manter um veículo convencional com os preços atuais. Além disso, o preço do Nexo já é mais que o dobro do preço do Santa Fe. No caso dos veículos elétricos, o preço do veículo é mais elevado, mas eles apresentam um custo anual mais baixo e com isso os gastos a longo prazo se igualam ao de um convencional.

Para que os veículos movidos à célula a combustível sejam competitivos no mercado, o preço dos componentes da célula a combustível ou o preço do combustível precisam diminuir. Na figura 30, temos a divisão dos custos da célula a combustível e na figura 31 temos a divisão dos custos do empilhamento, segundo YANG, Y. [40]

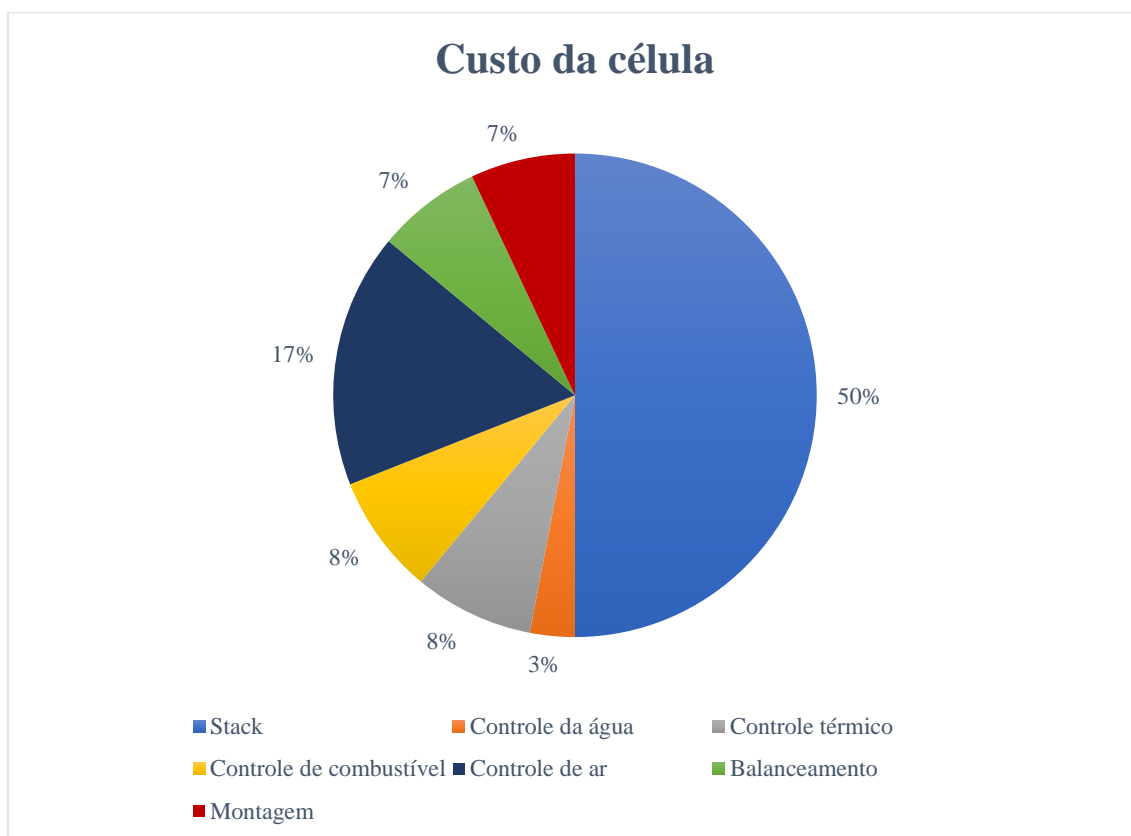


Figura 30: Divisão dos custos da célula a combustível

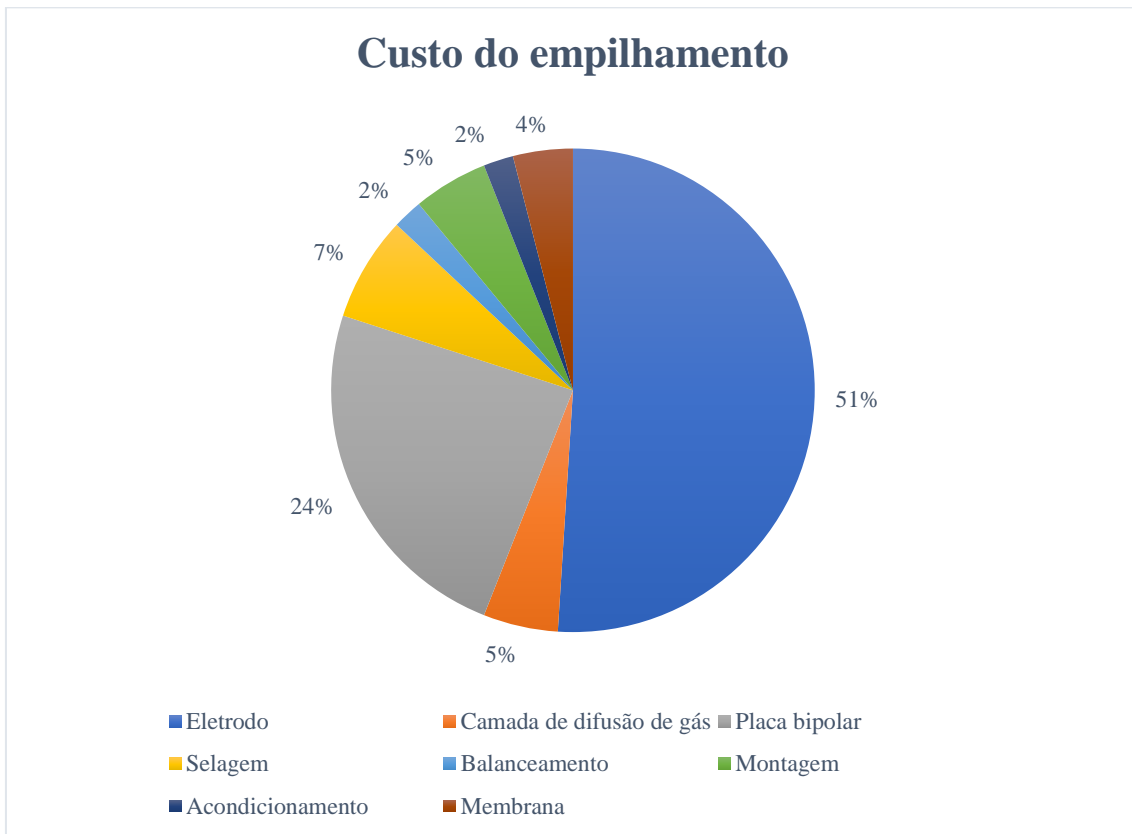


Figura 31: Divisão dos custos do empilhamento

Com esses dois gráficos, podemos ver que o empilhamento representa metade do custo da célula a combustível e os eletrodos (catalisadores inclusos) representam metade do custo do empilhamento. Com isso, 25% do custo total da célula a combustível se deve ao custo do material dos eletrodos e catalisadores. Ou seja, um dos desafios mais importantes para a redução do preço da célula a combustível é a redução dos preços dos materiais do anodo, catodo e catalisador.

Um outro fator para ficar atento é o custo de manutenção e reparo da célula a combustível. A falha de um componente no empilhamento pode levar à falha de todo o empilhamento. Ainda que não comprometa todo o empilhamento, a falha de um componente geralmente requer a desmontagem de todo o empilhamento para o reparo. Com isso, toda pequena falha resulta no custo de montagem, balanceamento, condicionamento e selagem do empilhamento e da célula. A montagem, condicionamento, balanceamento e selagem do empilhamento são responsáveis por 16% do custo do empilhamento, enquanto a montagem e o balanceamento da célula a combustível são responsáveis por 14% do custo da célula a combustível. Como o empilhamento representa 50% do custo da célula, dividimos 16% pela

metade e temos que cada vez que ocorre uma pequena falha resulta num custo de 22% da célula. [41]

Para o preço do combustível, a NREL prevê um valor entre US\$10 e US\$8 por quilograma de hidrogênio entre 2020 e 2025 como já mencionado [37]. Essa queda de valor será considerada para uma previsão do custo anual do Nexo até 2030. O modelo adotado por ano entre 2020 e 2025 foi feito fazendo com que o preço de 2020 seja o máximo de US\$10 e o preço de 2025 seja o mínimo de US\$8. Entre 2020 e 2025, o preço cairá linearmente para que saia de US\$10 até US\$8 em 6 anos, ou seja, o preço cai 40 centavos de dólar por ano. O preço em 2019 será considerado ainda o atual de US\$14 encontrado para a Califórnia e os preços após 2025 serão mantidos constantes. A variação do preço da gasolina não será levada em consideração.

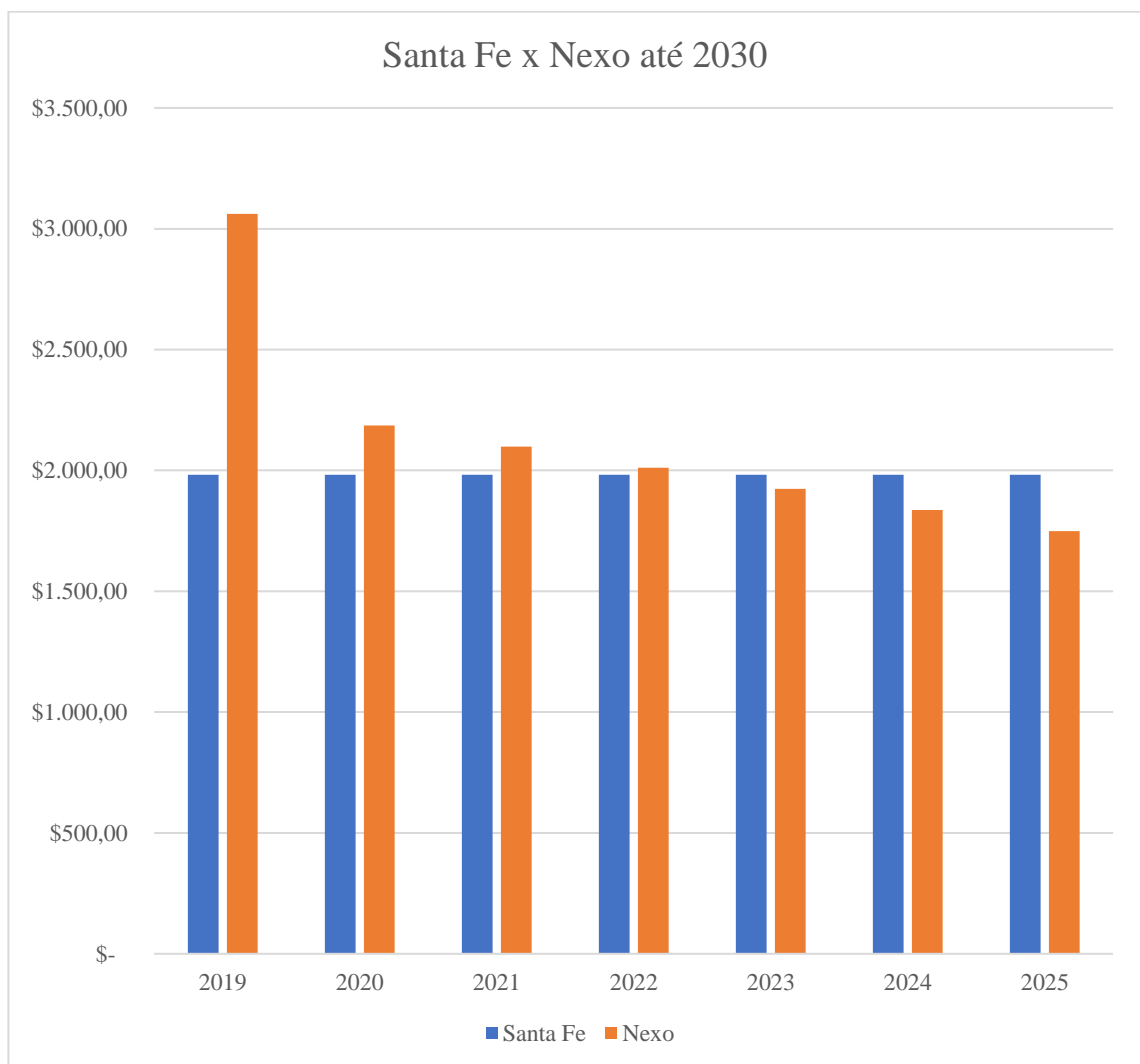


Figura 32: Custos anuais de combustível (US\$) do Santa Fe e do Nexo

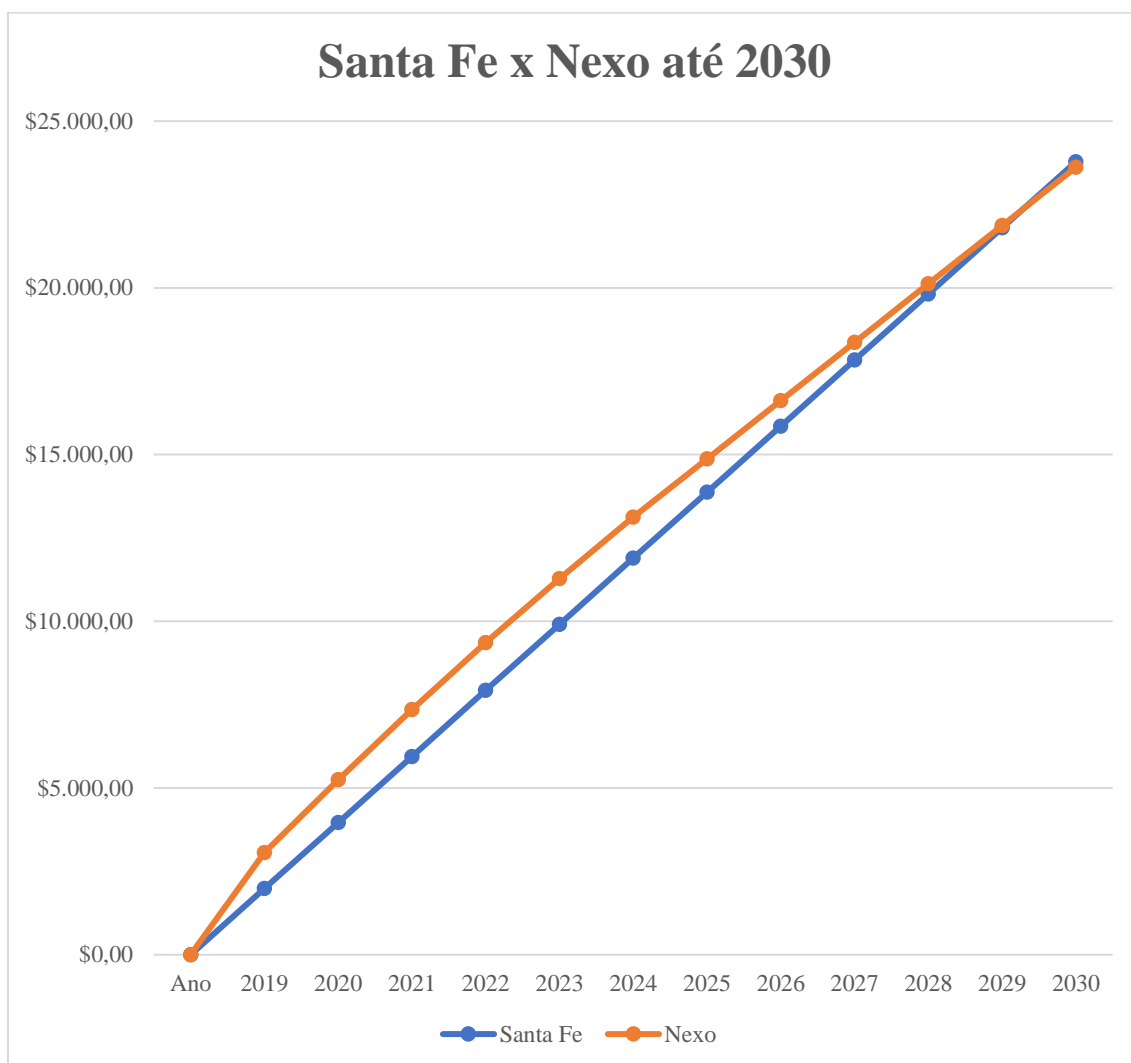


Figura 33: Custos anuais acumulados de combustível (US\$) do Santa Fe e do Nexo

Na figura 32 temos os custos anuais de combustível do Santa Fe e do Nexo até 2025, quando o valor do custo anual do Nexo se torna constante. Na figura 33 temos os custos anuais acumulados de combustível do Santa Fe e do Nexo até 2030 para melhor visualizar o momento onde os custos acumulados se igualam. Somente em 2030 o preço total pago em combustível será menor para o Nexo comparado ao Santa Fe com essas hipóteses adotadas. É possível reparar que o preço anual do Nexo fica abaixo já em 2023 pela figura 32, mas demora até 2030 para compensar a diferença de custo dos primeiros anos, especialmente de 2019 onde o hidrogênio custou US\$14. Esse é ainda um caso otimista, visto que como o preço do hidrogênio se encontra em US\$14 atualmente, é difícil acreditar que já em 2020 o preço cairá para US\$10.

Sabendo dessas dificuldades, a Hyundai oferece alguns benefícios para a compra do Nexo. O mais importante dentre eles é o crédito para 3 anos ou US\$13.000 de combustível grátis, o que acontecer primeiro. [39] Com esse benefício atuando especialmente nesses primeiros anos onde o custo do hidrogênio é mais caro, o custo do Nexo a longo prazo fica bem mais competitivo com o Santa Fe. A figuras 34 mostra a mesma análise da figura 33 só que agora com custo zero nos três primeiros anos (o custo dos três primeiros anos é inferior a US\$13.000, então esse é o primeiro critério satisfeito). Agora não mais existe encontro entre as duas curvas e é possível ver mais claramente pela figura 34 que a medida que os anos passam, a diferença de custo aumenta um pouco.

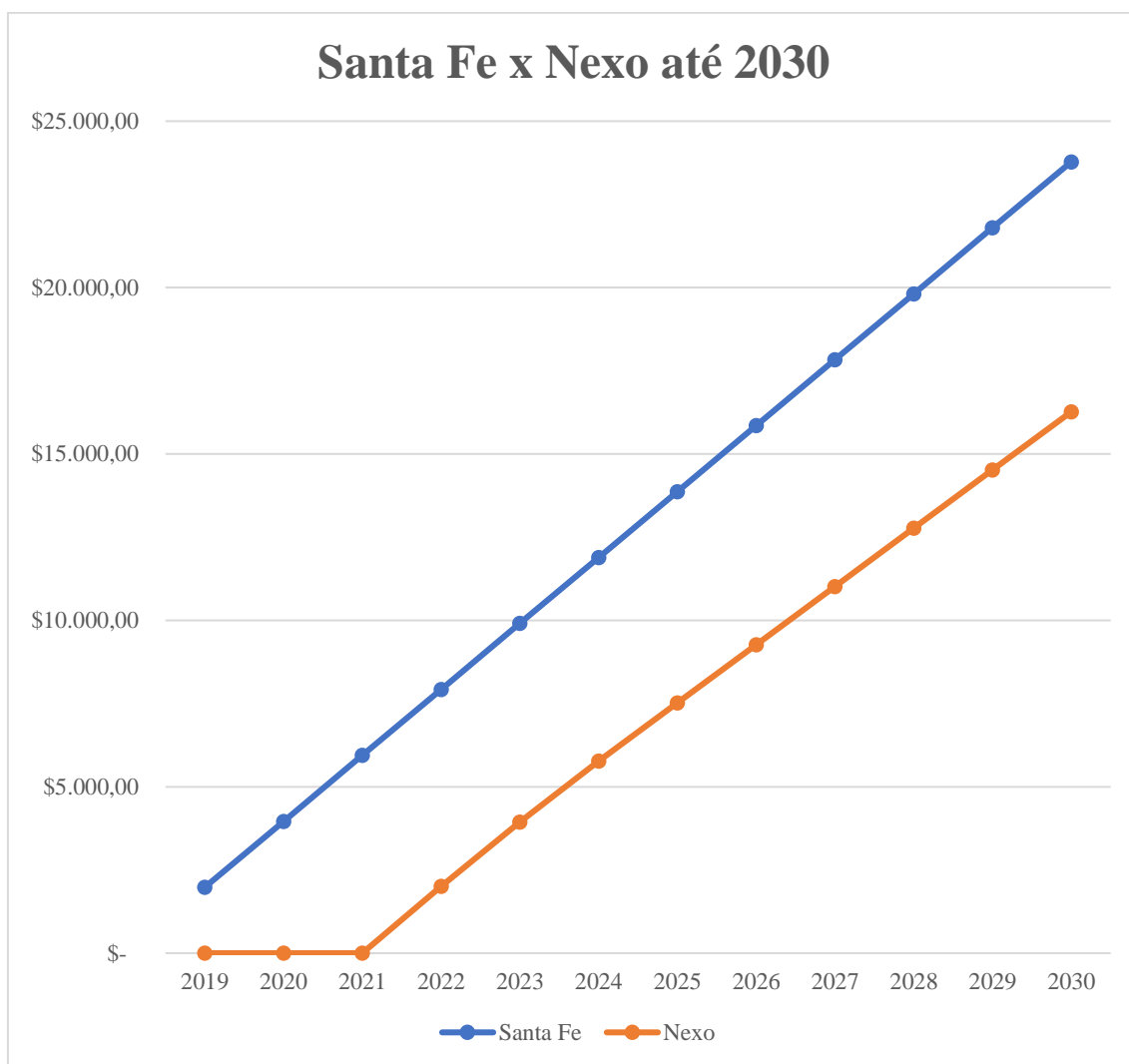


Figura 34: Custos anuais acumulados de combustível (US\$) do Santa Fe e do Nexo até 2030 com três meses grátis de combustível para o Nexo

Nesse novo cenário, o custo do Santa Fe até 2030 é de US\$23.778 e do Nexo de US\$16.268, ou seja, uma diferença de US\$7.510. Porém, essa diferença ainda não é suficiente para compensar a diferença de US\$32.550.

Entretanto, o Nexo está qualificado tanto para um crédito do governo federal de US\$7.500 quanto para um crédito estadual da Califórnia de US\$5.000. Com isso, o preço do veículo cairia para US\$45.800, e a diferença para o Santa Fe ficaria em US\$20.050. Na figura 34 temos agora as curvas do custo anual acumulado de cada modelo incluindo o preço do veículo e considerando esses descontos para o Nexo. As curvas de custo foram extrapoladas até que as se encontrassem.

Com a diferença do custo anual entre Santa Fe e Nexo sendo de US\$232,26 de 2025 em diante considerando as hipóteses assumidas, precisaria chegar em 2083 para que o preço total do Nexo se iguale ao preço do Santa Fe, como é possível visualizar na figura 34. Com isso, podemos concluir que ainda é necessária uma longa caminhada para que os veículos movidos à célula a combustível se tornem competitivos no mercado frente aos veículos convencionais. Será necessária uma redução tanto do preço do veículo através da redução do preço dos eletrodos como foi visto anteriormente como do preço do hidrogênio, além da continuação dos programas de benefícios por um certo tempo para ir consolidando esse segmento de veículos no mercado.

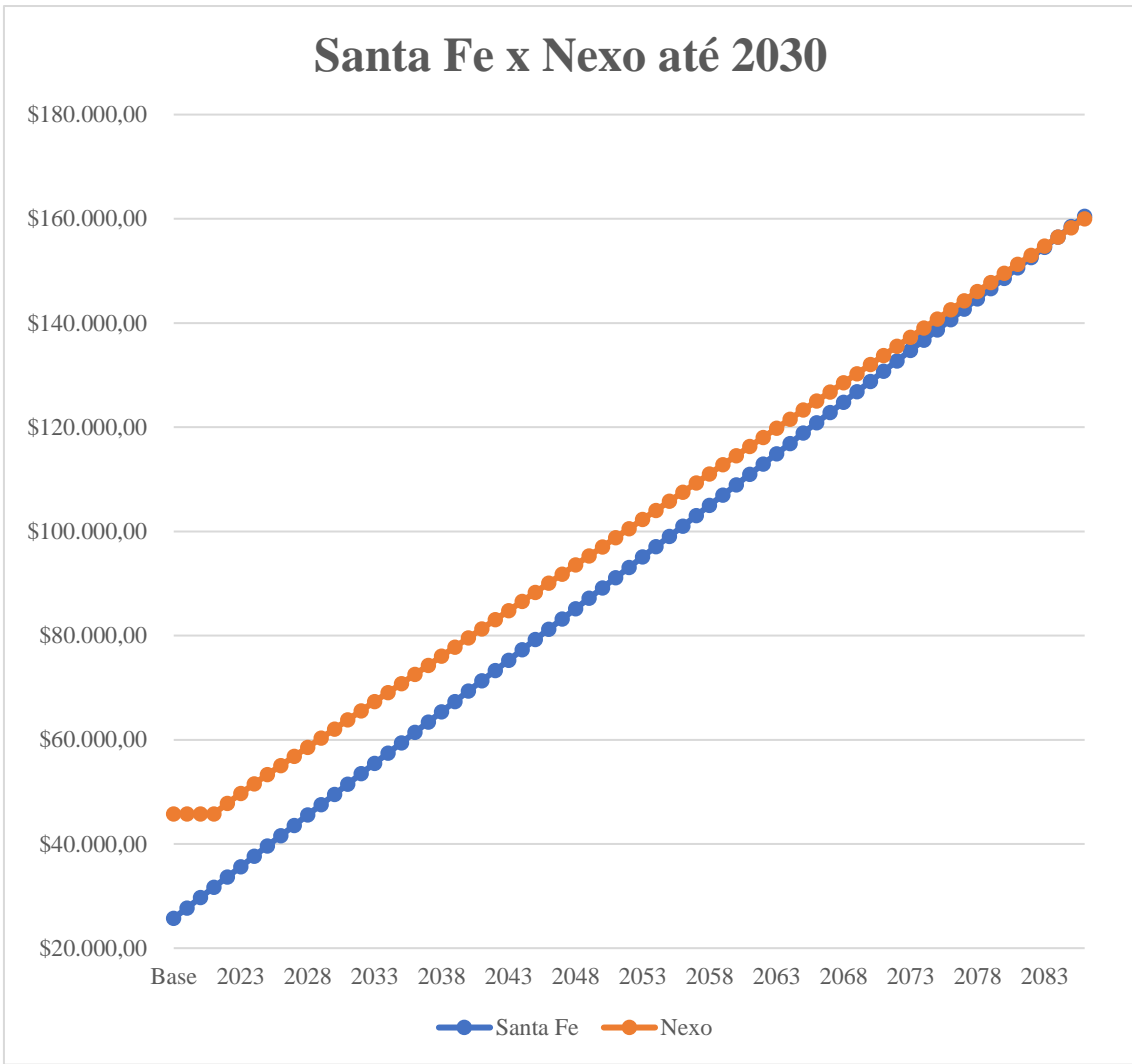


Figura 35: Custo total (US\$) do Santa Fe e do Nexo até 2030

9. CONCLUSÕES

No começo desse trabalho, a ferramenta de simulação ADVISOR foi apresentada. Seu objetivo, método de funcionamento, vantagens e desvantagens foram descritos. Foi feita uma explicação detalhada da interface do ADVISOR, especialmente as telas de entrada de dados, definição dos parâmetros de simulação e resultados da simulação.

Após a explicação do ADVISOR, foi simulado no programa um modelo do novo veículo movido à célula a combustível da Hyundai, o Nexo. Utilizando dados técnicos fornecidos em grande maioria pela própria Hyundai, além de dados de consumo de combustível fornecidos pela EPA, o modelo pode ser validado e apresentou uma ótima performance quanto ao consumo de combustível.

A primeira análise conduzida nesse trabalho foi uma análise da variação do grau de hibridização e como esse parâmetro afeta o consumo de combustível de um veículo híbrido elétrico e célula a combustível.

Através dos gráficos de consumo de combustível pelo grau de hibridização, é possível ver os efeitos da bateria e da capacidade de recuperar energia através do freio regenerativo no consumo de combustível. Tanto para o ciclo UDDS quanto para o ciclo HWFET, no caso onde apenas um ciclo foi simulado, o efeito do estado de carga da bateria é relevante para o consumo de combustível. Quando foram simulados dez ciclos consecutivos do HWFET e do UDDS de modo que os efeitos da bateria não sejam tão relevantes, as curvas de consumo de combustível eram menos afetadas pelo estado de carga da bateria e mais pela eficiência total do sistema.

A segunda análise foi uma análise paramétrica, alterando os valores de coeficiente de arrasto e de massa do veículo para ver como afetava o consumo de combustível. Era esperado que um aumento dessas duas variáveis causasse aumento no consumo de combustível, mas o objetivo era descobrir o quanto cada variável impactava e como impactava em cada ciclo. Foi observado que o coeficiente de arrasto é mais impactante no ciclo HWFET devido ao fato desse ciclo possuir uma maior velocidade média que o ciclo UDDS, já que o coeficiente de arrasto é proporcional ao quadrado da velocidade. Quanto à massa, foi encontrado uma redução do consumo de combustível com o aumento de massa para alguns poucos pontos simulados no ciclo UDDS, mas esse aumento se deve a um fator específico da trajetória do

ciclo UDDS e o momento de recarga da bateria. Fora casos específicos, o aumento da massa resulta num aumento do consumo de combustível.

Por fim, foi feita uma análise econômica comparando os custos para se manter um veículo movido à célula a combustível e um veículo convencional com motor de combustão interna. Os veículos escolhidos para cada caso foram respectivamente o Hyundai Nexo e o Hyundai Santa Fe. Os resultados mostram que ainda é extremamente caro manter um veículo movido à célula a combustível, tanto pelo valor dos componentes da célula a combustível quanto pelo valor do hidrogênio para o consumidor. Tanto as próprias montadoras quanto entidades governamentais tentam oferecer uma série de benefícios para compensar essa alta diferença de custo entre os dois tipos de veículos, mas os veículos movidos à célula a combustível ainda precisam de algum tempo para se estabelecerem no mercado como competidores dos veículos convencionais.

Finalmente, seria interessante para possíveis estudos futuros uma análise mais detalhada utilizando alguma ferramenta mais atual, tanto para atualizar alguns valores padrões que o ADVISOR usa, especialmente para a bateria que teve avanços consideráveis nos últimos 15 anos, quanto para alterar com mais facilidade a lógica de controle do modelo híbrido, de modo que se possa explicar melhor o comportamento complexo da influência da bateria quando o grau de hibridização aumenta. Nesse trabalho pode-se chegar à conclusão que foi a bateria que causava uma variação mais imprevisível dos resultados, mas não houve uma explicação detalhada desse processo.

Referências bibliográficas

- [1] World Energy Council, *World Energy Resources*, 2016
- [2] EPA. <https://www.fueleconomy.gov>. Acesso em 21/02/2019.
- [3] Hydrocarbon Processing. <https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2016/09/hydrogen-fuel-cells-vehicles-are-future-of-automobile-says-report>. Acesso em 06/03/2019.
- [4] U.S. Department of Energy, *Fuel Cell Handbook*, 2002
- [5] NASA. https://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen_2009.html. Acesso em 24/02/2019.
- [6] PISTOIA, G., *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*, ELSEVIER, 2010
- [7] Portal Biossistemas Brasil. <http://www.usp.br/portalbiossistemas/?p=4316>. Acesso em 18/02/2019.
- [8] SALES, Cristina Vilas Bôas de, ANDRADE, Rubenildo Vieira and LORA, Electro Eduardo Silva., *Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa*. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas
- [9] WENDT, Hartmut; GOTZ, Michael; LINARDI, Marcelo., *Tecnologia de células a combustível*. Quím. Nova, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 538-546, Aug. 2000
- [10] EHSANI, M., GAO, Y., GAY, S. E., EMADI, A., *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*, CRC Press LLC, 2005
- [11] HUANG, M. et al., “Research on hybrid ratio of fuel cell hybrid vehicle based on ADVISOR”, *International Journey of Hydrogen Energy*, v. 41, pp. 16282-16286, Jun. 2016
- [12] VARESI, K. et al., “A Simple Technique for Optimal Selection of Degree of Hybridization (DOH) in Parallel Passenger Hybrid Cars”, *Automatika*, v. 56, pp. 33-41, 2015
- RETIRAR

- [13] Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain#Types_by_degree_of_hybridization.
Acesso em 18/02/2019.
- [14] Department of Energy. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-39-million-innovative-hydrogen-and-fuel-cell-technologies>. Acesso em 20/02/2019.
- [15] ADVISOR Advanced Vehicle Simulator. <http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/>. Acesso em 20/02/2019.
- [16] WIPKE, K. B., CUDDY, M.R., BURCH, S.D., *ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach*, NREL, Aug. 1999.
- [17] The All-New Hyundai NEXO.
<http://www.hyundai.com/eu/en/Showroom/Eco/Nexo/PIP/index.html>. Acesso em 21/02/2019.
- [18] The All-New Hyundai Nexo – Technical Specifications.
<https://www.hyundai.news/eu/press-kits/all-new-hyundai-nexo-technical-specifications/>.
Acesso em 18/02/2019.
- [19] Automobile Catalog. https://www.automobile-catalog.com/auta_details1.php. Acesso em 21/02/2019.
- [20] Extreme Tech. <https://www.extremetech.com/extreme/280219-2019-hyundai-nexo-review-380-miles-on-hydrogen-can-your-ev-go-that-far>. Acesso em 28/02/2019.
- [21] EPA. <https://www.fueleconomy.gov>. Acesso em 21/02/2019.
- [22] KOUNTZ, E., *Understanding MPG and MPGe*, Stanford University, 2016
- [23] United States Environment Protection Agency. <https://www.epa.gov/fueleconomy/text-version-electric-vehicle-label>. Acesso em 21/02/2019
- [24] Electronic Code of Federal Regulations. https://gov.ecfr.io/cgi-bin/text-idx?SID=779366b74db042b5376ed41cfeea9ac0&mc=true&node=pt40.32.600&rgn=div5#se40.32.600_1002. Acesso em 21/02/2019.

- [25] THOMAS, J., HUFF, S., WEST, B., CHAMBON, P., *Fuel consumption sensitivity of conventional and hybrid electric light-duty gasoline vehicles to driving style*, SAE, Ago. 2017
- [26] Edmunds. <https://www.edmunds.com/fuel-economy/improving-aerodynamics-to-boost-fuel-economy.html>. Acesso em 27/02/2019
- [27] Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density. Acesso em 07/03/2019.
- [28] ATWOOD, P., GURSKI, S., NELSON, D. J., WIPKE, K. B., *Degree of Hybridization Modeling of a Fuel Cell Hybrid Electric Sport Utility Vehicle*, SAE, Jan. 2001
- [29] Intelligent Energy. <https://www.intelligent-energy.com/evaporatively-cooled-technology/>. Acesso em 27/02/2019
- [30] ATWOOD, P., GURSKI, S., NELSON, D. J., WIPKE, K. B., MARKEL, T., *Degree of Hybridization Modeling of a Hydrogen Fuel Cell PNGV-Class Vehicle*, SAE, Jan. 2002
- [31] GOLBUFF, S., *Optimization of a plug-in hybrid electric vehicle*, Georgia Institute of Technology, 2006
- [32] AHLUWALIA, R. K., WANG, X., ROUSSEAU, A., *Fuel economy of hybrid fuel-cell vehicles*, SAE, Jan. 2002
- [33] SOVRAN, G., *The Impact of Regenerative Braking on the Powertrain-Delivered Energy Required for Vehicle Propulsion*, SAE International, Jan. 2011.
- [34] EDWARDS, R., LARIVÉ, J. F., BEZIAT, J. C., *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, JRC Scientific and Technical Reports, Jul. 2011.
- [35] The All-New Hyundai Santa Fe – Technical Specifications.
<https://www.hyundai.news/eu/press-kits/the-all-new-hyundai-santa-fe-technical-specifications/>. Acesso em 23/02/2019.
- [36] U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration.
<https://www.fhwa.dot.gov/ohim/onh00/bar8.htm>. Acesso em 23/02/2019.
- [37] California Fuel Cell Partnership. <https://cafcp.org/content/cost-refill>. Acesso em 23/02/2019.

- [38] U.S. Energy Information Administration – Federal Highway Administration.
https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_gnd_dcus_sca_w.htm. Acesso em 23/02/2019.
- [39] Hyundai USA. <https://www.hyundaiusa.com/nexo/index.aspx>. Acesso em 23/02/2019.
- [40] YANG, Y., *PEM fuel cell system manufacturing cost analysis for automotive applications*, Wellesley: Austin Power Engineering LLC, 2015
- [41] WANG, J., WANG, Y., *Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization*, Engineering, 2018